

## 第8章

事業Ⅲ：新しい実験テーマの開発と実験マニュアルの整備

—物 理 学—



# 2007 年度 GP 事業 物理学教室活動報告

日吉物理学教室 青木 健一郎

GP 研究員 山本 裕樹

## まえがき

2007 年度は物理学教室では GP 事業の一部として様々なテーマの学生実験に関する開発を行った。その主たるものとその目的について以下にあげる。

### 1. レーザー光を用いた光の干渉実験

レーザー光を用いた干渉実験は我々は以前より学生実験に取り入れている。干渉用スリットは消耗品であり、補充が必要である。しかし、干渉用のスリットはほとんど市販されておらず、市販されているものも学生実験に適しているかは疑問が残る。我々は市販されている干渉スリットの学生実験への適正を調べた。さらに、通常のカメラとフィルムを用いて実験に適した干渉ターゲットができるかを試した。そして、実際に蒸着を施したガラス板の干渉ターゲットを我々がデザインし、特別注文するに至った。

また、レーザー光を使うにあたっては安全性の確保が最重要であり、そのためにも光の出力の測定、そして低出力での干渉縞の測定しやすさを検証した。

### 2. 放射能測定の実験

放射線は原子力発電の重要性が近年増していることもあり、人々が関心を持ち、かつ重要な問題である。その一方、自然界にも存在しているのにも関わらず、放射線に対して合理性無き恐れを持つ人が多く、理解されているとはいいがたい。学生実験へ放射線測定の実験を導入する意味は大きいと我々は考えている。これに向けての放射線測定実験を行った。放射線源を用いれば実験は容易であるが、我々の学生実験では管理の問題もあり線源を用いる実験は現実的に無理がある。よって、自然界に存在する物質や宇宙線の測定が学生実験の候補となる。今回は自然界に存在する物質、塩化カリウムの放射性測定およびバックグラウンドの測定を行った。

### 3. LED を用いた光の量子性に関する実験

現在、光の量子性を実感する学生実験として光電効果の実験を導入している。この実験は、歴史的な意義が大きいとともに何をしているかわかりやすい実験であり、学生実験には適している。欠点は実験の手間の割に文献値に近い値が得られない事である。

LED を使う実験では一見手軽に光の量子性を確かめ、プランク定数を測定できる。しかし、その一方で、学生実験として学生が量子性を実感を持てるかは疑問が残る。さらに、一見簡単そうであるが、背後の理論はそう単純ではない。ここでは、学生実験としての妥当性を検討するとともに、LED において光の量子性がどのように反映されているか調べた。

### 4. Millikan の素電荷測定の実験

Millikan の素電荷の測定実験は歴史的に意義深い実験である。学生実験としても粒子性、素電荷を実感できる素晴らしい実験である。この実験は今年度より学生実験に導入されている。学生が素電荷の存在を実感できるとともに十分な精度で素電荷の値が求めることができるので我々は満足している。

しかし、実際に実験結果の精度を調べると、単純に行うと 10% 程度であり、学生実験としては十分であるが、1905 年に Millikan の得た 0.5% の精度にほど遠い。さらに、文献値から系統的にずれた値が得られる。現在の学生実験装置でどの程度の精度まで得られるのか、そして、その精度の限界がどのような要因に由来するのか、さらに系統的な誤差はどのような要因に生じるかを調査した。

これらの開発を行った結果とそれに関する考察の詳細を以下にまとめる。また、これら以下でまとめた以外にも様々な機器の選定、調整を行った。

GP 事業の一部として物理学教室は情報発信事業も行った。物理学教室では、実験の内容、マニュアル、そして学生実験の結果の統計を GP 初年度の 2005 年度より発信している。今年度はその内容をさらに整備し、さまざま

まな調整を行った。また、これからさらに情報発信を充実させていく方法、そして、GP 以降の情報発信についての検討を行った。

## 目次

1	He-Ne ガスレーザー出力と ND フィルタの効果	4
2	光の干渉用スリットのスリット幅の計測	6
3	光の干渉用の新しいスリット	8
4	新しいスリットのスリット幅の計測	10
5	髪の毛による光の干渉	12
6	He-Ne レーザーによる干渉縞	13
7	写真のフィルムを使用した干渉用スリットの作成	16
8	写真のフィルムを使用した干渉用スリットの作成 2	25
9	スリット幅の実測	28
10	放射能の測定	30
11	LED を使用したプランク定数の測定	34
12	ミリカンの実験	37

## 1 He-Ne ガスレーザー出力と ND フィルタの効果

### 1.1 目的

He-Ne レーザーの出力を測定する。

### 1.2 概要

He-Ne レーザーの出力を測定した。ND フィルタを付けてどのくらい低減されるかも測定した。

### 1.3 実験装置

- JDS Uniphase 社製 He-Ne レーザー (1508-1)
- 吸収型 ND フィルタ (OD=0.3, 0.6, 0.9)
- 反射型 ND フィルタ (OD=0.3, 0.5, 1.0)
- ADVANTEST 社製 パワーメーター (ADCE8230E)

