

# 複スリットによる干渉光強度の測定

松井 明・宮嶋昭広\*・桃井凡夫

## Measurement of Irradiance Distribution for a Double-Slit

Akira MATSUI, Akihiro MIYAZIMA\* and Tsuneo MOMOI

(Received September 1, 2001)

Using the CdS detector in bridge circuit, we can obtain the irradiance distribution for a double-slit. The developed apparatus will become a very useful method for learning of light interference using two slits.

**Key words :** physics education, optical, CdS detector, irradiance distribution, a double-slit

### 1 はじめに

複スリットによる干渉光強度の測定は、これまでも数々の装置を用いてなされてきた<sup>1)2)3)</sup>。本研究は干渉光の強度測定に、光センサの一種であるCdSセルをブリッジ回路に組み込むことにより、回路素子の数を少なくして試作を容易にした。以下に示すように、簡素化された電気回路にも関わらず、測定精度は良好であった。

### 2 実験の方法

レーザー光源を用いれば、光の回折・干渉の現象を容易に観察することができる。レーザー光が、きわめて細かいスリット幅をもった単スリットに当たると、スクリーン上に回折光が現れる。これは、スリットの形とはかけはなれた明暗の縞模様で、Fraunhofer回折と呼ばれるものである。

単スリットによる $\theta$ 方向に回折する回折光の光の強度 $I$ については、振幅の2乗に比例した値として、スリット幅 $a$ 、波長 $\lambda$ 、振幅 $E$ とすれば、次の数式によって表される。

$$I = |E|^2 \propto \left(\frac{\sin \beta}{\beta}\right)^2 \quad (1)$$

$$\text{ただし, } \beta = \frac{ka}{\lambda} \cdot \sin \theta, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2)$$

単スリットによる回折光の相対的強度分布曲線は、図1のようになる。第1次主極大は中央部の主極大よりずっと小さく、理論的には、中央部の主極大の光の強度を1とすれば、第1次主極大の強度は0.047、また、第2次主極大の強度は0.019となる<sup>2)3)</sup>。

\* 八代市立日奈久小学校

また、平行に並んだ2本のスリット（複スリット）による干渉光の光の強度  $I$  については、2つのスリットの間隔  $d$ 、スリット相互間の位相差  $\delta$ 、 $\gamma = \delta / 2$  とすれば、次の数式で表される。

$$I = |E|^2 \propto \left(\frac{\sin \beta}{\beta}\right)^2 \cdot \cos^2 \gamma \quad (3)$$

$$\text{ただし、} \delta = (2\pi/\lambda)d \cdot \sin \theta, \quad (4)$$

(3)式において、 $\cos^2 \gamma$  は無限に細い2本のスリットによる干渉を表し、回折光の相対的強度分布曲線は、図2に相当する。また、 $\sin^2 \beta / \beta^2$  は、有限幅  $a$  をもつ1本のスリットからの回折強度を表す(1)式に相当する。図3は、それらを合成した(3)式の強度分布曲線となる。これらの式からもわかるように、1本のスリットによる回折光の中に2本のスリットによる干渉光が見られる。つまり、複スリットによる干渉光は、これらの2つの効果が相乗し合っているといえる(2)3)。

