

I-P1 光学実験 II

-单スリットによる光の回折・干渉-

学籍番号 : s0319007

氏名: 上野智也

共同実験者 : 伊藤龍平

伊藤優希

水島悠人

小野寺春海

実験実施日 : 2021/4/28,5/6

レポート提出日: 2021/5/12

1 目的

単スリットを通過するレーザー光の干渉縞を観察し、スリット幅を求める。N本のスリットによる「光の干渉モデル」について理解し、干渉縞の強度を与える式を導く。

2 原理

空間を進む波の中で、もっとも一般的なのが平面波や球面波である。回折とは、空間を進む波が小さな穴を通過した後や、小さな障害物にぶつかった後に、その先で広がって進む現象である。では、回折は起こるのか？

波面上の各点が仮想の光源として二次元的な微小球面波を放出し、その足し合わせによって次の波面が形成されるというホイヘンスの原理を用いると、光の直進、反射等の光学現象を説明できる。図1に波の進行のイメージを示す。波の先端の各点では、その点を中心とした半球状の新たな波が発生している。波の進行方向に障害物が無ければ、次の瞬間藻奈美は一列にそろって進む。では、波の進行方向に壁があり、小さな隙間が空いている場合は、どうだろう。もし、穴や隙間の間隔が広ければ、波はほとんど回折を起こさずそのまま通り抜ける。隙間の間隔が狭い場合、波は回折を起こして広がる。右図のように各点で発生した扇状の波が残る。これによって、波が広がっていく。

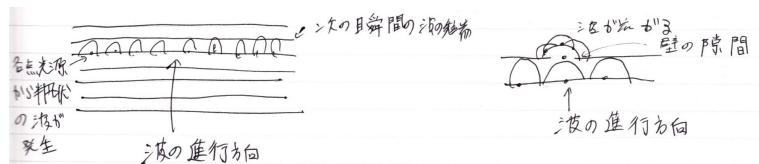


図1 障害物がない場合（左）と壁に穴が開いている場合（右）の波の進行のイメージ

単スリットを光が通過するとき、スリットの幅が波長に対して十分大きければ光は回折を起こさずに直進。スリットの幅が光源の波長に近くなると、図2に示すように、光源とスリットの位置、あるいは、スリットと回折像を結像させるスクリーンの位置関係によって光の回折や干渉が生じる。スリット-スクリーン間の距離が充分離れている場合、入射光を平行光とみなせるな回折が生じる。これを、これを、フラウンホーファー回折という。しかし、たがいに近い距離では、光の回折だけでなく干渉もおこっており、平面はと近似することができない。これをフレネル回折という。

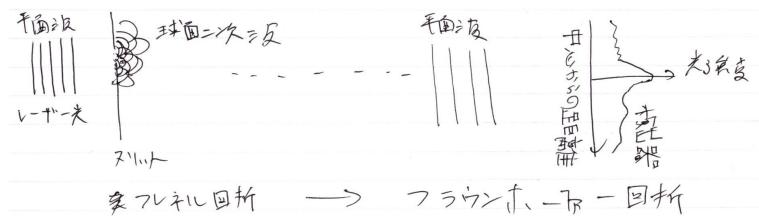


図2 フラウンホーファー回折ができるプロセス

3 実験方法

(1) 各自用意するもの

- 実験ノート
- 筆記用具
- 関数電卓
- パソコン（表計算ソフトが入っているもの）

(2) 実験室に用意してあるもの

- ゴーグル（各自 1 個）
- 実験機器、光学部品

(3) 実験の準備

① レーザーの立ち上げ

レーザーの電源を入れてレーザー光を発振させる。発振した直後は安定していないので、使用する 30 分前位に電源を入れておく。安全のため、紙などを使ってレーザー光をさえぎっておく。レーザーの波長は 670nm

② 検出器の立ち上げ

検出器（受光器、デジタルマルチメーター）の電源を入れる。あらかじめ自然光が当たっている時のデジタルマルチメーターの値を誤解測り、その平均値を出しておく。（バックグラウンドを差し引くため）

