

光の回折と干渉の現象を調べる教材の開発と実験

Development of an educational tool: experiments on light diffraction and interference for high school physics students

濱崎 貢¹⁾・山口光臣²⁾・陳 麗¹⁾・小原益己³⁾・三井好古⁴⁾・小山佳一⁴⁾*
Mitsugi HAMASAKI¹⁾, Mitsuomi YAMAGUCHI²⁾, Li CHEN¹⁾, Masumi OBARA³⁾, Yoshifuru MITSUI⁴⁾,
Keiichi KOYAMA⁴⁾*

¹⁾ 鹿児島大学共通教育センター

¹⁾ Education Center, Kagoshima University

²⁾ かがしま企業家交流協会

²⁾ Kagoshima Enterprise Exchange Society

³⁾ 原田学園鹿児島情報高等学校

³⁾ Kagoshima JOHO High School, Harada Academy

⁴⁾ 鹿児島大学大学院理工学研究科

⁴⁾ Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

* koyama@sci.kagoshima-u.ac.jp

Abstract: Light diffraction and interference are a very interesting and important learning content for high school students. In this study, high school students prepared an original double slit and performed three measurements using this slit. First, the slit interval was determined by the students using a known-wavelength-laser beam. Next, the students measured an unknown wavelength of a handmade laser module using the slit. Finally, the students measured CD-ROM pit spacing using the known-wavelength-laser beam. After the experiments, the students presented and discussed their experimental results each other.

Keywords: Double slit, laser light, Slit interval, Wavelength, CD-ROM pit

1. はじめに

国が推進する高大接続教育と大学入学者選抜の一体的改革のひとつとして、2020年度から新しく大学入学共通テストが導入される[1]。この共通テストの理科では、基本的な概念や原理・法則だけでなく、科学的現象の中から本質的な情報を見出し、課題の解決に向けて主体的に考察・判断する過程を問う主題が予想される[2]。鹿児島大学理学部は、平成28年度から「かがしま企業家交流協会」との共催でサイエンス・パートナーシップ・プログラム（SPP）を実施し、新しい理科教育に対応する実践的な取り組みを行っている。

本稿は、令和元年度の SPP に取り入れた高等学校物理の「光の回折と干渉」に関する教材の開発と、それを用いた実験についてまとめたものである。「光の回折と干渉」は高等学校物理の重要な学習項目であることから多様な実験装置が市販されているが、今年度の SPP では生徒がオリジナルな器具を協働で作製し次の実験を行った。

実験 1 ; 作製した二重スリットのスリット間隔を、波長が既知のレーザー光で測定する。

実験 2 ; 実験 1 のスリットを用いて、波長が未知の光源（レーザーモジュール）の波長を測定する。

実験 3 ; CD-ROM のピット間隔を、波長が既知のレーザー光で測定する。

生徒はこれらの実験をとおして、光の「回折と干渉」の現象を理解することができる。また、身近な材料を利用した実験によって創造性が培われ、知識や技能の習得とともに思考力・判断力・表現力を身に付けることが期待できる。

※ 実験は、8 グループ（1 グループ 4 名）で行った。

※ 本稿で報告する実験 のデータと解析結果は、一つのグループのものである。

2. 実験の原理

2. 1, 二重スリットの間隔と波長 (Young の実験)

レーザー光源から出た光を、二重スリット（以下スリット）をとおしてスクリーンに当てると、図 1 のように干渉縞が観測される。明るい点（明点）は、スリットを通過した光が強めあっている点に対応する。スリット間隔を d 、スリットからスクリーンまでの距離を L 、スクリーンの中心から m 番目までの明点の距離を x とすると、明点になる条件は光路差が波長の整数倍であるから、(1) 式で与えられる。