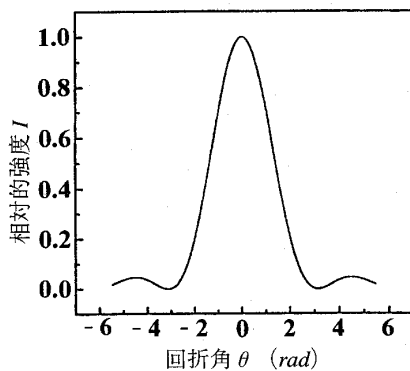


図1 単スリットの回折光の強度分布

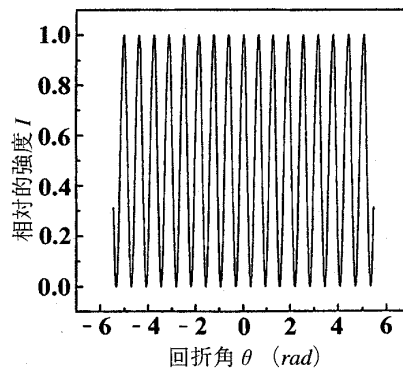


図2 複スリットの回折光の強度分布

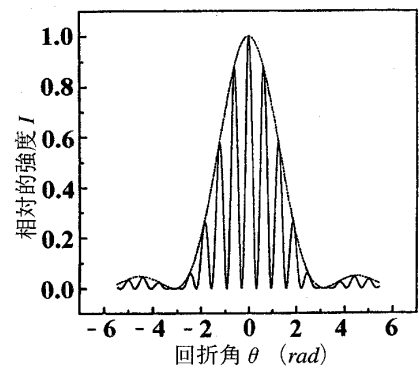


図3 複スリットの干渉光の強度分布

実験においては、スクリーン上に写し出される一つひとつの干渉光をエネルギーをもった光の粒子の集まりと見なし、光センサの一種であるCdSセルを用いて、光電効果の現象を利用することによって電圧の大きさとして測定した。そして、得られた結果を理論式による干渉光の相対的強度分布曲線と比較することで検証を行った。

## 2-1 実験装置

### (1) CdS セル

光エネルギーを電気エネルギーに換える装置として用いたCdSセルは、表面に入射光が与えられると、光電効果の結果、照射エネルギーによって物質の伝導性がよくなる光導電効果を示す。入射光エネルギーが大きいほど、その抵抗値が低くなるしくみになっており、CdSセルに入射した光の粒子の量が多くなるほど、大きな電圧の値となる。いわばCdSセルは、一種の可変抵抗であるといえる<sup>4)</sup>。

実験で用いた回路は図4のようなもので、いわゆる Wheatstone bridge と呼ばれる回路である。CdSセルをブリッジの一辺に接続し、CdSセルに光を照射する前に別の一辺に接続した可変抵抗器によって平衡をとる。光を照射するとCdSセルの抵抗が変化し、ブリッジが不平衡となり中心の抵抗に電流が流れ、電圧として取り出せるしくみになっている<sup>4)5)</sup>。ただし、実際に干渉光の

電圧測定に用いた装置は、CdS セルの部分を基盤回路より切り離し、自由に動かせるようにした。

## (2)スリット及び光源

実験で使うスリットを図5のような方法で作成した。実際の大きさの30倍の原版を広用紙で作成し、それをカメラで撮影し、36mm幅の白黒ネガフィルムをスリットとして使用する。フィルムは、スライド用マウントにセットして使用する。スリット作成においては、白黒ネガフィルムとしてミニコピーフィルムを使用した。また、本実験では、光源としてHe-Neレーザー光源を使用した<sup>6)</sup>。

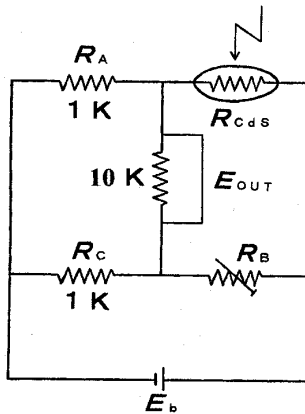


図4 実験装置の回路図

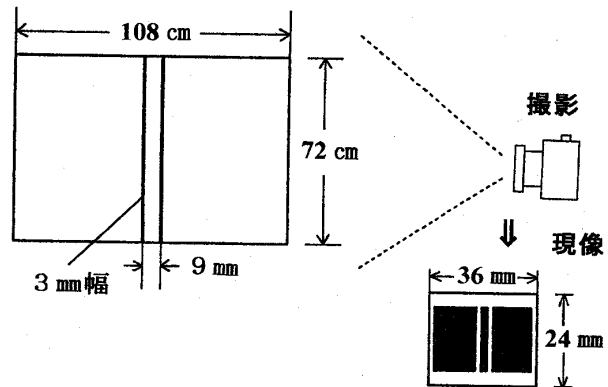


図5 スリットの作り方

## 2-2 測定の方法

### (1)CdS セルの特性

測定を行うにあたって、CdS セルの特性を調べるのは、必要不可欠なことである。そこで、光の強さと内部抵抗がどのような関係になっているのかを調べる実験を行った。光の強さが変化すると内部抵抗、出力電圧がどのように変化するかを調べるために、光学用電球を用いて、照度と抵抗、照度と出力電圧の関係を調べた<sup>4)</sup>。