③ 光学機器の操作の確認

実験前に、光学系に使用光学部品について、その役割と操作方法を理解しておく。

④ 光学系の組み立て

図 3 の光学系概略図を参考に光学系を組み立てる。

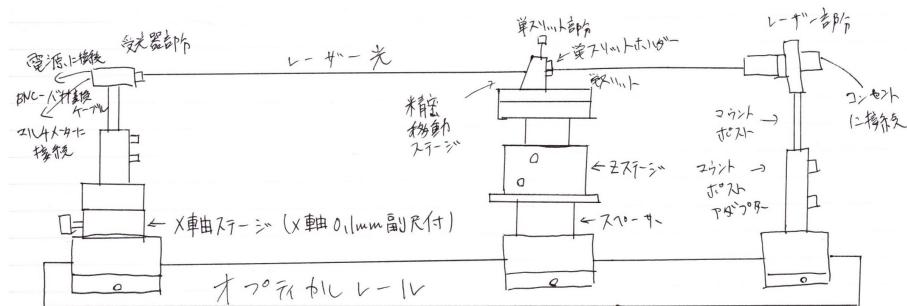


図 3 単スリットによる光の回折を観察するための光学系概略図

⑤光軸調整

あらかじめ単スリットおよびその周辺部分はレールから外しておく。レーザー光を照射したときに、受光器届く光量が最大になるように受光器の位置を調整する。調整後、受光器の位置と、そのときの電圧を読み取り、記録。

⑥単スリット位置の調整

光軸調整後、受光器と光源の間に単スリットを置き、光学系を完成させる。レーザー光が単スリットを通過し、受光器に届く光量が最大になるように、単スリットの位置を調整する。光量が最大になった時の電圧を読み取り、記録する。

⑦受光器の稼働と光量の変化の観察

受光器を 0.1mm ずつ動かして、光量の変化を観察する。受光器の位置とデジタルマルチメータの読みをノートに記録する。USB 接続デジタル顕微鏡を使って受光器の位置を示すメモリを拡大し、読み取る。

⑧単スリット位置の確認

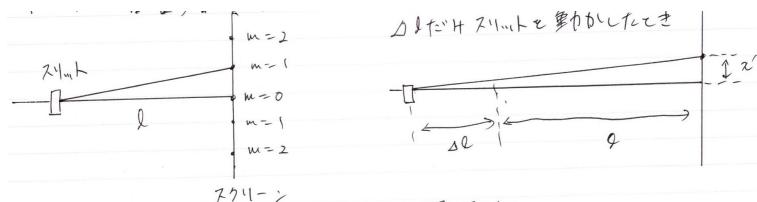


図 4 単スリット-スクリーン間の距離

⑦が終わったら、今の単スリット位置にテープで印をつける。単スリットの位置を動かして、再び、⑦の実験を行う。

移動後の単スリットの位置にも印をつける。最後に、単スリットの移動距離 Δl を物差しで測る。

(受光器-単スリット間距離の導出方法)

図 4 に示すように、干渉スポットの位置（光量が極大値 $l + \Delta l$ を示す位置）と単スリットの移動距離の関係式

$$\frac{x}{l} = \frac{x'}{l + \Delta l} \quad (1)$$

を用いて、受光器から単スリットまでの距離 $l, l + \Delta l$ を求める。

まず、結果のピーク 1,2 の位置の差の絶対値から x と x' を求める。

$$x = |(\text{初めのスリット位置のピーク 1 の位置}) - (\text{初めのスリット位置のピーク 2 の位置})|$$

$$= 11.22\text{mm}$$

$$x' = |(\text{ずらしたスリット位置のピーク 1 の位置}) - (\text{ずらしたスリット位置のピーク 2 の位置})|$$

$$= 13.10\text{mm}$$

(1) 式の両辺に $l(l + \Delta l)$ をかけると、 $x(l + \Delta l) = x'l$ となり、

これを l について解くと $l = \frac{\frac{x}{x'}}{1 - \frac{x}{x'}} \Delta l$ となる。 $\Delta l = 39.5\text{mm}$, $\frac{x}{x'} = 0.8489\text{mm}$ より

$l = 22.19\text{cm}$ となり l が求まる。

4 結果の整理

(1) 表の作成

下表は初めの単スリット位置で測ったデータである。

受光器の位置 (mm)	マルチメータの値 (mV)
-19.4	14.693
-19.2	13.853
-19	13.675
-18.8	13.49
-18.6	13.216
-18.4	12.981
-18.2	12.91
-18	12.683
-17.8	12.549
-17.6	12.251
-17.4	12.037
-17.2	11.941
-17	11.781
-16.8	11.697
-16.6	11.591
-16.4	11.509
-16.2	11.538
-16	11.462
-15.8	11.379
-15.6	11.5
-15.4	11.569
-15.2	11.833
-15	11.921