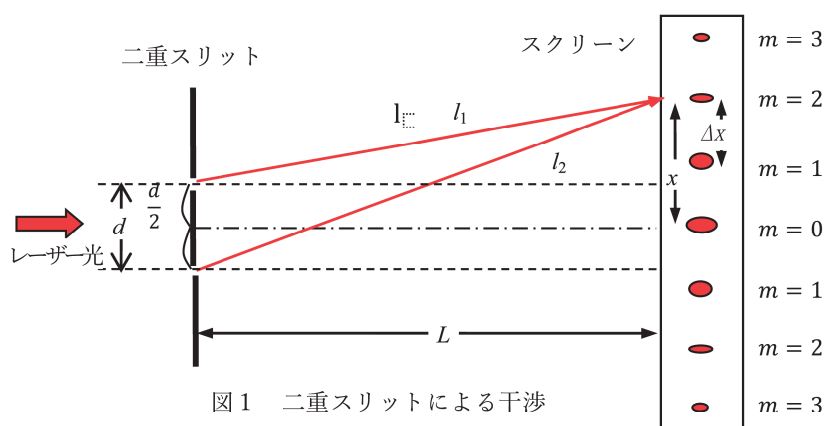


図 1 二重スリットによる干渉

$$|l_1 - l_2| = m\lambda, \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

l_1, l_2 を d, L, x で表すと、

$$l_1 = \sqrt{L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2} = L \left\{ 1 + \left(\frac{x - \frac{d}{2}}{L}\right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$l_2 = \sqrt{L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2} = L \left\{ 1 + \left(\frac{x + \frac{d}{2}}{L}\right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

となる。ここで、 $a \ll 1$ のとき近似式 $(1 + a)^n \cong 1 + na$ を用いれば、

$$|l_1 - l_2| \cong L \left\{ 1 + \left(\frac{x + \frac{d}{2}}{L}\right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} - L \left\{ 1 + \left(\frac{x - \frac{d}{2}}{L}\right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} = \frac{xd}{L} \quad (4)$$

となり、(1)と(4)式を比較すると (5)式が得られ、明点の位置 x は (6) 式で表される。

$$\frac{xd}{L} = m\lambda \quad (5)$$

$$x = m \frac{\lambda L}{d} \quad (6)$$

したがって、隣り合う明点の間隔 Δx は次の (7) 式で表される。

$$\Delta x = x_{m+1} - x_m = \{(m+1) - m\} \frac{\lambda L}{d} = \frac{\lambda L}{d} \quad (7)$$

(7) 式によって波長 λ が既知の場合、 Δx と L の測定によってスリット間隔 d を求めることができる。逆に、スリット間隔 d が既知の場合、未知の波長 λ を求めることができる[3]。

2. 2. CD-ROM のピット間隔

CD-ROMの記録面にはピットと呼ばれる信号列（凹み）が並んでいる。このピットはCD-ROMのトラックに配置しているため、反射型の回折格子として光の干渉現象を確認することができる[4,5]。

図2のように、記録面にレーザー光を垂直に当てると、各トラックのピットで区切られた記録面で反射した回折光はスクリーン上に干渉縞をつくる。このとき、隣り合う回折光の光路差は(8)式で表される。

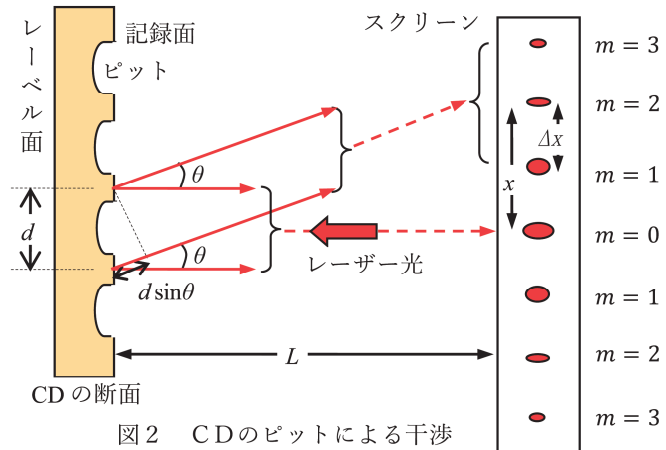


図2 CDのピットによる干渉

$$d \sin \theta = m \lambda, \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (8)$$

θ が極めて小さいとき $\sin \theta \cong \tan \theta = \frac{x}{L}$ であるから、これを(8)式に用いれば(6)および(7)と同じ式を得る。

(7) 式から波長 λ が既知の場合、CD-ROMのピット間隔 d を求めることができる[3,4]。

3. 実験1（二重スリットの作製とスリット間隔の測定）

実験には次のものを準備する。

レーザーポインター（波長表示）、支持台（レーザーポインター・スリット・スクリーン用）、定規、スケール、白紙、スリット固定用フレーム、カッターナイフ、カミソリ、カッターマット、養生テープ、セロテープ、読取り顕微鏡