光学用電球をスクリーンから一定の距離はなしたときの照度をまず照度計で測定し、次に同じ場所に照度計のかわりにCdSセルを置いて出力電圧を測定した。同じような方法で光学用電球をスクリーンから10cm間隔で離したり、近づけたりしながら、照度と出力電圧の測定を行った。内部抵抗および出力電圧  $E_{out}$  については、(5)式をもとに計算で出すことができる。

$$E_{out} = \left( \frac{R_A}{R_{CdS} + R_A} - \frac{R_C}{R_B + R_C} \right) E_b \quad (5)$$

また、電圧の測定には、デジタル表示の電圧計を使用した。

### (2)単スリットによる回折光の光の強度測定

単スリットによる回折光の輪郭を、スクリーン上に貼り付けたグラフ用紙上に写し取る。次に、CdSセルを用いて、一つひとつの回折光の光エネルギーを電圧として測定した。このとき、単スリットによる回折光は幅が広いため、CdSセルにマスクを付け、一つの回折光をある決まったマスクの幅に細分化して電圧を測定した。これは、回折角  $\theta$  の変化による回折光の光の強度分布をより微分した形で求めていくためである。また、回折角  $\theta$  の変化によって強度が極大になる主極

大の部分の相対的強度は、(3)式をもとに決まった値となるため<sup>2)</sup>、それぞれの主極大の出力電圧の相対的な値を理論値と比較することが、検証のひとつの目安となる。

マスクとは、金属製でCdSセルの表面に自由に取り付けられるようにしたものである。マスクには、中心部分にある決まった幅の穴があいており、その幅の部分のみ光がCdSセルに入射し、その幅における光のエネルギーが電圧として取り出せるようになっている。マスクについては今回、0.5mm, 1mm, 1.5mm, 2mm, 3mm, 4mm, 幅を自由に換えられるものの7種類を製作し、干渉光の大きさや実験の用途にあわせて利用した。単スリットによる回折光の電圧測定では通常2mm, または、4mmのマスクを使用した。単スリットの実験においては、A (スリット幅  $a = 1.266 \times 10^{-4}$  [m], 市販製), B ( $a = 1.091 \times 10^{-4}$  [m], 複スリットの片方をアルミ薄で遮光したもの, 市販製), C ( $a = 0.633 \times 10^{-4}$  [m], 自作) の3種類のスリットを使用した。

### (3)複スリットによる干渉光の光の強度測定

単スリットの場合と同じように、まずグラフ用紙上に干渉光を写し出し、その像の輪郭を記録する。次に、CdSセルを用いて、一つひとつの干渉光の光エネルギーを電圧として測定した。この実験に使用するマスクは、干渉光の大きさに一致したものを付けるように工夫した。複数の干渉光が受光されるのを防ぐためであり、一つの干渉光のみの電圧をより正確に測定するためである。このため、マスクは、円形やだ円形のものを製作し、干渉光の大きさや形に合うものを使用した。

実験においては、D (単スリットBを遮光しないもの  $a = 1.091 \times 10^{-4}$  [m],  $d = 3.955 \times 10^{-4}$  [m]), E ( $a = 1.091 \times 10^{-4}$  [m],  $d = 2.037 \times 10^{-4}$  [m]) の2種類の複スリットを使用した。

## 3 結果と考察

光学用電球を用いて、照度と出力電圧を測定した結果を両対数グラフに表したのが図6である。照度が大きくなるとCdSセルの内部抵抗が小さくなり、それに対応して出力電圧が大きくなっていることがわかる。しかし、300lux付近で特性に変化が見られる。300lux以上の光を照射させると、入射光量に対してCdSセルが、敏感に反応できないことを示している。

