

## 工学部改組に伴う物理実験の紹介と2次元レーザー回折の教材開発

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2016-06-08 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 増田, 健二 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.14945/00009502">https://doi.org/10.14945/00009502</a>

# 工学部改組に伴う物理実験の紹介と2次元レーザ回折の教材開発

増田 健二

技術部 プロジェクト・安全支援部門

## 1. はじめに

大学の教養課程での物理学実験の中で光学の占める割合は大きく、光学実験は視覚的で分かりやすく、教育的にも重要な役割を担ってきた。光応用技術の基礎となる古典的な光学の理論および技術である回折や干渉の実験をもとに、光の波動性について理解を深めることが教育的に有効と考えられる。物理学実験の中の回折干渉実験としては、回折格子を分散系とした分光計を用いて、光の波長を測定する実験、やHe-Neレーザなどの平行単色光を用いた回折・干渉の実験<sup>1,2)</sup>が紹介されている。静岡大学（教養部）では、1982年（昭和57年）4月から「レーザ光の回折干渉の実験<sup>3)</sup>」を理・工・農学部の2年次物理学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。物理学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 $\mu\text{m}$ ）、円孔（直径0.1mm）、透過型回折格子（格子定数20 $\mu\text{m}$ ）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。

そこで本研究では、2次元回折実験の教材開発を行う。透過型回折格子を直交させて貼り付けたものを用いた2次元回折実験<sup>4)</sup>が紹介されている。この実験では、回折格子の交差した部分が格子点で干渉をしてX軸・Y軸座標に等間隔の回折縞（点列）を形成する。我々は、2次元回折実験のサンプルとして、スマートホンのタッチパネル（透明電極基板）を使用した<sup>5,6)</sup>。現在は、物理実験にタッチパネルによる2次元回折縞の観察を導入した段階であり、今後は、2次元回折格子による回折縞の座標点を基準にして、タッチパネルの電極により生じる回折縞の間隔の測定からX軸・Y軸の電極間の距離を求める実験への展開を検討している。

## 2. 回折・干渉の原理

### 2.1 回折格子による干渉

等しい幅 $a$ をもつ多数のスリットを等間隔 $d$ で規則正しく並べたものを回折格子 (grating) といい、 $d$ を格子定数という。回折格子に平行光線を入射させると、各スリットによって回折した光が、後方のスクリーン上に明暗の分布をもつ「回折縞」をつくる。回折格子の場合、スリットが多数あるから、干渉の効果が強調されて、明線が鮮明に現れる。

いま、第1図のように、波長 $\lambda$ の入射光を回折格子（スリットの間隔 $d$ 、総数 $N$ 、幅 $a$ ）へ入射したとき、回折格子からの回折光のスクリーン上での「回折縞」の強さ（明るさ）は、

$$I_G = (\text{比例定数}) \left[ \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\frac{\alpha}{2}} \right]^2 \left[ \frac{\sin \left( N \frac{\delta}{2} \right)}{\sin \left( \frac{\delta}{2} \right)} \right]^2 \quad (1)$$

の関係式で与えられる。最初の因子  $\{\sin(\alpha/2)/(\alpha/2)\}^2$  は、個々のスリットによる回折に相当し、 $\alpha$  とスリット幅  $a$  とは、 $\alpha = 2\pi a \sin\theta/\lambda$  の関係である。

2番目の因子  $\{\sin(N\delta/2)/(\delta/2)\}^2$  は、各スリットから送りだされる回折光同士の干渉の効果を表している。回折光の傾き角を  $\theta$  とすると、 $\delta$  は

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta \quad (2)$$

と表わされる。2番目の因子は、 $\delta = 2m\pi$  ( $m$  は整数) のとき、極大になる。これは、隣り合うスリットからの回折光の光路差  $d \sin\theta$  が

