

レーザー回折物理実験の紹介と担当者技術研修

本山英明¹⁾， 芦澤雅人²⁾， 増田健二²⁾

1) 静岡大学 技術部浜松分室教育支援部門

2) 静岡大学 技術部浜松分室プロジェクト・安全支援部門

要旨

本学工学部2年生を対象とした物理実験では、1982年より今回のテーマを行っている。実験の内容については、複スリットおよび回折格子(対物マイクロメーター)による干渉縞の間隔からレーザー光の波長を求める実験、単スリットの幅と円孔の直径を求める実験である。学生が受講する8テーマの中で3テーマが光学実験であり、全体を占める割合が高く、いずれも暗室実験であり、学生が目視によって測定するため、目への負担も大きい。そこで今回は「iPod touch」を用いて、望遠鏡を用いて撮影し、画像データをImageJというフリーソフトによる解析方法を提案する。

Key Words: 多人数学生実験, 光の波動性, 干渉・回折, 技術研修

1. はじめに

静岡大学(教養部)では、1982年(昭和57年)4月から「レーザー光の干渉・回折の実験¹⁾³⁾」を理・工・農学部(約800名の受講する)2年次物理実験で実施している。実験の内容としては、複スリットおよび回折格子(対物マイクロメータ)による干渉縞の間隔からレーザー光の波長を求める実験、単スリットおよび円孔(ピンホール)からの回折光の強度分布の間隔からスリットの幅や円孔の直径を求める実験などである。物理実験に導入した当初は回折格子の代わりに対物マイクロメータの目盛線を用い、単スリットはカッターの刃を張り合わせたもの、円孔はアルミ箔に針で穴を開けたもので代用していたが、導入2年後からは、市販のスリット(幅75 μm)、円孔(直径0.1mm)、透過型回折格子(格子定数20 μm)を使用している。この他の回折物体のサンプルとしては、針金(直径0.1mm, 0.3mm)、髪の毛、ハンカチの織目などの回折縞の観察を行っている。現在、物理実験は、工学部2年生を対象にして、週3日(月:M科, 水:E科・C科, 金:D科・S科)520名以上の学生が受講している。図-1に物

理実験予定表(月:M科)を示す。教員・技術職員・TAが担当する種目が決められている。各クラス(曜日)をA, Bの2班に分けて、A班は前期の前半で物理実験、後半で化学実験を行っている。B班はその逆となる。物理・化学実験として、物理実験7種目、化学実験7種目、計14種目を受講する。

物理実験予定表

【平成30年度前学期(月)M科】

担当	種目	担当TA													
		藤田	藤田	藤田	藤田	藤田	藤田	藤田	藤田	藤田	藤田	藤田	藤田	藤田	藤田
実験種目	単スリット	波と回折	複スリット	回折格子	レーザー光	電子の比喩	回折格子	単スリット	波と回折	複スリット	回折格子	レーザー光	電子の比喩	回折格子	
担当	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	(B)	
曜日	1	3	4	2	4	4	1	2	3	4	2	4	3	1	
①	1														
②		2													
③			3												
④				4											
⑤					5										
⑥						6									
⑦							7								
⑧								7							
⑨									7						
⑩										7					

最大受講生数：12名×8班＝96名
①と③班、②と④班、⑤と⑦班、⑧と⑩が同じ種目を行います。

物理実験日程表 (H30年度月曜日)

A組					
4/16	ガイダンス	5/7	実験 3	5/28	実験 6
4/23	実験 1	5/14	実験 4	6/4	実験 7
5/2(水)	実験 2	5/21	実験 5	7/19(木)	欠席者補充実験
B組					
4/16	ガイダンス	6/25	実験 3	7/17(火)	実験 6
6/11	実験 1	7/2	実験 4	7/23	実験 7
6/18	実験 2	7/9	実験 5	7/19(木)	欠席者補充実験

図-1 物理実験予定表

図 2 に全種目終了後のアンケート結果を示す。今回対象となった「レーザー光回折と干渉⁴⁾⁵⁾」の実験であり、内容については 75%程度の学生が面白い、理解度については 95%以上の学生が理解できたと回答している。