### 1.4 実験方法

レーザー光をパワーメーターに当てて出力を測定した。

### 1.5 実験結果

- 実験日: 2007 年 11 月 10 日
- 室温: 18.8 °C
- 天気: 雨

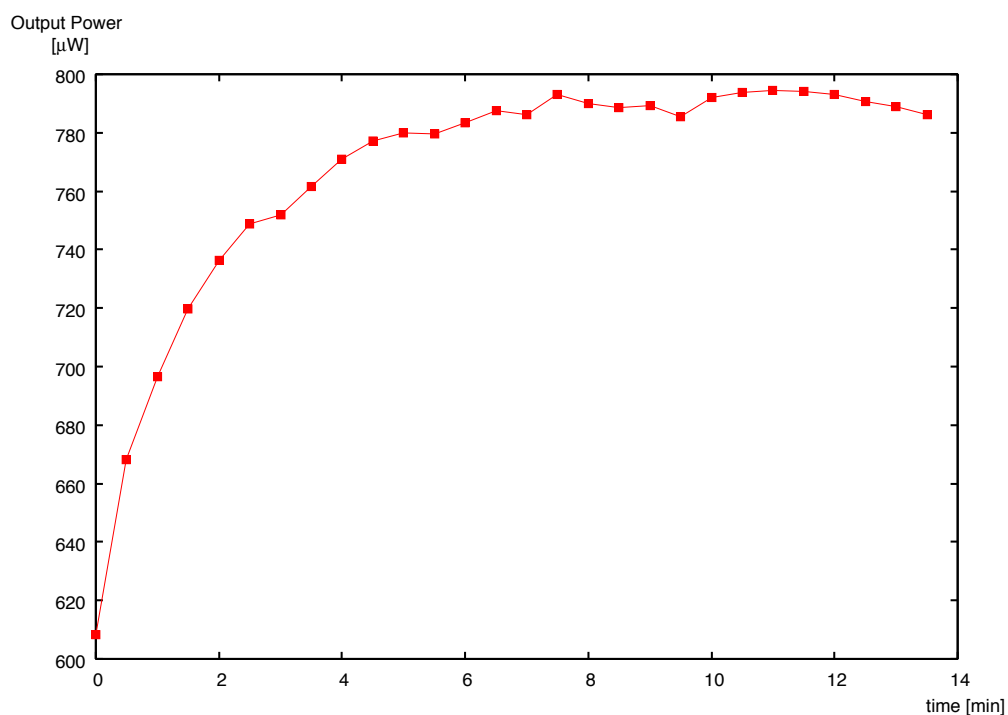
#### 1.5.1 background

レーザー光を当てていないときの出力を測定しておく。

時間 [min]	出力 [ $\mu$ W]
0.0	23.31
0.5	23.31
1.0	23.30
1.5	23.30
2.0	23.30
平均	23.30

以下の出力は全て background を引いた値。

## 1.5.2 出力の時間依存性



スイッチオンからの時間依存性

- ND フィルタ無し.
- レーザー発射口からパワーメーターのセンサまでの距離 5cm.
- 実際は短い時間間隔 (数秒) で出力が上がったり下がったりを繰り返す. これは出力上昇中でもそのような振る舞いをする.

## 1.5.3 フィルタの効果

- 吸収型, 反射型いずれのフィルタを使用してもレーザー光の反射が起こり, レーザーの分裂が見られた. ただし, 光軸とフィルタが垂直で無いらしく, 反射した余分なレーザーは光軸からずれて出てくるため, アイリスでカットした.
- レーザー発射口 (フィルタを除く) からパワーメーターのセンサまでの距離 5cm. これより近づけると逆に出力が下がってしまった. センサで反射したレーザーがレーザー発振器内に入ってしまうためだろうか.

## 1. 吸収型フィルタ

OD=0.3		OD=0.6		OD=0.9	
時間 [min]	出力 [μW]	時間 [min]	出力 [μW]	時間 [min]	出力 [μW]
0.0	401.8	0.0	183.2	0.0	92.49
0.5	400.4	0.5	183.0	0.5	92.73
1.0	399.2	1.0	183.1	1.0	92.84
1.5	398.4	1.5	183.1	1.5	92.90
2.0	396.0	2.0	182.9	2.0	92.96
平均	399.2	平均	183.1	平均	92.78

## 2. 反射型フィルタ

OD=0.3		OD=0.5		OD=1.0	
時間 [min]	出力 [ $\mu$ W]	時間 [min]	出力 [ $\mu$ W]	時間 [min]	出力 [ $\mu$ W]
0.0	396.0	0.0	217.7	0.0	72.82
0.5	394.5	0.5	217.0	0.5	73.83
1.0	393.3	1.0	217.0	1.0	74.36
1.5	392.4	1.5	218.2	1.5	74.72
2.0	391.9	2.0	218.7	2.0	75.00
平均	393.6	平均	217.7	平均	74.15