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

を満たす  $\theta_m$  方向で回折縞が非常に明るくなることに対応する。これを  $m$  次の主極大という。(3)式より、

$$\lambda_m = \left( \frac{1}{m} d \sin\theta_m \right) \quad (4)$$

と求めることができる。 $I_G$  を  $\sin\theta$  の関数とする概念図は、図2のようになる。

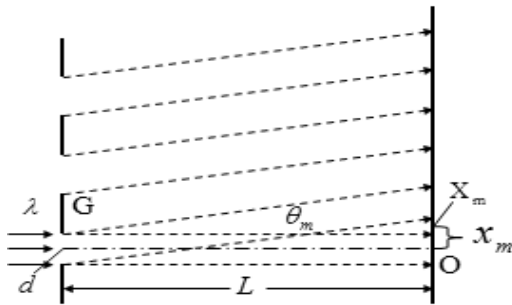


図1 回折格子による回折

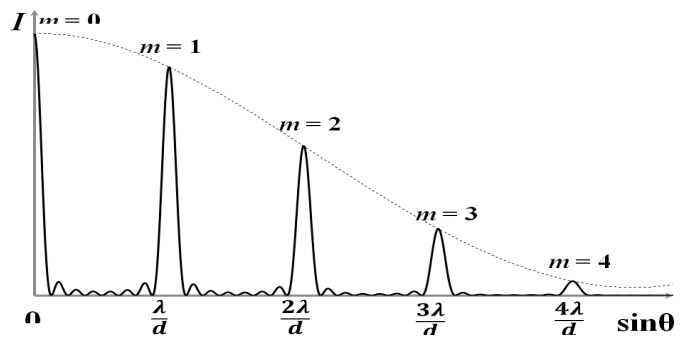


図2 回折格子による回折強度分布

## 2.2 単スリットによる回折

波長  $\lambda$  の平行光線が幅  $d$  のスリットに垂直に入射したとする。かりに、スリットの幅が無限に小さいとすると、波のホイヘンスの原理によって、回折光(要素波)は四方に様に広がる。しかし、スリットの幅が有限の場合は、スリットの各点から出た要素波が互いに干渉し合うことになって、その結果、スリットの後方に回折光の明暗の分布、すなわち「回折縞」をつくる。波長  $\lambda$  の平行光線が幅  $d$  のスリットに垂直に入射したとすると、明暗の分布は式(5)で表される。

$$I = (\text{定数}) \left\{ \frac{\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin\theta\right)}{\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin\theta\right)} \right\}^2 \quad (5)$$

・ 暗線 (光の強さが極小) の条件は、  
 $d \sin\theta = m\lambda$  ( $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ) (6)  
 を満たす  $\theta$  の方向の場合である。

・ 明線 (光の強さが極大) の条件は、  
 $d \sin\theta \cong \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$  ( $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ) (7)  
 を満たす  $\theta$  の方向の場合である。

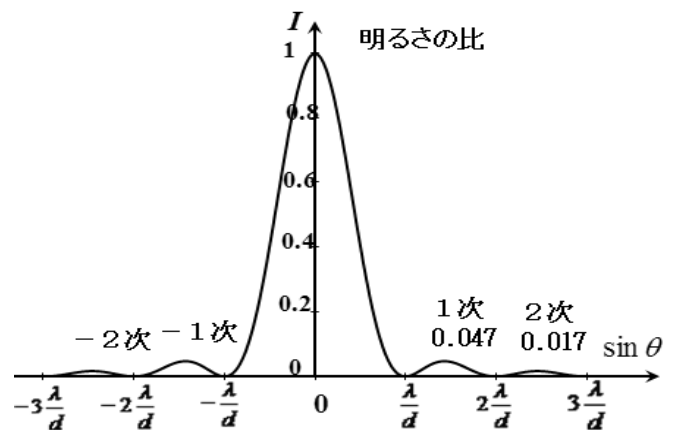


図3 単スリットによる回折強度分布

### 3. レーザ光の回折・干渉実験

本学工学部の2年次物理実験で行っている「レーザ光の回折干渉実験」の測定系を図4に示す。X-Z軸ステージ上に置いたスリット支持台に挟んだ回折物体（単スリット等）に、He-Neレーザ（632.8nm, 1mW）の光を当て、スクリーン板の回折・干渉縞を金尺（0.5mm）を用いて測定する。今回の研究では、He-Neレーザ（1mW）では、輝度不足を生じたため、半導体レーザ（532nm, 40mW）を使用する。