受光器の位置 (mm)	マルチメータの値 (mV)
-14.8	11.976
-14.6	12.161
-14.4	12.248
-14.2	12.686
-14	12.256
-13.8	12.755
-13.6	13.085
-13.4	13.663
-13.2	13.779
-13	14.361
-12.8	14.611
-12.6	14.859
-12.4	14.989
-12.2	15.29
-12	15.507
-11.8	15.829
-11.6	15.784
-11.4	15.97
-11.2	15.907
-11	15.818
-10.8	15.658
-10.6	15.396
-10.4	15.003
-10.2	14.592
-10	13.905

表 1 受光器の位置とマルチメーターの値

受光器の位置 (mm)	マルチメータの値 (mV)
-9.8	13.999
-9.6	13.695
-9.4	13.438
-9.2	12.178
-9	11.909
-8.8	11.649
-8.6	11.491
-8.4	11.322
-8.2	11.121
-8	11.711
-7.8	11.999
-7.6	12.76
-7.4	13.764
-7.2	14.941
-7	15.914
-6.8	17.984
-6.6	19.643
-6.4	22.221
-6.2	25.652
-6	27.08
-5.8	30.555
-5.6	33.055
-5.4	36.379
-5.2	40.182
-5	43.782

受光器の位置 (mm)	マルチメータの値 (mV)
-4.8	48.027
-4.6	50.954
-4.4	53.69
-4.2	58.209
-4	63.02
-3.8	66.108
-3.6	73.578
-3.4	76.404
-3.2	84.437
-3	87.167
-2.8	90.162
-2.6	93.046
-2.4	97.239
-2.2	102.781
-2	105.619
-1.8	109.99
-1.6	112.549
-1.4	114.727
-1.2	115.609
-1	121.326
-0.8	119.794
-0.6	119.309
-0.4	120.021
-0.2	121.825
0	122.494

表1 受光器の位置とマルチメーターの値

受光器の位置 (mm)	マルチメータの値 (mV)
0.2	123.133
0.4	120.502
0.6	119.212
0.8	118.599
1	113.419
1.2	110.954
1.4	109.402
1.6	107.241
1.8	104.676
2	101.382
2.2	98.56
2.4	91.187
2.6	87.689
2.8	81.751
3	76.09
3.2	72.718
3.4	69.299
3.6	65.126
3.8	59.523
4	54.384
4.2	51.981
4.4	46.896
4.6	43.391
4.8	38.537
5	34.664

受光器の位置 (mm)	マルチメータの値 (mV)
5.2	31.248
5.4	28.248
5.6	24.133
5.8	21.343
6	18.82
6.2	16.694
6.4	14.063
6.6	11.717
6.8	10.036
7	8.581
7.2	7.772
7.4	6.834
7.6	6.156
7.8	5.66
8	5.14
8.2	4.976
8.4	4.983
8.6	5.045
8.8	5.286
9	5.618
9.2	5.988
9.4	6.248
9.6	6.537
9.8	6.991
10	7.302

表1 受光器の位置とマルチメーターの値

受光器の位置 (mm)	マルチメータの値 (mV)
10.2	7.972
10.4	8.229
10.6	8.625
10.8	8.88
11	9.129
11.2	9.462
11.4	9.555
11.6	9.763
11.8	9.902
12	9.651
12.2	9.546
12.4	9.374
12.6	9.234
12.8	8.999
13	8.642
13.2	8.351
13.4	8.051
13.6	7.731
13.8	7.463
14	7.006
14.2	6.803
14.4	6.688
14.6	6.413
14.8	6.167
15	5.933

受光器の位置 (mm)	マルチメータの値 (mV)
15.2	5.844
15.4	5.601
15.6	5.409
15.8	5.178
16	5.083
16.2	4.957
16.4	4.926
16.6	4.816
16.8	4.779
17	4.839
17.2	4.887
17.4	4.946
17.6	4.953
17.8	5.112
18	5.224
18.2	5.345
18.4	5.356
18.6	5.509
18.8	5.673
19	5.8
19.2	5.915
19.4	5.986