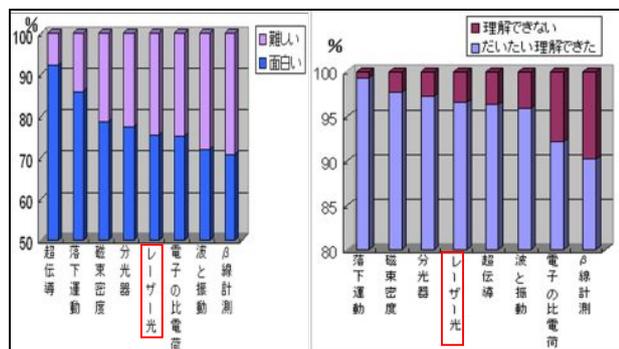


図-2 物理実験のアンケート結果

2. 物理実験担当者による技術研修

図-3.1 に技術研修の測定風景および図-3.2 にデータ解析の様子を示す。

実施日時：2018年9月28日(木)10:00~16:00

実施場所：工学部8号館2階第4物理実験室

目的：iPod touchと望遠鏡を用いて、レーザー光の実験を画像化することによる高精度な測定方法を担当する技術職員に提案し、今後の指導方法やテキストの改訂に活用する。

研修項目：iPod touchを用いたレーザー光の干渉回折実験



図-3.1 技術研修の様子（測定風景）



図-3.2 技術研修の様子（解析風景）

物理実験では、測定時に暗線、明線を紙に写し取らせ、金尺(精度 0.5mm)を用いて、計測している。

今回の iPod touch を用いた測定と解析方法は、鈴木らの文献⁶⁾を参考にした。図-4のように iPod touch を用い、スマートフォン取り付けアダプターを用いて、望遠鏡(×4)の接眼レンズを取り付けた状態で設置し、上記の4種の実験の干渉縞、回折縞を撮影して、ImageJという国立衛生研究所(NIH)で開発された画像解析ソフトを用いて、間隔を計測した。科学研究での画像処理の際に広く用いられるオープンソースなパブリックドメインの画像処理ソフトで、画像内のピクセルの数値を元に計算処理を行える点が特徴的である⁷⁾。