#### 3.1 CCDカメラを用いたレーザ光の回折実験の測定系

図5にレーザ回折投影法による回折実験の測定系の概略図を示す。半導体レーザー（532nm, 40mW）を用い、3mの距離からサンプルに垂直に照射する。サンプルの表面からの回折光を前方のスクリーンに投影して、スクリーンに映し出される回折縞を広角レンズを取り付けたCCDカメラで撮影する。今回は、CCDカメラの総画素数を35万画素（1,360×1,024pixel）に設定して、広角レンズを用い、CCDカメラとスクリーンの距離を固定して撮影する。画角（撮影面積）サイズは、サンプルとスクリーンの距離 $L$ によって規定される。 $L=1.128\text{m}$ の場合、画角サイズは280×211mmとなり、解像度は、0.206mm/pixel（横：280mm/1,360pixel、縦：211mm/1,024pixel）となる。物理実験のサンプルの単スリット（幅75 $\mu\text{m}$ ）と円孔（ $\phi=0.1\text{mm}$ ,  $\phi=0.3\text{mm}$ ）の計測を行う。

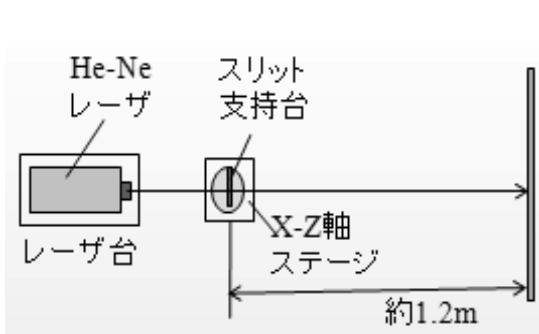


図4 レーザ光の回折・干渉の物理実験の装置

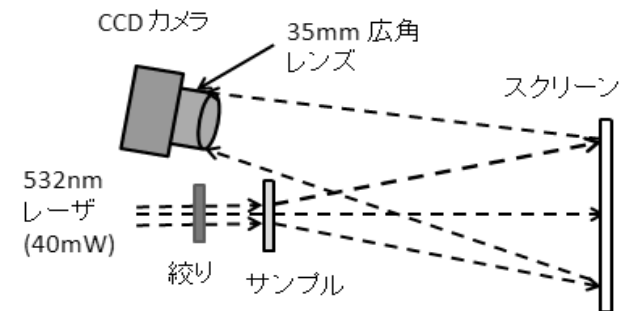


図5 レーザ光の回折投影法の測定系

#### 3.2 単スリットによる回折

単スリットをスリット支持台に挟み、レーザ光を当てると、スクリーン上に図6のような回折縞が現れる。単スリット（幅 $d$ ）からの回折強度分布の暗線の条件式(6)における $\sin\theta$ は、スクリーン上の位置 $x_m$ が物体とスクリーン間の距離 $L$ に比べて十分に小さいとき（ $x_m \ll L$ ）、成り立ち、近似式(8)となる。

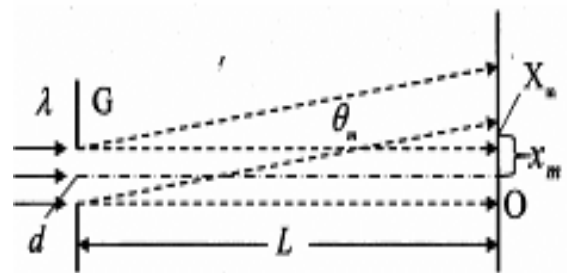


図6 単スリットによる回折

$$\sin \theta_m = \frac{OX_m}{GX_m} = \frac{x_m}{\sqrt{L^2 + x_m^2}} \approx \frac{x_m}{L} \quad (8)$$