表1 初めの単スリット位置の受光器の位置とマルチメーターの値

下表は単スリット位置をずらしてから測定したデータである。

受光器の距離 (mm)	マルチメーターの値 (mV)	受光器の距離 (mm)	マルチメーターの値 (mV)
24	27.966	18.8	26.103
23.8	27.84	18.6	26.032
23.6	27.885	18.4	26.332
23.4	27.93	18.2	26.388
23.2	27.844	18	26.481
23	27.874	17.8	26.661
22.8	27.882	17.6	26.82
22.6	27.748	17.4	26.819
22.4	27.745	17.2	26.948
22.2	27.661	17	27.165
22	27.459	16.8	27.413
21.8	27.04	16.6	27.574
21.6	27.207	16.4	27.951
21.4	27.104	16.2	28.186
21.2	26.917	16	28.418
21	26.845	15.8	28.45
20.8	26.889	15.6	28.163
20.6	26.668	15.4	29.17
20.4	26.66	15.2	29.546
20.2	26.559	15	29.707
20	26.501	14.8	29.517
19.8	26.457	14.6	29.772
19.6	26.335	14.4	30.256
19.4	25.917	14.2	30.19
19.2	26.07	14	29.804
19	26.199		

表2 ずらした単スリット位置の受光器の位置とマルチメーターの値

受光器の距離 (mm)	マルチメーターの値 (mV)	受光器の距離 (mm)	マルチメーターの値 (mV)
13.8	29.829	8.8	26.688
13.6	30.423	8.6	27.183
13.4	29.926	8.4	27.987
13.2	30.113	8.2	28.632
13	29.559	8	29.796
12.8	30.23	7.8	30.931
12.6	28.491	7.6	32.409
12.4	29.465	7.4	33.914
12.2	29.242	7.2	35.302
12	29.004	7	37.236
11.8	28.28	6.8	38.598
11.6	28.137	6.6	40.548
11.4	27.709	6.4	42.232
11.2	27.201	6.2	44.384
11	25.976	6	47.359
10.8	26.915	5.8	48.832
10.6	26.563	5.6	51.511
10.4	25.994	5.4	55.693
10.2	26.295	5.2	58.981
10	25.958	5	61.881
9.8	26.005	4.8	65.531
9.6	25.943	4.6	68.931
9.4	25.92	4.4	72.232
9.2	25.977	4.2	76.405
9	26.449	4	79.284

表2 ずらした単スリット位置の受光器の位置とマルチメーターの値

受光器の距離 (mm)	マルチメーターの値 (mV)	受光器の距離 (mm)	マルチメーターの値 (mV)
3.8	83.519	-1.2	121.945
3.6	86.055	-1.4	118.676
3.4	89.743	-1.6	117.684
3.2	94.426	-1.8	116.033
3	98.908	-2	112.973
2.8	100.776	-2.2	109.497
2.6	104.015	-2.4	106.161
2.4	107.687	-2.6	103.328
2.2	109.804	-2.8	99.622
2	113.178	-3	97.597
1.8	116.141	-3.2	94.576
1.6	120.206	-3.4	89
1.4	120.958	-3.6	86.31
1.2	122.645	-3.8	81.521
1	123.269	-4	77.887
0.8	123.953	-4.2	75.58
0.6	125.767	-4.4	72.178
0.4	125.483	-4.6	67.554
0.2	126.372	-4.8	64.895
0	127.637	-5	61.53
-0.2	126.931	-5.2	58.041
-0.4	126.411	-5.4	55.15
-0.6	125.249	-5.6	51.965
-0.8	123.518	-5.8	49.255
-1	122.375	-6	46.611

表2 ずらした単スリット位置の受光器の位置とマルチメーターの値

受光器の距離 (mm)	マルチメーターの値 (mV)	受光器の距離 (mm)	マルチメーターの値 (mV)
-6.2	43.405	-11.2	27.625
-6.4	41.268	-11.4	28.023
-6.6	38.879	-11.6	27.686
-6.8	36.577	-11.8	28.416
-7	35.228	-12	28.735
-7.2	33.219	-12.2	29.038
-7.4	31.453	-12.4	29.083
-7.6	29.623	-12.6	29.352
-7.8	27.729	-12.8	29.581
-8	28.243	-13	29.704
-8.2	27.776	-13.2	29.611
-8.4	26.864	-13.4	29.661
-8.6	26.372	-13.6	28.893
-8.8	26.136	-13.8	29.613
-9	25.928	-14	29.522
-9.2	25.502	-14.2	29.29
-9.4	25.838	-14.4	29.079
-9.6	25.156	-14.6	28.694
-9.8	25.296	-14.8	28.484
-10	26.125	-15	28.186
-10.2	26.266	-15.2	27.86
-10.4	26.32	-15.4	27.328
-10.6	27.024	-15.6	26.865
-10.8	27.159	-15.8	26.568
-11	27.008	-16	26.416