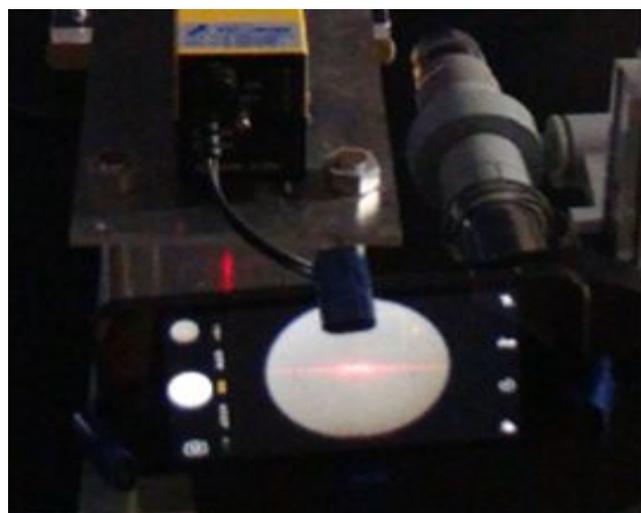


図-4 iPod-touch と望遠鏡を用いた測定系

3. 測定結果

3.1 複スリットによる干渉

複スリットからの回折光の干渉縞の間隔を測定する。測定値からレーザー光の波長を計算する。

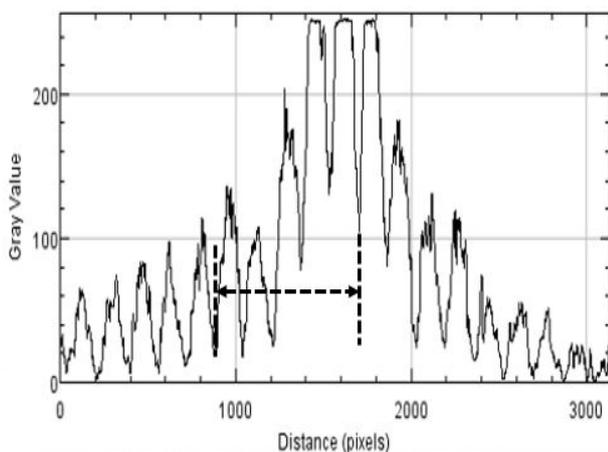
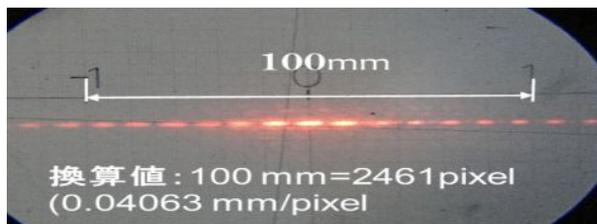


図-5 複スリットによる干渉強度分布

まず解像度を求める。100mm=2461pixel なので解像度は 0.04063mm/pixel であるので、1pixel 当たり約 0.04mm の精度で読み取ることができる。波長を求める際は(1)式を用いた。

$$\lambda = \frac{d \cdot X_m}{L} \quad (d = 0.103 \text{ mm}, L = 1258 \text{ mm}) \quad (1)$$

$$= \frac{0.103 \times 10^{-3} \times 7.799 \times 10^{-3}}{1.258} = 638.6 \times 10^{-9} = 638.6 \text{ nm}$$

表-1 暗線の間隔 (5 X)

		暗線の間隔		
位置(左)	位置(右)	5x[pixel]	5x[mm]	x[mm]
-5	1	966	39.22	7.844
-4	2	954	38.73	7.746
-3	3	955	38.77	7.755
-2	4	978	39.71	7.941
-1	5	949.5	38.55	7.710
		平均値 X _{0m}	7.799	

図-5 のように、5 次分の暗線間隔のピクセル数を読み取る。表-1 に測定結果を示す。暗線間隔の平均ピクセル数は 960.5pixel となり、換算値をかけて実距離にすると、平均の暗線間隔 $\bar{x}=7.799\text{mm}$ となった。さらに、スリット幅は $d=0.103\text{mm}$ 、スリットとスクリーン間の距離は $L=1258\text{mm}$ (以降の測定でもこの値を用いる)であるので、これらを代入して波長を求めると $\lambda=638.6\text{nm}$ となり、定数値 632.8nm と比べ、ほぼ妥当な値となった。

3.2 多数スリットによる干渉

多数スリット(対物マイクロメータの目盛線)からの回折光の干渉縞の間隔を測定する。測定値からレーザー光の波長を計算する。

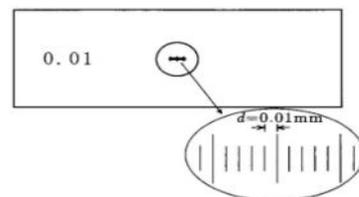


図-6 のように、次数ごとの明線間隔の距離をピクセル数を読み取る方法で測定する。多数スリット(対物マイクロメータ)の場合は、3 次の明線までを測定するが、望遠鏡を用いると画面内に明線が収まりきらなかったため、iPod-touch で直接干渉縞を撮影した。この解像度は、望遠鏡を用いた時に比べて 1/4 程度になっている(解像度は 0.1806mm/pixel)。