照度計を用いた測定では、10luxまでの照度値しか測定できなかった。しかし、He-Neレーザー

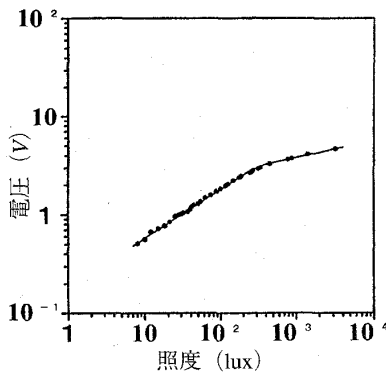


図6 照度対出力電圧特性

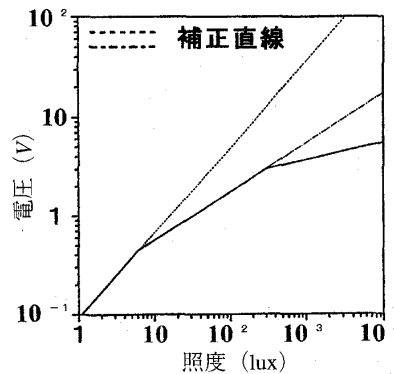


図7 照度対出力電圧特性の補正直線

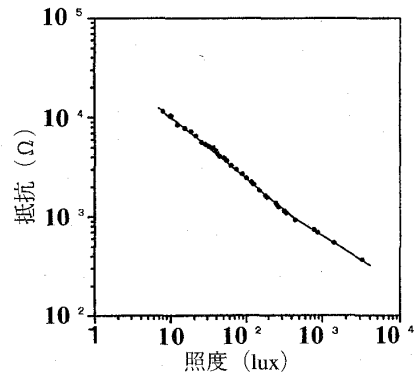


図8 照度対抵抗特性

光とマスクを用いて、きわめて小さい幅にした単スリットにおける回折光の電圧測定を行うことにより、10lux 以下の照度と出力電圧の関係を求めることができた。それが図7である。この結果から、CdS セルの照度対出力電圧特性は、6lux まで、6 ~ 300 ルクス、300 ルクス以上の3つの範囲で特性に違いが見られた。つまり、CdS セルは、低照度側ほど入射光量に対して敏感に反応するのである。

CdS セルの照度対抵抗特性については、照度対出力電圧特性から、(5)式を用いて、計算によって算出し、同じように両対数グラフを用いて表してみると図8のような結果を得た。これより、照度が大きくなると抵抗値が低下していることがわかる。

単スリット A, B における回折光の回折角  $\theta$  と出力電圧の関係を示したのが図9, 10 である。ただし、照度が6lux までの範囲と6 ~ 300lux の範囲では照度対出力電圧特性が異なるため、実験によって得られた出力電圧値を一部補正しなければならない。そこで、図7における補正直線をもとに、実験の結果得られた6 ~ 300lux の範囲の電圧の値を6lux までの範囲の値に補正する必要がある。このような補正をした値をもとに得られた回折角  $\theta$  - 出力電圧曲線 (図9, 10) と、理論式から得られた回折光の光の強度分布曲線 (図1) を比較してみると、よく一致することがわかる。

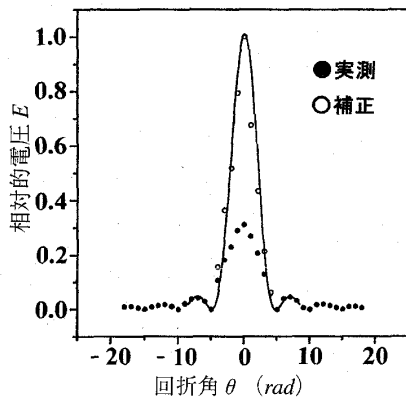


図9 単スリットAの $\theta$ と電圧の関係

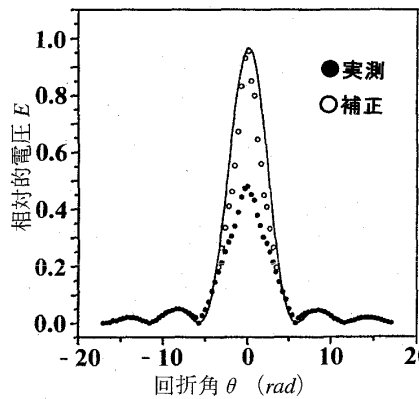


図10 単スリットBの $\theta$ と電圧の関係

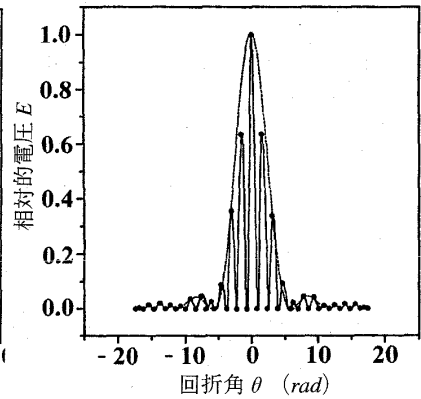


図11 複スリットDの $\theta$ と電圧の関係

また、回折光の主極大における電圧を測定し、中央の主極大の電圧を1として、それぞれの主極大の相対的電圧を算出してみると、表1のようになり、(1)式から得られる理論値とよく一致することがわかる。