表2 ずらした単スリット位置の受光器の位置とマルチメーターの値

受光器の距離 (mm)	マルチメーターの値 (mV)	受光器の距離 (mm)	マルチメーターの値 (mV)
-16.2	26.132	-21.2	24.53
-16.4	25.697	-21.4	24.149
-16.6	25.431	-21.6	24.456
-16.8	25.018	-21.8	24.575
-17	24.89	-22	24.731
-17.2	24.685	-22.2	24.653
-17.4	24.517	-22.4	24.843
-17.6	24.24	-22.6	24.737
-17.8	24.027	-22.8	24.889
-18	23.82	-23	24.826
-18.2	23.797	-23.2	24.67
-18.4	23.609	-23.4	24.699
-18.6	23.743	-23.6	24.405
-18.8	23.508	-23.8	24.656
-19	23.641	-24	24.485
-19.2	23.745		
-19.4	23.756		
-19.6	23.932		
-19.8	23.776		
-20	23.901		
-20.2	24.019		
-20.4	24.152		
-20.6	24.242		
-20.8	24.345		
-21	24.41		

表2 ずらした単スリット位置の受光器の位置とマルチメーターの値

(2) グラフの作成

Igor pro を用いてグラフを作る。

初めの単スリット位置の時のグラフは図 5 の上から二番目になる。

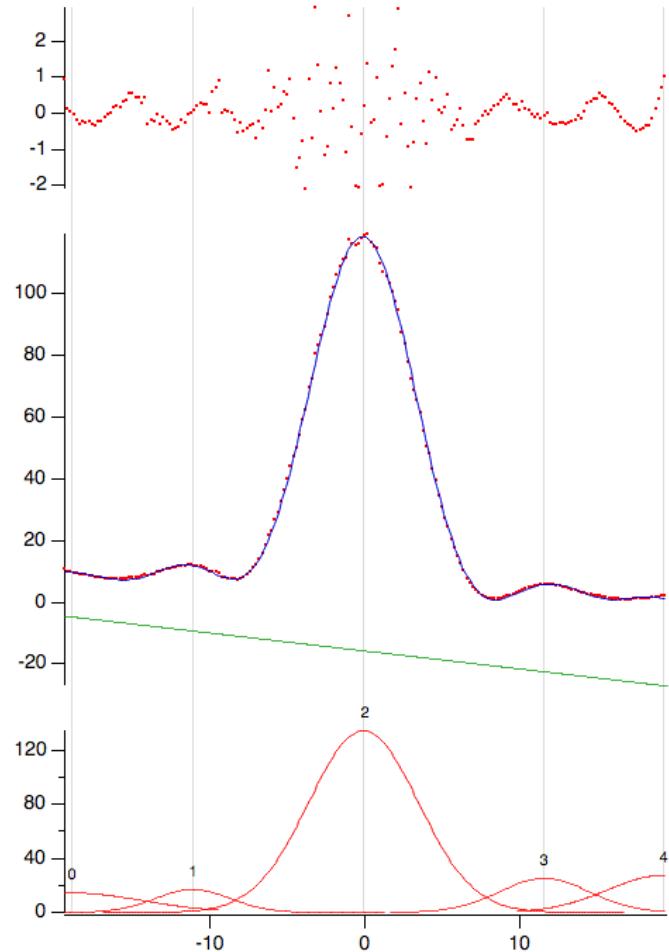


図 5 初めの単スリット位置の時の分布

単スリットをずらした時のグラフは図 6 の上から二番目のようになる。

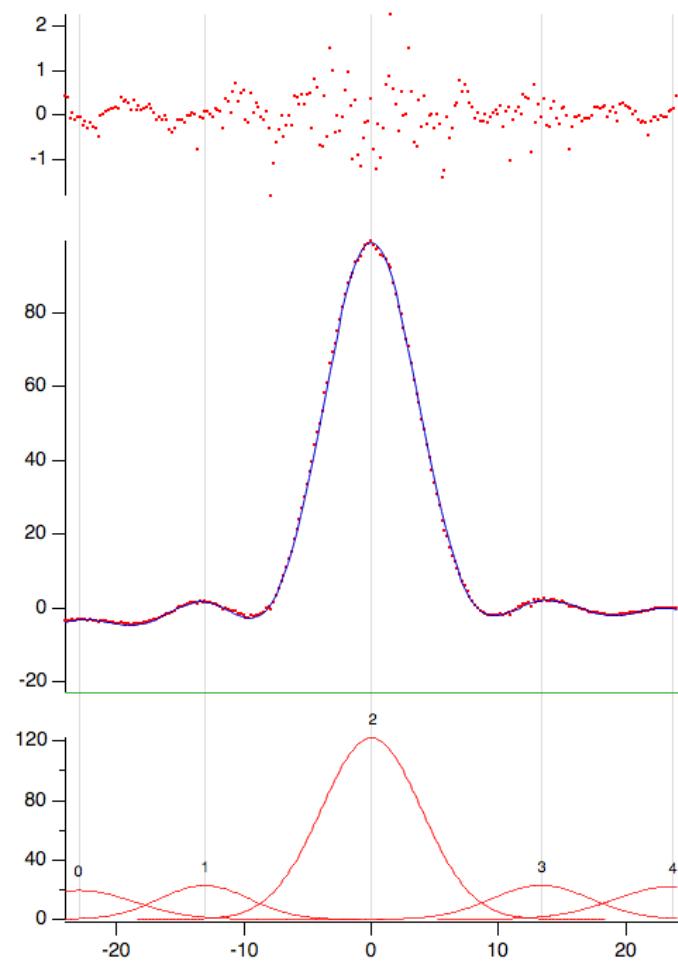


図 6 単スリット位置をずらした時の分布

(3) データの解析

Igor pro をつかって解析を行う。上の図 5 と図 6 の一番下のグラフに書いてある数字がピークの数字である。(図 5 であればピーク 1 は-10 のメモリに近いところ)

初めの単スリット位置の時のピークは下表のようになる。ただし \pm 以下は誤差