## 1.6 考察

- レーザーの出力が安定するまで8分ほどかかる。
- 透過率  $T$  と OD(Optical Density) の関係は

$$OD = \log_{10}(1/T)$$

である。

OD	透過率 $T$ [%]
0.3	50.1
0.5	31.6
0.6	25.1
0.9	12.6
1.0	10.0

測定値と比べるとフィルタはほぼスペック通りの性能である。

- フィルタを使うとレーザー光は反射を起こす。反射したレーザー光が出てきてレーザー光が分裂したように見えるため、アイリスで反射した光をカットするといひ。

## 2 光の干渉用スリットのスリット幅の計測

### 2.1 目的

光の干渉用スリットのスリット幅を計測する。

### 2.2 概要

学生実験用に使用している光の干渉用スリットは実際にスリット幅を測定したことがなかったため、顕微鏡で測定した。

### 2.3 実験装置

- 学生実験用の蒸着で作ったスリット (単スリット + 二重スリット)
- 顕微鏡
- CCD カメラ
- キャプチャユニット
- PC
- 対物微尺

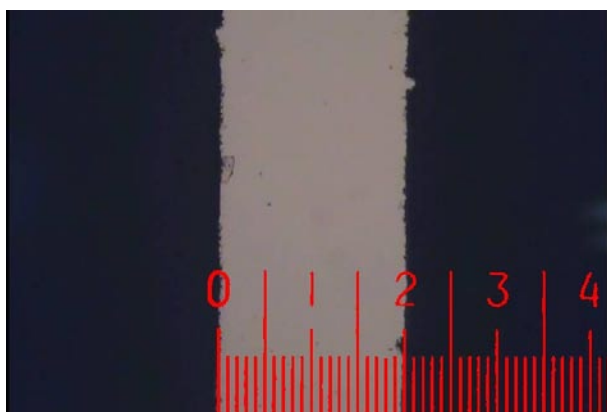


## 2.4 実験方法

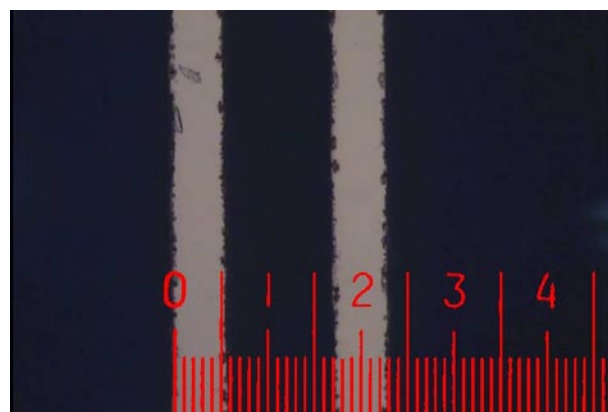
スリット幅を顕微鏡で実際に計測。遊動顕微鏡では明るさが足りなくて見えないため、顕微鏡+ CCD カメラ+ キャプチャーユニット+ 対物微尺 (ブラウン運動のシステム) で測定した。対物微尺とスリットの画像は別々に撮影し、合成した。

## 2.5 実験結果

- 実験日: 2007 年 4 月 24 日



単スリット



二重スリット



破損した箇所

## 2.6 考察

- 単スリットの幅は 0.2 mm.
- 二重スリットのスリット幅は 0.05mm, スリット間隔は 0.17 mm 程度.
- 相当古いものであるため, 破損した箇所がかなり見られる.
- スリットのエッジは結構でこぼこしている.
- 非スリット部分が光を通さないということが重要なのだろうか.

## 3 光の干渉用の新しいスリット

### 3.1 目的

ケニス社のスリットで干渉縞がどのくらいできるかを調べる。また、学生実験で使用しているスリットと比較する。

### 3.2 概要

現在、学生実験で使用中の光の干渉用のスリットがもう作成されていないため、新しいスリットを探す必要がある。ケニス社のスリットが手に入ったので調べてみた。また、学生実験で使用しているスリットと比較した。レーザーは半導体レーザーと He-Ne レーザーを使用した。

### 3.3 実験装置

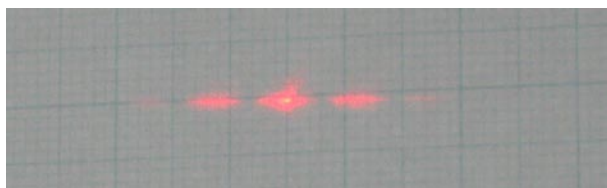
- ケニス社製 No.115 - 795 (フィルムのポジ(ネガ?)を使用したスリットのセット)
  - － ピンホール 直径 0.2mm, 0.4mm の各 1 枚
  - － 回折格子 格子間隔 0.1mm, 0.2mm の各 1 枚
  - － 複スリット (二重スリット) スリット間隔 0.1mm, 0.2mm の各 1 枚
  - － 単スリット スリット幅 0.1mm, 0.2mm の各 1 枚
- 学生実験で使用している蒸着したスリット
- 半導体レーザー (波長 636nm)
- He-Ne レーザー (波長 632nm)

### 3.4 実験方法

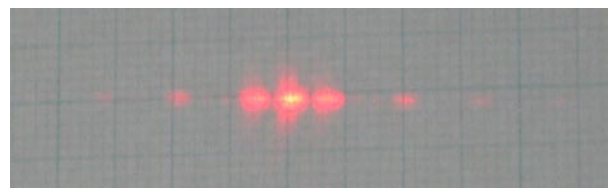
レーザーをスリットを通してスクリーンに投影し、干渉縞を写真に撮った。

### 3.5 実験結果 1

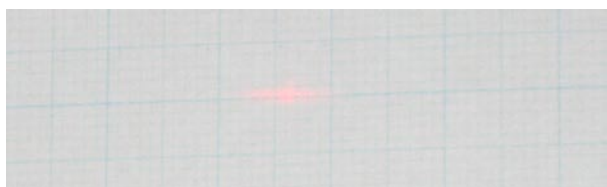
- 実験日: 2007 年 4 月 16 日
- 半導体レーザーを使用



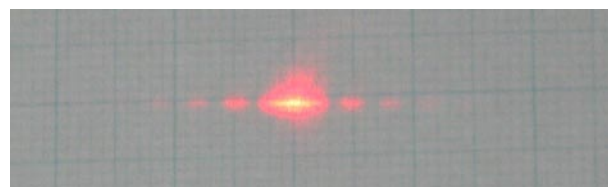
複スリット 0.1mm



複スリット 0.2mm



単スリット 0.1mm



単スリット 0.2mm



ピンホール 0.4mm

- ピンホールに対しては穴2つにレーザーを1基ずつ使用したので位相が揃わず干渉は起こらない。

### 3.6 実験結果 2

- 実験日: 2007年11月24日
- スリットからスクリーンまでの距離 1m

#### 3.6.1 スリットのデータと干渉縞の数

以下の表で“S数”はスリット数，“S幅”はスリット幅，“S間”はスリット間隔，“半導体”は半導体レーザーでの干渉縞の数，“He-Ne”はHe-Neレーザーでの干渉縞の数である。スリット幅とスリット間隔は顕微鏡で実測した。