細線直径 $d$ （スリット幅 $d$ ）式(6)と式(8)より、

$$d = \frac{m\lambda L}{x_m} \quad (m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (9)$$

単スリット幅を回折縞の暗線の間隔から求める。単スリットに 532nm レーザを当てると、スクリーン上に図 7 のような回折縞が現れる。この回折縞を CCD カメラ (BITRAN BU-51LN) で撮影する。図 7 に画像データ、図 8 に光強度を数値化 (テキストデータ) した中心軸の断面データを示す。0 次の明線を挟んで左右に現れる暗線 (光の強さが極小) 部分  $x_m$  をテキストデータから読み取る。0 次に近い位置から順番に 8 次まで (左はマイナス、右はプラス) 次数の番号を付ける。次数間の暗線の位置  $x_m$  を測り、暗線の間隔  $x_m$  を(10)式より求める。

$$x_m = \frac{1}{2}(X_m - X_{-m}) \quad (10)$$

図 8 の回折強度分布のグラフから次数間 ( $m = \pm 1 \sim 8$ ) の暗線の位置を 0.053mm/pixel の精度で読み取る。(10)式より暗線間隔  $x_m$  の平均値および平均 2 乗誤差は、

$$x_m = 8.070 \pm 0.046(\text{mm})$$

となり、距離  $L=1.128\text{m}$ 、半導体レーザーの波長  $\lambda=532\text{nm}$  を(9)式に代入して単スリットの幅 ( $d = 75\mu\text{m}$ ) を求めると、

$$d = 74.36 \pm 0.43 (\mu\text{m})$$

となり、ほぼ妥当な値となった。

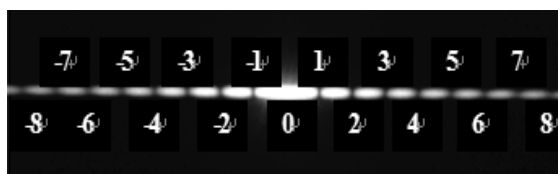


図 7 単スリット(幅 75 $\mu\text{m}$ )による回折縞の暗線の次数

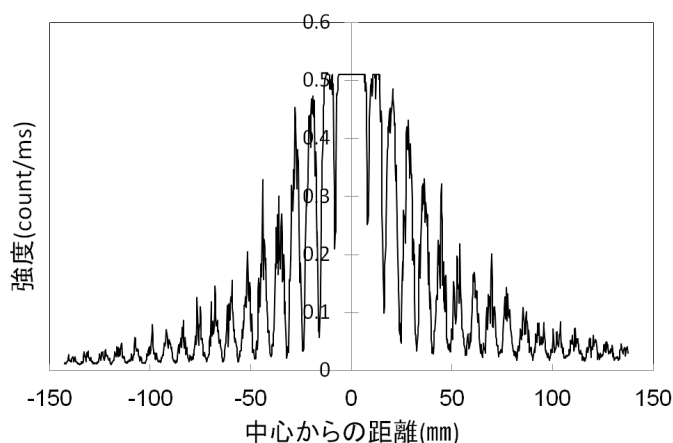


図 8 単スリット(幅 75 $\mu\text{m}$ )による回折強度分布

## 4. 2次元回折実験

### 4.1 顕微鏡による表面形状の測定

図 9 に、顕微鏡による表面の微細形状の測定系を示す。サンプルの背面から Na ランプを用いて、単色 (橙色: 589nm) 平行光線をサンプル表面に垂直に入射させると、表面の凸形物で回折した光が観察できる。微細構造物の撮影には、読み取り顕微鏡筒 (島津理化 NRM-2XZ) の部分を利用する。この顕微鏡筒は、倍率 50 倍、焦点距離 30mm であり、XYZ ステージに取り付け手で焦点を合わせ、微細構造の加工された表面形状を撮影する。今回撮影に使用する CCD カメラ (BITRAN BU-51LN) は、モノクロで受光感度特性 (回折効率) は 500~650nm が高く、画素数は 140 万画素 (1360 $\times$ 1,024pixel) と高解像度である。測定精度は、撮影する面積によって規定される。顕微鏡を使用した場合、画角 (撮影面積) は 2.38 $\times$ 1.79mm となり、1.75 $\mu\text{m}/\text{pixel}$  (横: 2.38mm/1,360pixel、縦: 1.79mm/1,024pixel)となる。