実験は危険を伴うので、次のことに注意する。

- (1) レーザー光を人の顔面に当てないようにする。
- (2) 刃物（カッターナイフ、カミソリ）の扱いは、怪我のないように注意する

3. 1. 実験1の方法とデータ

- (1) カッターマット上で白紙に定規を当て、二枚重ねのカミソリの刃で長さ1 cm程度の切り込みを入れてスリットをつくる（図3）。

※ 切り込みの部分に黒色マジックを塗ると、レーザー光を当てやすい。

※ 切り込みの部分をはかりに透かして、スリットになっているか確認する。

- (2) (1)の白紙をカッターナイフで切り取り、フレームの中央部に挟んで固定する。

- (3) レーザーポインター、スリット、スクリーンを支持台に固定し、図1に従って配置する。

※ スクリーンには方眼用紙をセロテープで貼り付ける。

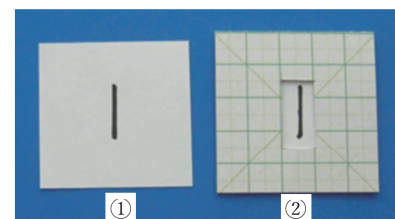


図3 作製した二重スリット

- ①；白紙に切り込みを入れた状態
- ②；フレームに挟んだ二重スリット

※ スリットとスクリーンは、レーザー光に対して垂直になるように配置する。
※ レーザー光の射出口とスリットまでの距離は約 10cm，スリットとスクリーンまでの距離は約 100cm とする。

- (4) スクリーン上に干渉縞が、数cm度にわたり明瞭に見えるようにスリットの位置を調整する。
- (5) スリットからスクリーンまでの距離 L をスケールを用いて測定し、データ表（表 1）に記録する。
- (6) 干渉縞を方眼用紙にマークし、明点の数 n とその範囲幅 H をデータ表（表 1）に記録する。
※ 図 4 のように、明点の数 n の開始番号を 0 とする。
- (7) n と H から明点の間隔 Δx を求め、データ表（表 1）に記録する。
※ 範囲幅 H に n 個の明点があるから、明点の間隔は、 $\Delta x = H/n$ である。
- (8) スリットからスクリーン間の距離 L を変えて、(3)から(7)を 3 回繰り返す。

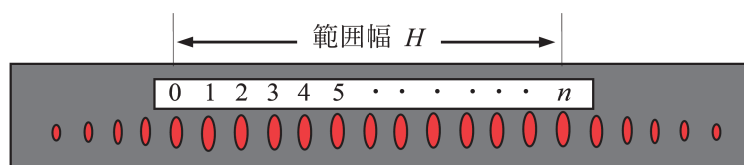


図 4 スクリーン上の干渉縞

表 1 実験 1 のデータ表

	1 回	2 回	3 回
レーザー光の波長の公称値 λ_0 (m)	532×10^{-9}		
スリットからスクリーンまでの距離 L (m)	115×10^{-2}	92.0×10^{-2}	66.7×10^{-2}
明点の範囲幅 H (m)	3.0×10^{-2}	2.0×10^{-2}	1.0×10^{-2}
明点の数 n (個)	15	13	8
明点の間隔 Δx (m)	2.00×10^{-3}	1.53×10^{-3}	1.25×10^{-3}

※ レーザー光の波長の公称値 λ_0 (m) は、各レーザーポインターに表示している。

3. 2. 実験 1 の解析

- (1) データ表 1 の λ_0 ， L および Δx を用いて、(7) 式からスリット間隔の計算値 d を求める。
- (2) スリット間隔の計算値 d の平均値 d_{AVE} を求める。
- (3) スリット間隔の実測値 d_0 を、読取り顕微鏡で測定する。
- (4) スリット間隔の実測値 d_0 に対する平均値 d_{AVE} の相対誤差を求める。

表 2 実験 1 の解析結果

	1 回	2 回	3 回
スリット間隔の計算値 d (m)	0.305×10^{-3}	0.317×10^{-3}	0.283×10^{-3}
スリット間隔の平均値 d_{AVE} (m)	0.302×10^{-3}		
スリット間隔の実測値 d_0 (m)	0.310×10^{-3}		
d_0 に対する d_{AVE} の相対誤差 (%)	2.58		

4. 実験2（レーザーモジュールの波長の測定）

光源にはレーザーポインターの代わりに、作製した波長未知のレーザーモジュールを用いる（図5）。他の準備物は実験1に同じである。

4. 1. 実験2の方法とデータ

- (1) 実験1と同様の方法で、明点の数 n とその範囲幅 H をデータ表（表3）に記録する。
- (2) (1) の n と H から隣り合う明点の間隔 Δx を求め、データ表（表3）に記録する。
- (3) スリットからスクリーンまでの距離 L を変え、(1)と(2)を3回繰り返す。