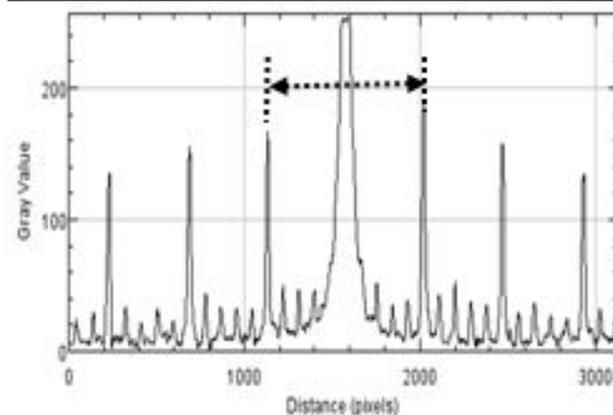
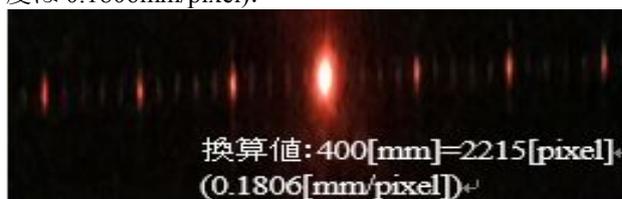


図-6 多数スリットによる回折強度分布

次の(2)式を用いて、1 次から 3 次まで各次数での波長を求める。

$$\lambda_m = \frac{d}{m} \sin \theta_m \approx \frac{d X_m}{m L} \quad (2)$$

$$= \frac{0.01 \times 0.1806 \times X_m}{m \times 1.267}$$

($d=0.103[\text{mm}]$, $L=1258[\text{mm}]$)

$$X_{0m} = \frac{1}{2}(X_m - X_{-m}) \quad (3)$$

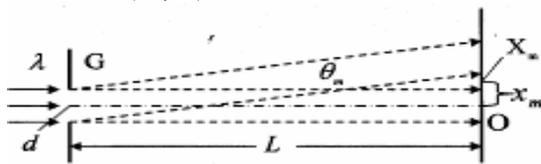
表-2 次数ごとの X_{0m} と波長

次数	X_{0m} の画素数 [pixel]	X_{0m} の実距離 [mm]	波長 λ [nm]
1	444.0	80.19	637.9
2	891.8	161.1	639.9
3	1350.3	243.9	646.0

(3)式の $X_m - X(-m)$ は各次数の明線間の距離、 d はスリット幅 $d=0.01\text{mm}$ 、 m は次数である。各次数について、 X_{0m} と波長はそれぞれ表-2 のようになる。1次と2次の測定値は、物理定数値(632.8nm)と比べ相対誤差が、1次で637.9nm(0.8%)、2次で639.9nm(1.1%)、3次で646.0nm(2.1%)と3次は、かなり大きな誤差が生じた。これは、実距離 X_{0m} が大きくなっていることが要因しており、原因としては、レンズの歪みによる外枠が膨らんでいるように見える糸巻型の歪曲収差が影響していると考えられる。

3.3 単スリットによる回折

単スリット幅(75 μm)を回折光の暗線間隔から求める。



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

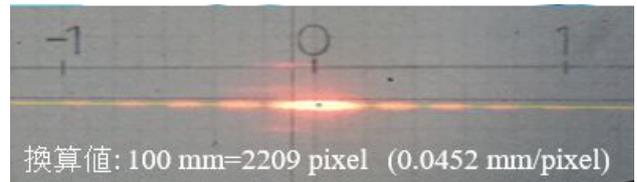
$$\sin \theta_m = \frac{OX_m}{GX_m} = \frac{x_m}{\sqrt{L^2 + x_m^2}} \approx \frac{x_m}{L}$$

$$x_{0m} = \frac{1}{2}(X_m - X_{-m})$$

$$d = \frac{\lambda L}{x_{0m}} \quad (4)$$

表-3 次数ごとの暗線の間隔

次数	$X_m - X_{-m}$ [pixel]	$(X_m - X_{-m})/2$ [mm]
6	2869	64.95
5	2339	52.95
4	1853	41.95
3	1413	32.00
2	939	21.25
1	469.5	10.65