表 2 初めの単スリット位置の時のピーク

peak1	
FWHM(mm)	5.6779 ± 0.094562
Location(mm)	-11.22 ± 0.03278
Height(mm)	16.916 ± 0.21137
peak2	
FWHM(mm)	8.3304 ± 0.012931
Location(mm)	-0.09907 ± 0.0049564
Height(mm)	134.17 ± 0.1655
peak3	
FWHM(mm)	6.8436 ± 0.0796
Location(mm)	11.585 ± 0.024284
Height(mm)	25.066 ± 0.21167

単スリット位置をずらした時のピークは下表のようになる。ただし \pm 以下は誤差

表 3 単スリット位置をずらした時のピーク

peak1	
FWHM(mm)	8.3041 ± 0.045895
Location(mm)	-13.09 ± 0.017766
Height(mm)	22.738 ± 0.010275
peak2	
FWHM(mm)	9.2839 ± 0.0092248
Location(mm)	0.014635 ± 0.0034947
Height(mm)	122.18 ± 0.097722
peak3	
FWHM(mm)	9.1367 ± 0.048327
Location(mm)	13.347 ± 0.018525
Height(mm)	22.88 ± 0.098689

(4) 単スリット幅の算出

単スリットを通過した光の干渉パターンを求める式は (i) のようになる。 (i) 式に実測値を代入し、実験で用いたスリット幅を求める。

$$I_0(\theta) = I_0(0) \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \cdots (i)$$

ただし、 $I_0(\theta)$ は一本のスリットだけが開いている場合に観測される光の強度分布、 $I_0(0)$ は一本のスリットの直進方向 ($\theta = 0$) の光の強度、 $\beta = \frac{\pi W \sin \theta}{m \lambda}$ 、 $\theta (< 90^\circ)$ は回折角、 W はスリット幅、 λ は波長。