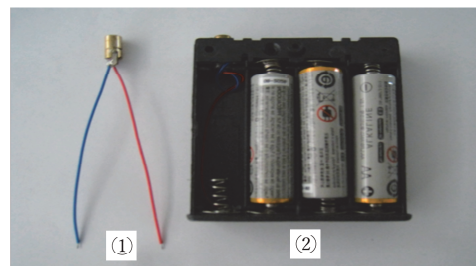


図5 レーザーモジュール

- ①；レーザーモジュールのユニット
②；電池ホルダーに組み込んだユニット

表3 実験2のデータ表

	1 回	2 回	3 回
スリットからスクリーンまでの距離 L (m)	101×10^{-2}	82.6×10^{-2}	83.2×10^{-2}
明点の範囲幅 H (m)	2.0×10^{-2}	3.0×10^{-2}	2.0×10^{-2}
明点の数 n (個)	9	18	12
明点の間隔 Δx (m)	2.22×10^{-3}	1.67×10^{-3}	1.67×10^{-3}

4. 2. 実験2の解析

- (1) スリット間隔の実測値 d_0 ，スリットからスクリーンまでの距離 L および明点の間隔 Δx を用いて、(7) 式からレーザーモジュールの波長 λ を求める。

※ スリットの実測値は、「実験1」で測定した値である（表2）。

- (2) レーザーモジュールの波長の平均値 λ_{AVE} を求める。

表4 実験2の解析結果

	1 回	2 回	3 回
スリット間隔の実測値 d_0 (m)	0.310×10^{-3}		
レーザーモジュールの波長の計算値 λ (m)	684×10^{-9}	626×10^{-9}	622×10^{-9}
レーザーモジュールの波長の平均値 λ_{AVE} (m)	644×10^{-9}		

※ レーザーモジュールの波長の公称値 λ_0 は公表されていないので、 λ_0 に対する λ_{AVE} の相対誤差は求めない。

5. 実験3（CD-ROMのピット間隔の測定）

光源には実験1で使用したレーザーポインター（波長表示）を、回折格子にはCD-ROMを使用する。他の準備物は実験1に同じである。

5. 1. 実験3の方法とデータ

- (1) 図2に従って、CD-ROMとスクリーンが互いに平行になるように設置する。

※ スクリーンは中央に直径5mm程度の穴の開いたボードを用い、その上の方眼用紙を貼る。

- (2) スクリーンの中央部の穴から、レーザー光をCD-ROMに垂直に照射する。
- (3) CD-ROMとスクリーンの距離 L を約15cm にし、スクリーンに干渉縞が現れることを確認する。
 ※ レーザーポインターの射出口が0次の明点になるようにスクリーンを調節する。
 ※ 0次の明点を中心に、明点が左右に2または3点生じる。
- (4) 明点を方眼用紙にマークし、その数 n と範囲幅 H をデータ表（表5）に記録する。
- (5) n と H から、明点の間隔 Δx を求めデータ表（表5）に記録する。
- (6) CD-ROMとスクリーンの距離 L を変えて、(4)と(5)を3回繰り返す。

表5 実験3のデータ表

	1 回	2 回	3 回
レーザー光の波長の公称値 λ_0 (m)	532×10^{-9}		
CD-ROMからスクリーンまでの距離 L (m)	122×10^{-3}	125×10^{-3}	130×10^{-3}
明点の範囲幅 H (m)	84×10^{-3}	86×10^{-3}	92×10^{-3}
明点の数 n (本)	2	2	2
明点の間隔 Δx (m)	42×10^{-3}	43×10^{-3}	46×10^{-3}

5. 2. 実験3の解析

- (1) レーザー光の波長の公称値 λ_0 、CD-ROMからスクリーンまでの距離 L および明点の間隔 Δx を用いて、(7) 式からピット間隔の計算値 d を求める。
- (2) ピット間隔の平均値 d_{AVE} を求める。
- (3) CD-ROMのピット間隔の公称値 d_0 に対する平均値 d_{AVE} の相対誤差を求める。

表6 実験3の解析結果（ピット間隔の公称値 d_0 (m) [6]）

	1 回	2 回	3 回
ピット間隔の計算値 d (m)	1.55×10^{-6}	1.55×10^{-6}	1.50×10^{-6}
ピット間隔の平均値 d_{AVE} (m)	1.53×10^{-6}		
ピット間隔の公称値 d_0 (m)	1.60×10^{-6}		
d_0 に対する d_{AVE} の相対誤差 (%)	4.38		