##### 1. 蒸着したもの

S数	S幅 [mm]	S間 [mm]	半導体	He-Ne
2	0.05	0.12	7	7
1	0.2		5	11

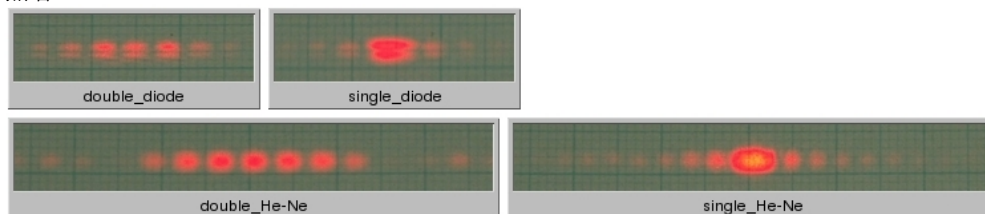
##### 2. ケニス社のフィルム

S数	S幅 [mm]	S間 [mm]	半導体	He-Ne
2	0.11	0.08	3	5
1	0.21		3	5
2	0.05	0.05	3	5
1	0.11		連続	3

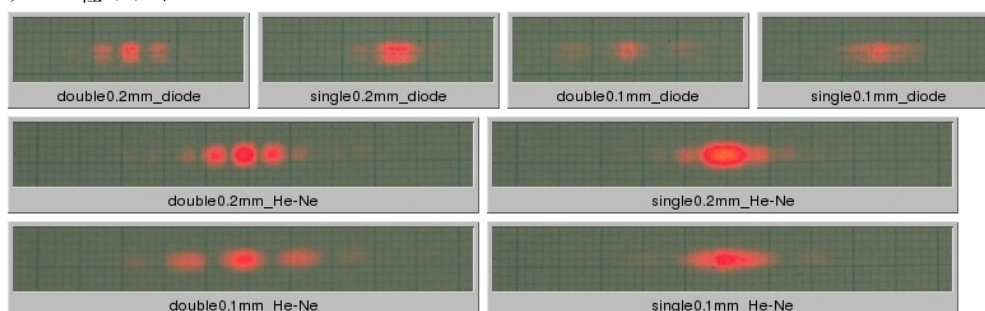
### 3.6.2 干渉縞の写真

diode は半導体レーザー，He-Ne は He-Ne レーザーを示す．

#### 1. 蒸着したもの



#### 2. ケニス社のフィルム



## 3.7 考察

- ケニス社のフィルムは黒の部分がレーザーを少し透過してしまうため，像がにじむ．レーザーをフィルムに垂直にあてるとかどうかにじむ方向が変わった．単スリット 0.1mm の像はかなり暗く，見える干渉縞の数が少ない．干渉縞が暗すぎてちょっと学生実験では使い物にならないかもしれない．また，1セットの値段が比較的高価である (¥8,000 程度)．
- 蒸着したものはやはり干渉縞がはっきり見やすい．

## 4 新しいスリットのスリット幅の計測

### 4.1 目的

ケニス社のフィルムのスリット幅を計測する．

### 4.2 概要

ケニス社のフィルムのスリット幅を顕微鏡で測定した．

### 4.3 実験装置

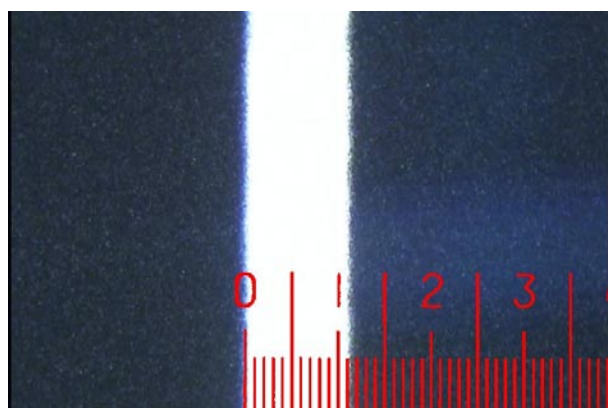
- ケニス社製 No.115 – 795
- 顕微鏡
- CCD カメラ
- キャプチャユニット
- PC
- 対物微尺

#### 4.4 実験方法

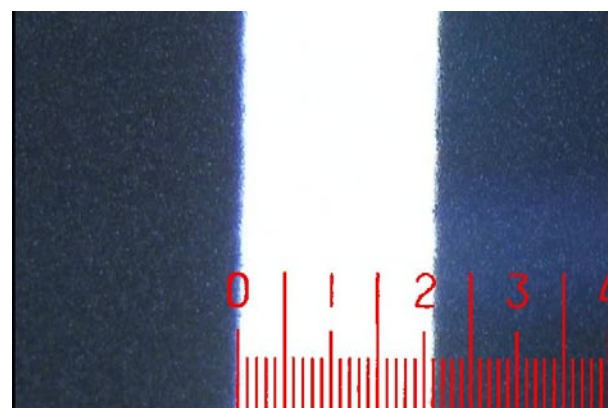
スリット幅を顕微鏡で実際に計測。顕微鏡+ CCD カメラ+キャプチャーユニット+対物微尺 (ブラウン運動のシステム) で測定した。対物微尺とスリットの画像は別々に撮ってお絵かきソフトで合成した。