図 10(a)に、透過型回折格子 (20 $\mu\text{m}$  島津理化製) を直交させて貼り付けた 2次元回折格子の写真を示

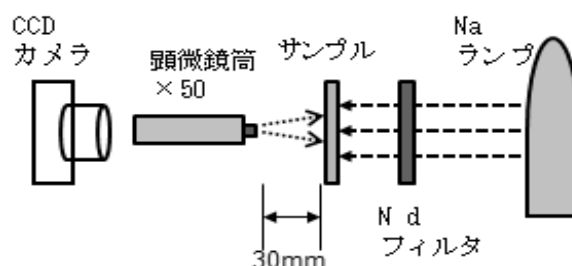


図 9 顕微鏡による表面微細形状の測定系

す。透過型回折格子は、金属被膜エッチング法により帯線が等間隔に並んだ格子構造になっており、直交させた場合を顕微鏡で見ると図 10(b)のように網目模様になっている。

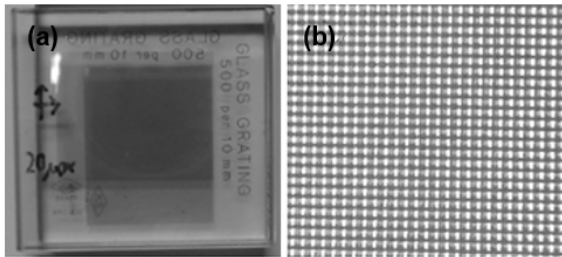


図 10 透過型回折格子(20 $\mu\text{m}$ )と顕微鏡写真

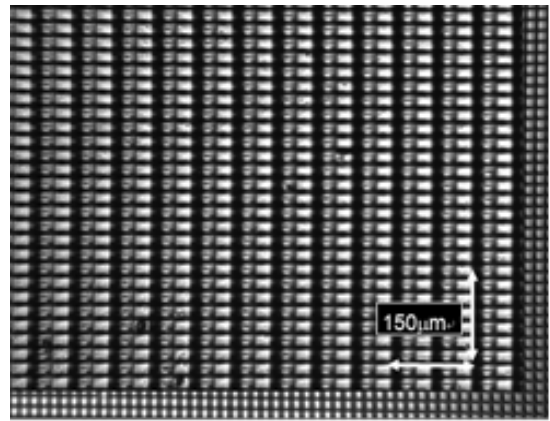


図 11 iPhone-4S のタッチパネルの顕微鏡写真

サンプルとして、iphone 4S の透明電極 (タッチパネル) の顕微鏡写真を図 11 に示す。サイズの指標として、回折格子(格子定数 20 $\mu\text{m}$ )を写真の右と下に添付した。iphone 4S の電極の幅は、縦 75 $\mu\text{m}$  (150 $\mu\text{m}/3$ )、横 21.4 $\mu\text{m}$  (150 $\mu\text{m}/7$ ) 程度であり、等間隔に並んだ長方形 (30 $\times$ 20 $\mu\text{m}$ ) 程度の大きさの (薄膜) 電極が確認できた。

#### 4.2 レーザ回折投影法による回折パターン計測

図 5 にレーザ回折投影法による回路パターンの測定系の概略図を示す。図 12 に 2 次元格子による回折縞の画像を示す。図 10 (b)の顕微鏡と比較してみると、等間隔の帯線の交差した部分が格子点となって、2 次元格子に相当する点列となって回折縞を形成する。