6. 考察

表7は各実験の測定結果の再掲である。次に各実験の考察を示す。

実験1；二重スリットは自作したものでスリット間隔の実測値 d_0 は、読取り顕微鏡による測定値でありグループでわずかに異なる。そのため、平均値 d_{AVE} の実測値 d_0 に対する相対誤差は、1.2% から 8.0% で隔たりがあった。相対誤差を軽減するには、スリットからスクリーンまでの距離 L と明点の範囲幅 H を大きくとり、正確な測定によって読取り誤差を縮減する必要がある。また、幾つかのグループでは図4の明点の数 n の開始番号を「1」にしたため、相対誤差が大きくなった。

実験2；実験に用いた光源は、安価な市販のレーザーモジュールを単三の電池ボックスに組み込んだものである（図5）。図6はレーザーモジュールによる干渉縞

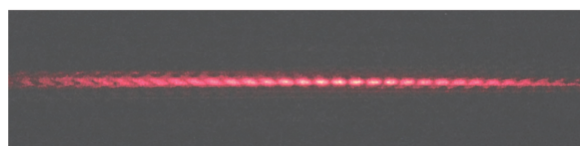


図6 レーザーモジュールによる干渉縞

ていないため、実験で測定することにした。なお、実験1で求めたスリット間隔の誤差が大きかったため、ここでは読取り顕微鏡による実測値 d_0 を用いた。いずれのグループも、レーザーモジュールを波長として、 $650 \times 10^{-9}(\text{m})$ 前後の結果を得ていた。

実験3：CD-ROMのピット間隔の公称値 d_0 は、科学実験用のグレーティング (600mm^{-1}) と同程度である。このため、実験1、2に比べて明点の間隔 Δx がはるかに大きくなる[7,8]。さらに明点の次数が大きくなるほど間隔が広がっている(図7)。各グループの測定によるCD-ROMのピット間隔の平均値 d_{AVE} は実測値 d_0 より小さく、相対誤差が3.5%から11.3%と大きくなった。この原因はCD-ROMの場合、図2の θ が大きいためである。

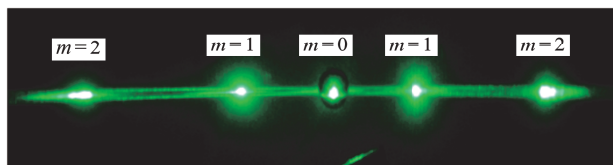


図7 レーザーモジュールによる干渉縞
次数 (m) が大きくなると明点の間隔が大きくなる。

実験の精度を上げるには、図2においてレーザー光のCD-ROM上の反射点を中心にして、スクリーンを円形にするなどの工夫が必要である。この場合、(8)式において $\sin\theta \cong \tan\theta = \frac{x}{L}$ の近似は使用せず、 θ を実測して $\sin\theta$ の値を直接求めることになる。

表7 実験の解析結果

(a) 実験1		(b) 実験2		(c) 実験3	
スリット間隔の平均値 d_{AVE} (m)	0.302×10^{-3}	モジュールの波長の平均値 λ_{AVE} (m)	644×10^{-9}	ピット間隔の平均値 d_{AVE} (m)	1.26×10^{-6}
スリット間隔の実測値 d_0 (m)	0.310×10^{-3}	モジュールの公称値	公表なし	ピット間隔の公称値 d_0 (m)	1.60×10^{-6}
d_0 に対する d_{AVE} の相対誤差 (%)	2.58	モジュールの波長の相対誤差	求めず	d_0 に対する d_{AVE} の相対誤差 (%)	21.3