解像度は0.0452mm/pixelであり、スリット幅 d は、(4)式によって算出する。

$$d = \frac{\lambda L}{x_{0m}}$$

$$X_{0m} = 10.67\text{mm}, \lambda = 632.8\text{nm}, L = 1258\text{mm}$$

$$d = 74.6 \pm 0.5 (\mu\text{m})$$

X_{0m} は1次から6次までの暗線の間隔を測定し、横軸 m 、縦軸 X_{0m} をプロットしたグラフの傾きを最小二乗法によって求めた(図-7)。 $X_{0m} = 10.72$ 、 $\lambda = 632.8\text{nm}$ 、 $L = 1258\text{mm}$ を代入すると、スリット幅 $d = 74.3\mu\text{m}$ となり、メーカーの表示値 $75\mu\text{m}$ とほぼ一致する値が得られた。

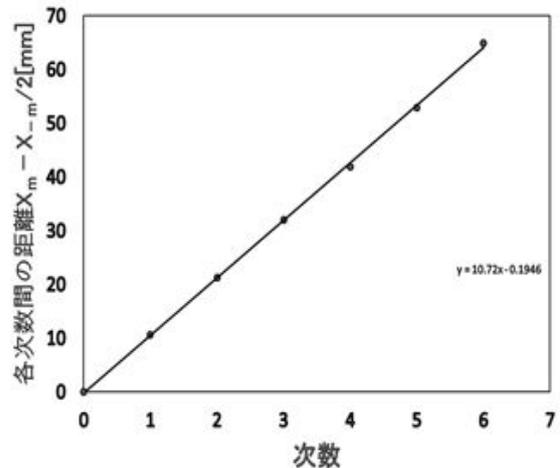
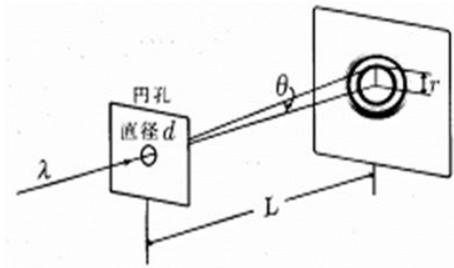


図-7 次数と各次数間の距離の関係

3.4 円孔による回折

円孔からの回折光の広がりを観察し、暗環(線)の直径の測定から、円孔の直径を求める。



$$\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta = \frac{\pi d}{\lambda} \frac{r}{\sqrt{L^2 + r^2}} \approx \frac{\pi dr}{\lambda L} \approx 1.22\pi \quad (5)$$

$$d = \frac{1.22 \cdot \lambda L}{r}$$

($\lambda = 632.8[\text{nm}]$, $L = 1258[\text{mm}]$)

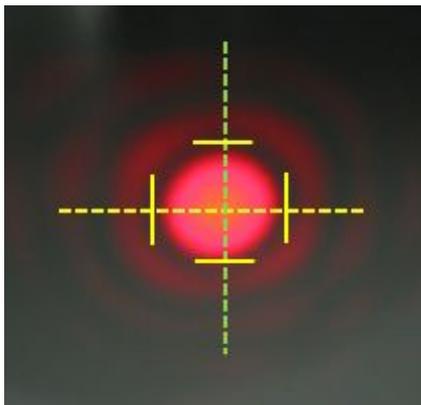


図-8 円孔による回折縞

図 8 に円孔による回折縞の写真、図 9 に水平方向・垂直方向の強度分布のグラフを示す。Φ0.1mm の円孔による回折縞から使用している円孔の直径を求めた。解像度は 0.0323mm/pixel である。

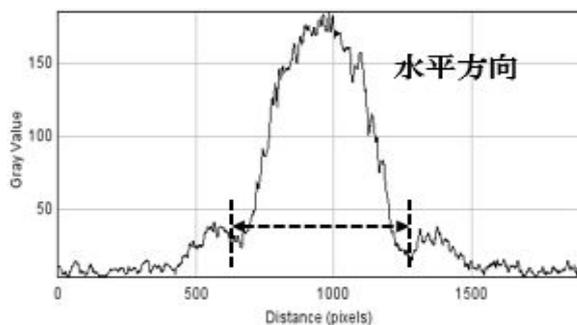


図 9.1 水平方向の強度分布

円孔の直径 d は、(5)式によって算出する。

1次と-1次の暗線直径(水平方向)

水平方向:1260-665pixel (595pixel)