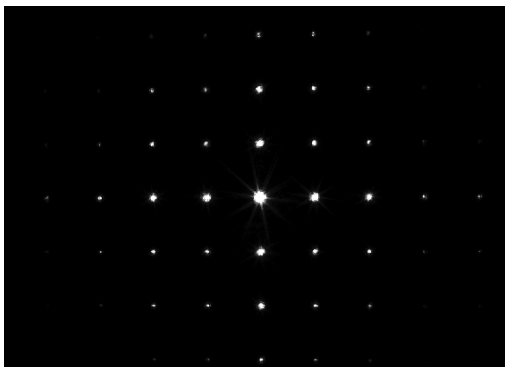


図 12 2次元格子による回折縞

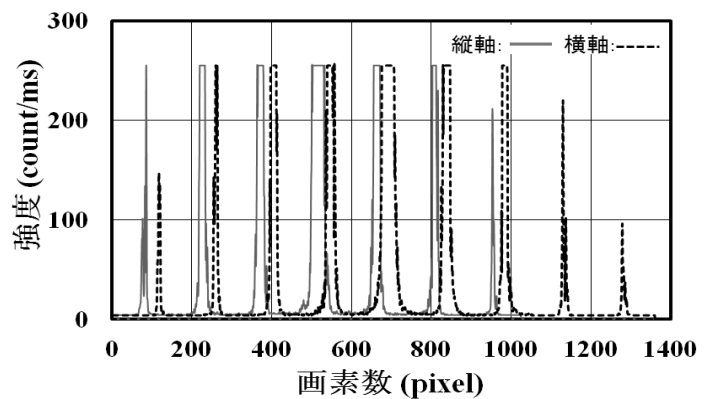


図 13 2次元格回折縞の中心軸強度分布

図 13 より、中心軸の回折縞間隔 (pixel 数) を求めると、縦軸(実線)は 146.0 $\pm$ 0.9pixel であり、横軸(点線)は 145.3 $\pm$ 1.9pixel であった。回折縞の距離  $x$  は解像度(0.206mm/pixel)に pixel 数を掛けて算出する。レーザの波長( $\lambda = 532\text{nm}$ )、 $L$  はサンプルとスクリーン間の距離(1.128m)。(11) 式を用いて、回折格子の距離 (格子定数)  $d$  を算出する。縦軸・横軸とも表示値 20 $\mu\text{m}$  とほぼ一致した。

$$\text{縦軸: } d = \frac{\lambda L}{x} = \frac{532 \times 10^{-9} \times 1.128}{0.206 \times 10^{-3} \times 146.0} = 19.95 \times 10^{-6} [\text{m}], \text{横軸: } d = \frac{\lambda L}{x} = \frac{532 \times 10^{-9} \times 1.128}{0.206 \times 10^{-3} \times 145.3} = 20.05 \times 10^{-6} [\text{m}]$$

図 14 に iphone 4S の回折縞の画像を示す。図 11 の顕微鏡画像と比較した場合、回折では、縦・横が逆になって回折縞を形成するため、顕微鏡画像を 90 $^\circ$ 回転させて比較する。電極部分が回折縞 (輝