#### 4.5 実験結果

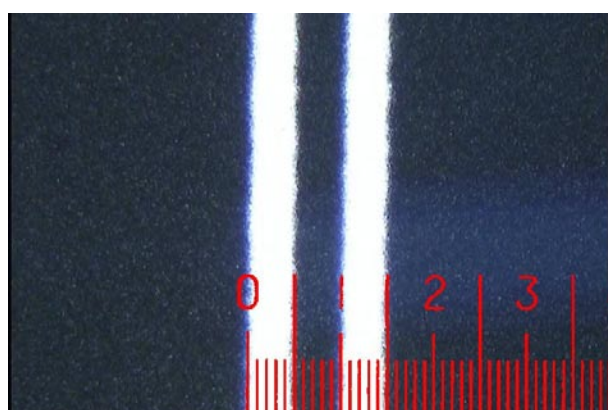
- 実験日: 2007 年 4 月 16 日



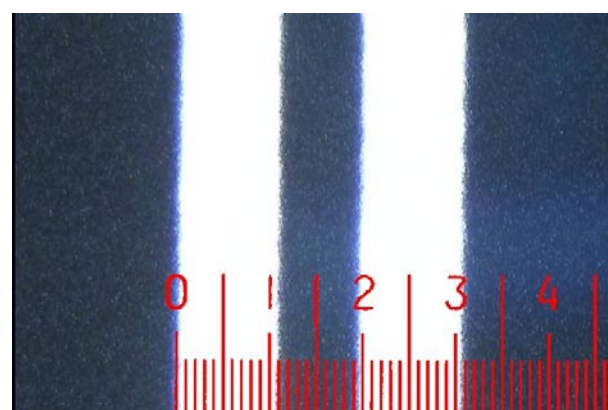
単スリット 0.1mm



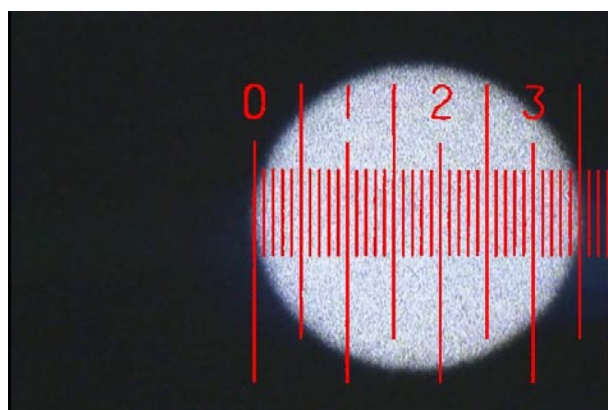
単スリット 0.2mm



複スリット 0.1mm



複スリット 0.2mm



ピンホール 0.4mm

#### 4.6 考察

- エッジは悪くない.
- 単スリットのスリット幅は 10% ぐらいの誤差がある.
- ピンホールは直径 0.4mm のはずだが, 0.35mm しかない. 穴が縦方向につぶれて見えるのはキャプチャーユニットでアスペクト比が変わってしまうことが原因のようだ.

### 5 髪の毛による光の干渉

#### 5.1 目的

髪の毛が二重スリットの代わりに使えるのかを確かめる.

#### 5.2 概要

光の干渉で使用している二重スリットは, 一本のレーザー束を, 二本に分けることで干渉縞を起こしている. 二重スリットの代わりに, 適当な太さを持つものでレーザーを二本に分けることができれば干渉縞を起こすことができると思われる. 髪の毛はビーム径に対して太さもちょうど良く, ビームを通さないで適している.

#### 5.3 実験装置

- サンプル
  1. 酒井氏の髪の毛
  2. 実験者 (山本) の髪の毛
- 半導体レーザー (波長は回折格子で事前に測定)
  - 赤色レーザー (波長  $\lambda = 640[\text{nm}]$ )
  - 緑色レーザー (波長  $\lambda = 533[\text{nm}]$ )

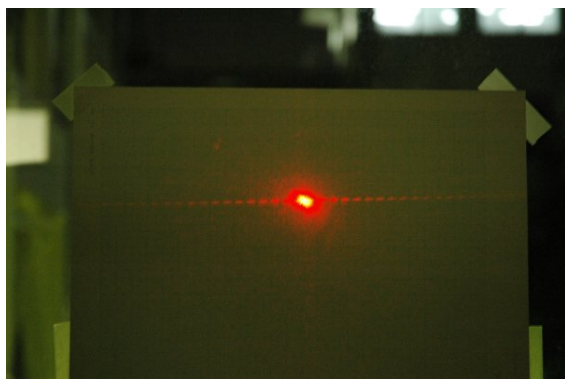
#### 5.4 実験方法

1. スライドガラスに髪の毛を一本貼り付けて二重スリットの代わりにする.
2. すでに波長の分かっているレーザーを使ってスクリーンに映った干渉縞の間隔を測る.
3. 干渉縞の間隔から髪の毛の太さを求める.
4. 顕微鏡で測定した太さと比べる.

#### 5.5 実験結果

- 実験日: 2007 年 10 月 4 日
- 顕微鏡ではサンプルの太い部分と細い部分を測定した.

	サンプル 1 の太さ [mm]	サンプル 2 の太さ [mm]
赤色レーザーより	0.110	0.126
緑色レーザーより	0.111	0.121
顕微鏡で測定	0.097~0.111	0.121~0.124



赤色レーザーでの干渉縞



緑色レーザーでの干渉縞

## 5.6 考察

- 思ったよりきれいに干渉縞が現れた。
- 干渉縞の中央は直進するレーザーのためにより明るい。
- 干渉パターンは二重スリットと同じく等間隔で明暗があるが、なぜか中央が暗である。ただし、中央には直進するレーザーが当たっているため、暗に見えるわけではなく、間隔で見て暗だと判断した。スライドガラスを使っているため屈折が起こっているのだろうか。
- レーザーより求めた髪の毛の太さは顕微鏡で測定した太さとほぼ一致した。
- 髪の毛の太さは一律でないため、レーザーを当てる位置によって干渉縞の間隔にばらつきが出る。
- 学生実験としては本人の髪の毛の太さが求められるので面白いのではないかな。
- 今回の実験は半導体レーザーで行ったが、He-Ne レーザーでやるとどうなるだろうか。レーザーの質が違うので見やすくなるかもしれない。