表1 単スリットにおける主極大の相対的電圧

スリット	中央部の主極大	第1次主極大		第2次主極大	
		-方向	+方向	-方向	+方向
スリットA	1	0.042	0.046	0.018	0.019
B	1	0.050	0.047	0.020	0.020
C	1	0.041	0.041	0.015	0.015

このことから、単スリットにおける回折光の強度が、出力電圧によって表せることを示しているといえる。スリットCが理論値とよく近似しないのは、中央の主極大の中心部分に比較的大きな光のかたまりが見られ、そのため、中央部の出力電圧が高くなることに起因していると考え

られる。これは、スリット幅が小さく、レーザー光の回折が十分に行われていないことを示しており、とくに自作のスリットを用いた場合、この現象が多く見られた。

複スリット D における干渉光の回折角  $\theta$  と出力電圧の関係を示したのが図 11 である。この場合も単スリットの場合と同じように、CdS セルの照度対出力電圧特性 (図 7) をもとに、実験によって得られた電圧値を一部補正して描いたものである。得られた図 11 に単スリット B における回折光の強度分布曲線 (図 9) を重ね合わせてみると、よく一致することがわかる。

また、複スリットにおける干渉光の単スリットの主極大に相当する部分の電圧を取り出し、中央の主極大の電圧を 1 とし、それぞれの主極大の相対的電圧を比較してみると、表 2 のようになる。

表 2 複スリットにおける主極大の相対的電圧

スリット	中央部の主極大	第 1 次主極大		第 2 次主極大	
		-方向	+方向	-方向	+方向
スリット D	1	0.047	0.047	0.016	0.018
E	1	0.046	0.046	0.021	0.021

この結果からも、複スリットにおける干渉光の強度が、出力電圧によって表せることを示しているといえる。

以上の結果から、干渉光の光の強度は、波動性という立場から、振幅の 2 乗に比例した値として算出されるだけでなく、光をエネルギーを持った一つひとつの粒子の集まりという粒子性の考えから説明していけることを示しているといえることができる。

最後に、出力電圧の補正に用いた CdS セルの特性を表す図 7 については、実験に用いた He-Ne レーザー光源ではなく、光学用電球を用いて測定したものである。この結果をレーザー光を用いた実験の補正に使用できるかということについては、光電効果の特性である「金属面にたいして、光電効果のおこり得る最小の光の振動数が存在している」ということから、光学用電球から出た光とレーザー光の振動数がこの最小の振動数以上であると考えれば何ら問題はないと考えてよい。

#### 4 ま と め

複スリットによる干渉光の光の強度を、CdS セルを用いた簡便な実験装置を試作することにより、電圧の大きさとして測定することができた。特にブリッジ回路を組むことにより、出力電圧をアンプなしに取り出せることやマスクを付けることで、一つひとつの干渉光強度をより正確に測定することができた。そのため、物理学実験などに活用していける測定精度が得られたのではないかと考える。

#### 文 献

- 1) 井田幸次郎：粒子性・波動性，裳華房，1976.
- 2) 松村温：光学，朝倉書店，1990.

- 3) Rossi：光学（上・下），福田国也・中井祥夫・加藤利三訳，吉岡書店，1967.
- 4) 谷腰欣司：光センサとその使い方，日刊工業新聞社，1994.
- 5) 松平維石：レーザーの基礎と実験，共立出版，1976.
- 6) G. Wright：レーザーを使った基礎実験，増子寛訳，共立出版，1979.
- 7) 小暮陽三：物理のしくみ，日本実業出版，1993.
- 8) 小出昭一郎：量子力学のはなし，東京図書，1983.