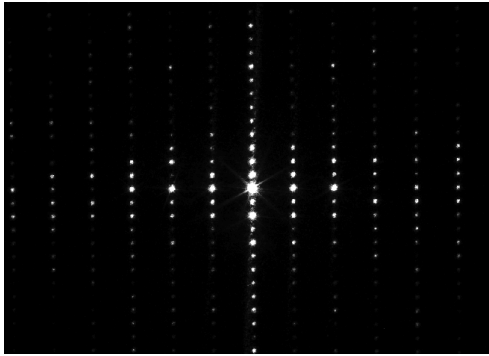


図 14 iPhone-4S による回折縞

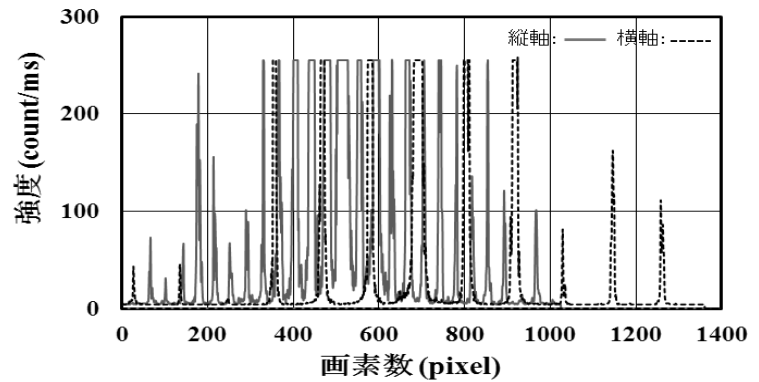


図 15 iPhone-4S の中心軸強度分布

点)として構成され、光強度が大きいことが分かる。図 15 に縦と横の中心軸の強度分布グラフを示す。図 14 の回折縞の縦軸が実線、横軸が点線である。図 15 より、縦軸 (実線) は  $38.7 \pm 0.5 \text{ pixel}$  であり、横軸 (点線) は  $135.5 \pm 1.2 \text{ pixel}$  であった。回折縞の間隔を pixel 数から求め、(9)式をもとに電極間の距離を算出する。 $\lambda$  はレーザーの波長 (532nm)、 $L$  はサンプルとスクリーン間の距離 (1.128m)。 $x$  は解像度 ( $0.206 \text{ mm/pixel}$ ) に pixel 数を掛けて求める。電極間の距離  $d$  を算出する。

$$\text{縦軸} : d = \frac{\lambda L}{x} = \frac{532 \times 10^{-9} \times 1.128}{0.206 \times 10^{-3} \times 38.7} = 75.3 \times 10^{-6} [\text{m}], \text{横軸} : d = \frac{\lambda L}{x} = \frac{532 \times 10^{-9} \times 1.128}{0.206 \times 10^{-3} \times 135.5} = 21.5 \times 10^{-6} [\text{m}]$$

顕微鏡画像 (図 11) の格子定数から電極間の距離  $d$  を求めると縦が  $75 \mu\text{m}$ 、横が  $21.4 \mu\text{m}$  程度となった。回折縞の間隔  $x$  から電極間の距離  $d$  を求めた結果は、縦軸が  $d = (75.3 \pm 1.0) \times 10^{-6} [\text{m}]$ 、横軸が  $d = (21.5 \pm 0.2) \times 10^{-6} [\text{m}]$  となり、顕微鏡画像の値と誤差の範囲内で一致した。

## 5. まとめ

本学の 2 年次物理実験では、レーザー光の回折実験を 1982 年 33 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。当初から行っている回折格子 (対物マイクロメータ) や複スリット (ロンキー・ルーリング) を用いて He-Ne レーザの波長 (632.8nm) を測定する実験に加えて、単スリット、円孔の径を測定する実験を行っている。今回取り入れたサンプル (2 次元回折格子・タッチパネル) は、2 次元回折縞 (図 12, 図 14) で測定でき、図 10(b), 図 11 のように遊尺顕微鏡で観察できることから、顕微鏡測定とレーザー回折測定を相互に行うことができる。このことから、物体の縦横が逆に回折することや回折縞の大きさは物体の大きさに反比例することなど、回折現象を理解する上で教育的にも有効であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 霜田光一 : 「レーザーによる光学実験－物差しの 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) 大阪市立大学理学部物理学科 : 「物理学実験 第 3 版」 東京教学社 (2000) 105-111
- 5) 増田健二, 寺尾健, 白杵深, 三浦憲二郎 : 精密工学会春季学術講演会講演論文集 C67 DVD (2015.3.17-19)
- 6) 増田健二 : 第 32 回 (2015 年) 日本物理教育学会年会講演論文集 101 (2015.8.8-9, 九州大学)