## 6 He-Ne レーザーによる干渉縞

### 6.1 目的

He-Ne レーザーを使って干渉縞がどのように見えるのかを調べる。また、フィルタを使って減衰させた場合にどうなるかを調べる。

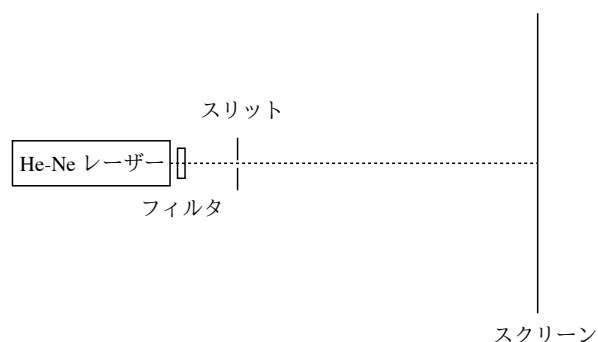
### 6.2 概要

現在、学生実験で使用されているスリットに He-Ne レーザーを当てて干渉縞がどのように見えるのかを調べた。He-Ne レーザーは学生実験で使用している半導体レーザーよりも強力なため、学生実験で使用するにはフィルタで減衰させないと危険である。ただ、そうすると干渉縞が見えなくなる可能性があるため、様々なフィルタを使用して干渉縞が見えるかどうかを調べた。

### 6.3 実験装置

- スリット: 学生実験の蒸着されたものを使用 (二重スリット・単スリット)
- レーザー: JDS Uniphase 社製 He-Ne レーザー 1508-1 (波長 632.8nm, ビーム径 0.48mm)
- フィルタ等
  - 吸収型 ND フィルタ (OD=0.3, 0.6, 0.9)
  - 反射型 ND フィルタ (OD=0.3, 0.5, 1.0)
  - レーザービームエキスパンダー 5X (ビーム径を最大 5 倍まで拡大可能)
  - 光電効果で使用するフィルタ (赤・橙・緑・青)

## 6.4 実験方法



## 6.5 実験結果

- 実験日: 2007 年 11 月 30 日
- スリットからスクリーンまでの距離 1m

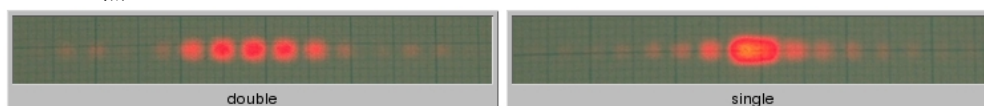
## 6.5.1 干渉縞の数

フィルタ	二重スリット	単スリット
無し	7	11
吸収 OD=0.3	7	9
吸収 OD=0.6	7	7
吸収 OD=0.9	5	5
反射 OD=0.3	7	11
反射 OD=0.5	7	7
反射 OD=1.0	5	5
赤	7	9
橙	7	9
緑	5	3
青	0	0
無し (エキスパンダー使用)	7	5

- ND フィルタではフィルタ内の反射によるレーザーの分裂を消すためアイリスを使用した。
- エクスパンダーではビーム径を最大にした。ビーム径が広がったため、スリットには同じ幅を持つ部分がある程度の長さ必要だが、学生実験のスリットは幅が少しでこぼこしていたり細かい傷があったりしてそういう部分を探すのが難しい。
- 青色フィルタはレーザーを全く通さなかった。