$\sin \beta$ をマクローリン展開し、3次の項まで採用すると、 $\sin \beta = \beta - \frac{1}{6}\beta^3$ これを (i) 式に代入すると

$$I_0(\theta) = I_0(0) \left(1 - \frac{1}{6}\beta^2 \right)^2 \text{これを、}\beta \text{について解くと } \beta = \sqrt{6 - 6\sqrt{\frac{I_0(\theta)}{I_0(0)}}} = \frac{\pi W \sin \theta}{m \lambda} \text{つぎに、Wについて解く}$$

$$\text{と } W = \frac{\lambda}{\pi \sin \theta} \sqrt{6 - 6\sqrt{\frac{I_0(\theta)}{I_0(0)}}} \text{ 今回は } m=1, \pi = 3.14, \lambda = 670\text{nm} \text{ で考える。}$$

実測値は初めの単スリット位置の値 (ピーク 1 とピーク 2) を用いる。
 $I_0(0)$ はピーク 2 の強度なので、 $I_0(0) = (\text{ピーク 2 の FWHM}) \times (\text{ピーク 2 の高さの半分}) = 558.9 \text{ mm}^2$

$I_0(\theta)$ はピーク 1 の強度なので、 $I_0(\theta) = (\text{ピーク 1 の FWHM}) \times (\text{ピーク 1 の高さの半分}) = 48.02 \text{ mm}^2$

ここで、下図から $\sin \theta$ の値を求めておく。

⑧ 単スリット位置の確認から $l = 22.19 \pm 0.4532 \text{ cm}, x = 11.22 \text{ mm}$

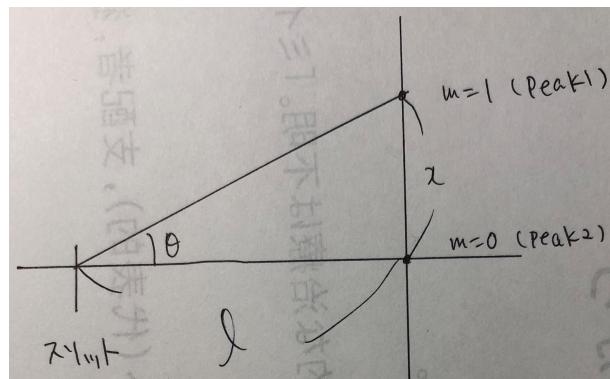


図 7 単スリットとスクリーンの関係

$$\sin \theta = \frac{x}{\sqrt{l^2 + x^2}} \simeq 0.05050$$

したがって、求める幅 W は $W = 8.70 \times 10^{-3} \text{ mm} = 8.70 \mu\text{m}$

5 考察

(1) ボトムが傾いた理由

初めのスリット位置でのグラフのボトムが斜めになってしまったのは計測途中に天気が晴れからくもりに変わり、受光器が計測する自然光の強さが変わってしまったためである。今後このようなミスをなくすためには、自然光がなるべく入り込まない窓のない部屋で実験をするという解決方法が考えられる。

(2) 天候と誤差

初めの単スリット位置でのピークのデータ（以下データ1）と单スリット位置をずらした時のピークのデータ（以下データ2）を比べるとデータ2の誤差はデータ1の対応する項目の誤差よりも小さい。このことから天候がこの実験に影響を及ぼすことが分かる。

(3) 面積強度の比較

データ1とデータ2の面積強度を比較する。

peak1 面積強度 (mm^2)	48.023
peak2 面積強度 (mm^2)	558.84
peak3 面積強度 (mm^2)	85.770

表4 データ1の面積強度

peak1 面積強度 (mm^2)	94.409
peak2 面積強度 (mm^2)	567.15
peak3 面積強度 (mm^2)	104.5

表5 データ2の面積強度

どのくらい違うのかを見るために次の式を用いる。
$$\frac{|\text{データ2の値} - \text{データ1の値}|}{\text{データ2の値}} \times 100$$
すなわち、データ1はデータ2の何%の値かを見る。

peak1	49.1%
peak2	1.5%
peak3	17.9%

表6 データの比較

データ1とデータ2で最も大きい違いはピーク1の面積強度の大きさだが、データ1のグラフを見ればわかるように、ボトムが傾いていることによって高さが小さくなり、データ2より面積強度が小さくなってしまっていると考えられる。ピーク3もピーク1ほどではないがその影響を受けている。ピーク2は高さがほかの二つに比べて大きいためボトムの傾きによる影響がほかの二つと比べて少なかったと考えられる。