実験1、実験2、実験3で使用した器具の配置を図8に示す

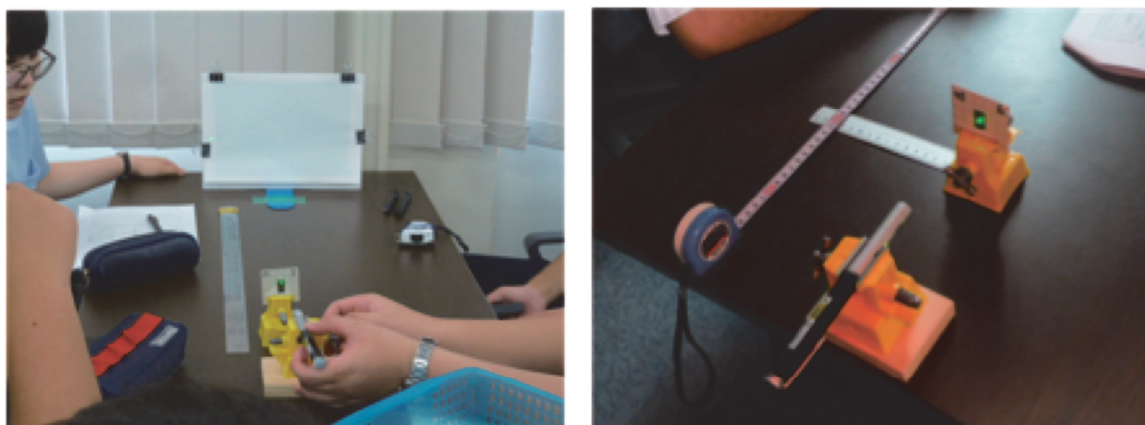


図8 実験1、実験2、実験3で使用した器具の配置。

7. まとめ

今回の実験の目的は、二重スリットやレーザー光源など手造りの教材を用いて、スリット間隔、レーザーモジュールの波長、CD-ROMのピット間隔を測定することである。さらに、実験の考察の過程をととして、課題を発見し協働してそれを解決する資質や能力（思考力・判断力・表現力）を身に付けさせることである。測定結果はグループによって隔たりがあったが、手造りの教材で実験に臨んだことが、むしろ生徒は親しみを感じながら楽しく実験ができたようである。

講座の最終日にはグループごとに実験結果を分析し、その後プレゼンテーションを行った(図9)。プレゼンテーションをととして、生徒たちは次のような感想や意見を述べた。



図9 実験後のプレゼンテーション

- ・実験に使った式の導き方が難しかった。教科書の求め方とは違うような気がした。
- ・干渉が光の道のりの差によって起こることが理解できた。
- ・干渉縞は教科書で見たことはあったが、自分たちで干渉縞を作り観察できたことに感動した。
- ・CD-ROMのピット間隔を求めたことは興味深かった。ただし、相対誤差が大きかった。

次期学習指導要領では高等学校物理の「光の回折と干渉」の学習として、ヤングの実験や回折格子を扱い光路長や位相のずれに触れることを規定している。さらに、光源の波長や二重スリットの間隔と干渉縞との関係を調べる実験を行い、「光の回折と干渉」を光波の性質と関連付けて理解させることが望ましいとしている[2]。今回、SPPで行った実験はこれに応えるもので、成果として次のようなことが挙げられる。

- (1) 実験に興味・関心をもち協働して観察、実験をしようとする態度が見られた。
- (2) 波長や二重スリットの間隔と干渉縞との関係を、光波の性質と関連付けて理解できた。
- (3) 実験及びプレゼンテーションをととして、事象に対する思考力、判断力や表現力が向上した。

謝辞

本SPPは、鹿児島大学理学部と「かごしま企業家交流協会」との共催で実施したものである。当協会には実験に関わる全ての経費を負担していただいた。さらに、講座の広報や実施要綱の作成など、当協会の事務局に全面的に支援していただいた。講座の終了に当たり、厚くお礼を申し述べます。なお、参加した生徒と高等学校の引率の先生方、TAとして実験の補助指導をしていただいた鹿児島大学理学部と大学院理工学研究科の学生にも謝意を表します。

参考文献

- [1] 中央教育審議会答申「新しい時代にふさわしい高大接続の実現に向けた高等学校教育,大学教育,大学入学者選抜の一体的改革について」(平成26年12月)
- [2] 文部科学省「高等学校学習指導要領解説(理数編)」(平成30年7月) 81-84
- [3] 柴田洋一「熱・波動(大日本図書株式会社)」(2016.10) 153-155
- [4] 若林文高「DVD分光器の回折条件(国立科学博物館研究報告書 E類, 28)」(2005.12) 21-30
- [5] 原康夫「物理学基礎(学術図書出版社)」(2016.10) 154-155
- [6] 日本工業規格「120 mm 再生専用形光ディスク(CD-ROM)(JIS X 6281)」(1992)
- [7] 共通教育基礎物理学実験担当者「物理学実験(鹿児島大学物理科学科)」(2014.4) 52-53
- [8] 三重大学工学部「レーザーポインターで測るCDの溝間隔」(2016.12)

<https://www.mirai-kougaku.jp/laboratory/pages/>