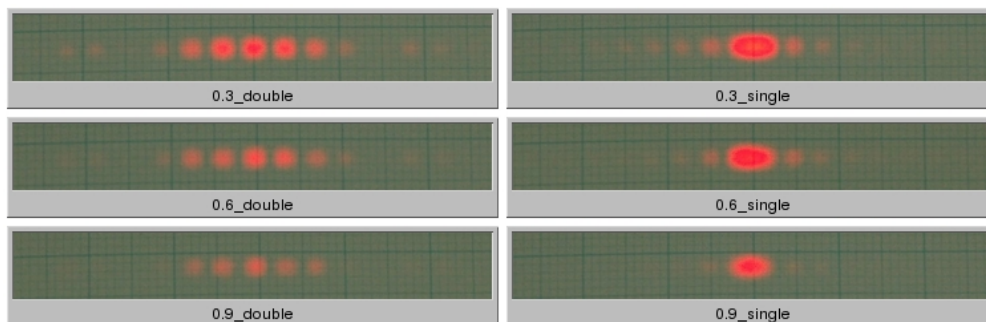
## 6.5.2 干渉縞の写真

## 1. フィルタ無し

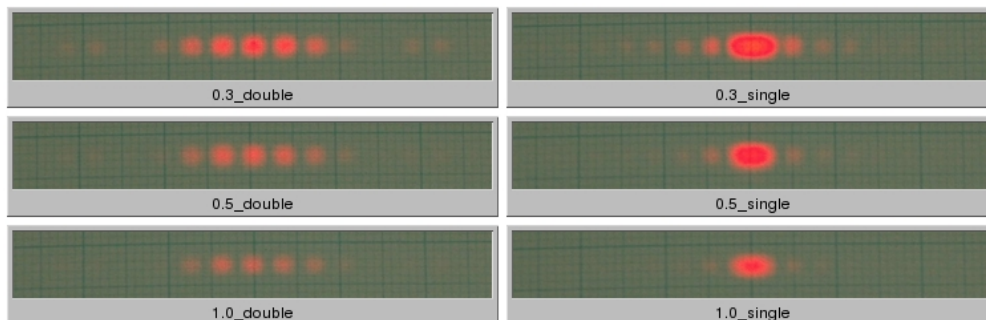


## 2. 吸収型 ND フィルタ

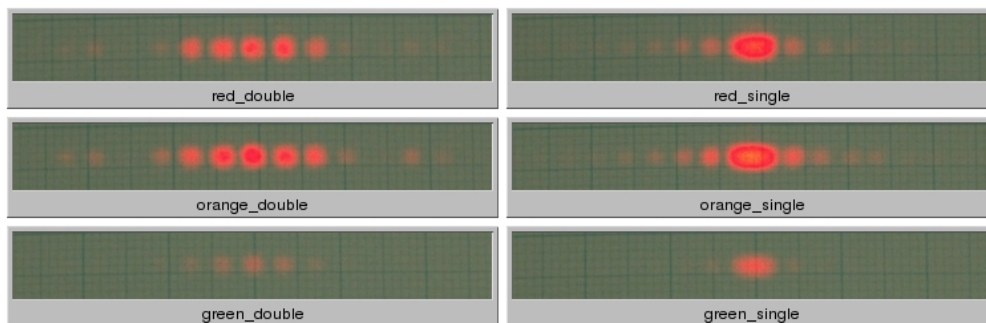




## 3. 反射型 ND フィルタ



## 4. 光電効果用のフィルタ

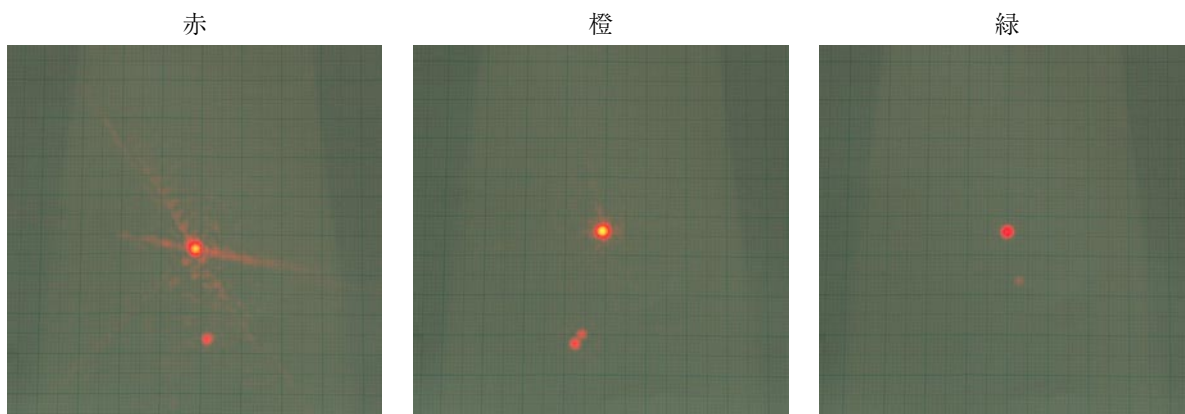


## 5. フィルタ無し (エキスパンダー使用)



## 6.5.3 光電効果用のフィルタを通したレーザー

スリット無しで撮ってみた写真



- フィルタはテープでレーザーの発射口直前に固定した.

- フィルタ内の反射によるレーザーの分裂が見られる。
- レーザーの拡散あり。特に赤色フィルタは酷い。フィルタが傷だらけなのが原因か？
- 青色フィルタはレーザーを全く通さなかった。

## 6.6 考察

- 半導体レーザーよりも He-Ne レーザーの方が、単スリットでは干渉縞の数が断然多く見やすい。
- ND フィルタを入れて出力を弱めても干渉縞はある程度見えるので問題ない。
- エキスパンダーを使うとぼやけてしまうのでは使わない方がよさそう。
- 光電効果用のフィルタはレーザーが拡散、反射してしまうのでレーザー用フィルタとしては使えない。

## 7 写真のフィルムを使用した干渉用スリットの作成

### 7.1 目的

通常の 35mm 写真のフィルムを干渉用スリットとして使用できるかを調べる。

### 7.2 概要

プロジェクターでスクリーンに映した画像や印刷した画像を写真に撮影し、そのフィルムを干渉用スリットとして使おうというものである。画像はどんなものでも良いため、自由な形のスリットを作れる可能性がある。

### 7.3 実験装置

- フィルムを使用したカメラ
- プロジェクターとスクリーン
- スリット画像用自作プログラム
- 赤色半導体レーザー (波長 640nm)

### 7.4 実験方法

以下の 4 通りを試した。

- タイプ 1: PC の画面をプロジェクターでスクリーンに投影して撮影 (ポジ)
- タイプ 2: 拡大印刷した紙を撮影 (ポジ)
- タイプ 3: PC の画面をプロジェクターでスクリーンに投影して撮影 (ネガ)
- タイプ 4: 拡大印刷した紙を撮影 (ネガ)

ポジとネガは 35mm フィルムのことであり、富士フィルムの Provia 100F と ACROS である。フィルムの中ではコントラストが強めで粒子が細かいものを選んだ。

スリット画像はスリットの幅と数を変えて色々試した。カメラの設定を変えて何通りか撮影した (設定は青木さんのみが知る)。

フィルムは現像後、光の干渉実験でレーザーで干渉縞が出来るかを調べた。

### 7.5 実験結果

- 実験日: 2007 年 6 月 16 日

以下は作成したスリットのデータである。スリット個数の single は一重スリット、double は二重スリット、grating はフィルム幅にわたる個数の意味である。