暗輪の直径 $2r=595 \times 0.03241=19.28\text{mm}$

半径 $r=9.64\text{mm}$

円孔直径 $d=0.1007\text{mm}$ (表示値 $d=0.100\text{mm}$)

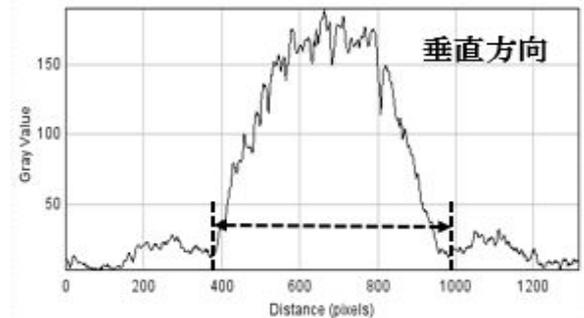


図 9.2 垂直方向の強度分布

1次と-1次の暗線直径(垂直方向)

垂直方向(緑点線):986-387pixel (599pixel)

暗輪の直径 $2r=599 \times 0.03241=19.41\text{mm}$

半径 $r=9.705\text{mm}$

円孔直径 $d=0.1001\text{mm}$ (表示値 $d=0.100\text{mm}$)

r は回折縞の暗輪の半径である。垂直方向と水平方向の暗輪の直径を測定し、円孔の直径をそれぞれ求めた。水平方向の暗輪の直径 $2r$ は $598.5\text{pixel}=19.30\text{mm}$ であるので、円孔の直径は 0.1007mm 。同様にして垂直方向では円孔の直径は 0.1001mm となった。

4. まとめ

本学の2年次物理実験では、レーザー光の干渉・回折実験を1982年35年前に導入した。光の波動性を視覚的に分かりやすく理解できる重要な実験種目となっている。物理実験のレーザー光を担当して、10年目になりますが、専門は機械で物理はどちらかといえば苦手でしたが、研修等を受けて、学生指導を行っている。

物理実験の技術職員担当者の研修として、「レーザー光の干渉と回折」の物理実験のすべて測定を iPod

touch 活用した方法で高精度に測定できた。取得できた画像データおよびグラフもとに実際の指導に活用する。

レーザー光の干渉・回折では、どの測定項目も 1pixel 当たり 0.04mm または 0.18mm 程の精度での測定が行えた。学生実験では 0.5mm 精度の測定であるため、今回提案した方法では十分に高精度な測定が行える環境であった。学生実験では室内が暗い状態でスクリーンに貼り付けた紙に縞の位置を記録するため、測定のしやすさの観点から考えても優位な方法である。しかし、解析を行う際、画像によっては強度分布のグラフでも縞の明暗の境界が判別しづらく、どの部分をピークとすればよいか迷うことがある等の改善点も挙げられる。

物理実験の技術職員担当者の研修として、「レーザー光の回折と干渉」の物理実験のすべての測定を iPod touch 活用した方法で高精度に測定できた。

謝辞

本研修の講師を務めた増田健二氏、芦澤雅人氏、一緒に研修に参加された太田諭之氏、清水ひかる氏、黒川正明氏に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 霜田光一:「レーザーによる光学実験－物差し mm 目盛で光の波長を測定する」物理教育 16-1 (1968) 1-4
- 2) 北原隆:「レーザーの回折実験－対物マイクロメータの目盛線で光の波長を測る」物理教育 29-3 (1981) 233-236
- 3) 静岡大学教養部物理学教室:「物理実験指導書 第 10 訂版」(1982) 103-114
- 4) 静岡大学工学部共通講座物理学教室編:物理学実験-「物理・化学実験」テキスト 学術図書出版(2017) pp.39-51
- 5) 増田健二:技術報告「静岡大学技術部」, 20, 49-54 (2014).
- 6) 鈴木三男, 栗山(増田)健二:物理教育, 65(4), 204-207 (2017).
- 7) ImageJ 公式サイトの日本語訳-ImageJ 日本語情報, <<http://seesaawiki.jp/w/imagej/d/ImageJ>>