番号	スリット個数	スリット幅 [mm]	スリット間隔 [mm]
01 ~ 11	single	0.20	
12 ~ 14	single	0.10	
15 ~ 18	grating	0.03	0.03
19 ~ 23	grating	0.05	0.05
24 ~ 26	double	0.20	0.20
27 ~ 29	double	0.20	0.10
30 ~ 32	grating	0.02	0.04
33 ~ 35	grating	0.02	0.06
36 ~ 38	double	0.10	0.20

タイプ 1

番号	スリット個数	スリット幅 [mm]	スリット間隔 [mm]
01 ~ 05	single	0.2?	
06 ~ 07	single	0.2	
08 ~ 13	single	0.1	
14 ~ 17	double	0.2	0.2
18 ~ 21	double	0.1	0.2
22 ~ 25	double	0.1	0.1
26 ~ 29	grating	0.02	0.02
30 ~ 33	grating	0.02	0.06
34 ~ 37	single	0.2	

タイプ 2

番号	スリット個数	スリット幅 [mm]	スリット間隔 [mm]
01 ~ 04	single	0.2	
05 ~ 08	single	0.1	
09 ~ 11	double	0.2	0.2
12 ~ 16	double	0.1	0.2
17 ~ 20	double	0.1	0.1
21 ~ 24	grating	0.02	0.02
25 ~ 28	grating	0.02	0.06
29 ~ 32	4	0.1	0.2
33 ~ 36	3	0.1	0.2
37	single	0.05	

タイプ 3

番号	スリット個数	スリット幅 [mm]	スリット間隔 [mm]
01 ~ 11	single	0.1	
12 ~ 15	double	0.2	0.2
16 ~ 19	single	0.2	
20 ~ 23	double	0.1	0.2
24 ~ 27	double	0.1	0.1
28 ~ 31	grating	0.02	0.02
32 ~ 38	grating	0.06	0.02

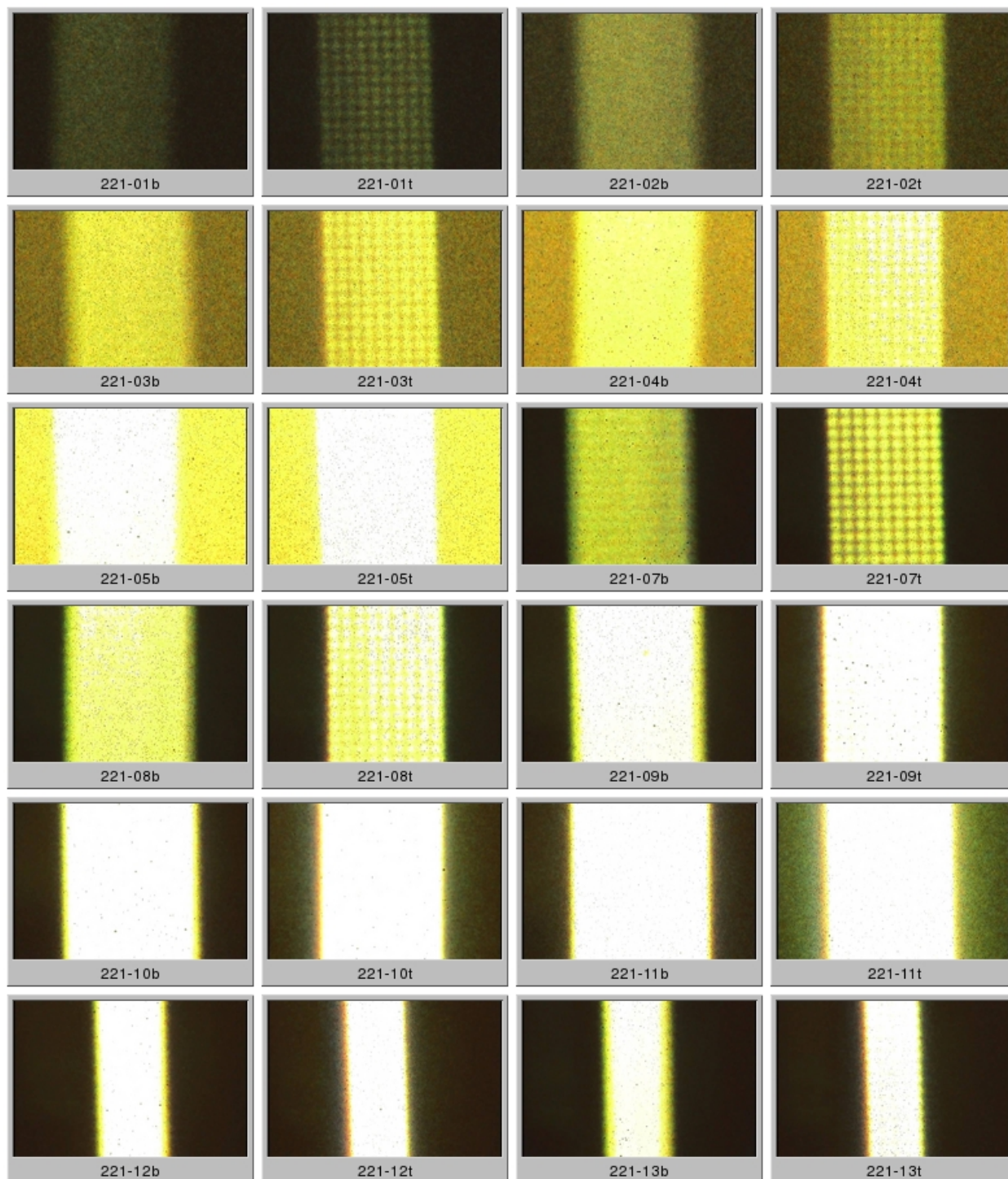
タイプ 4

## 7.5.1 干渉実験

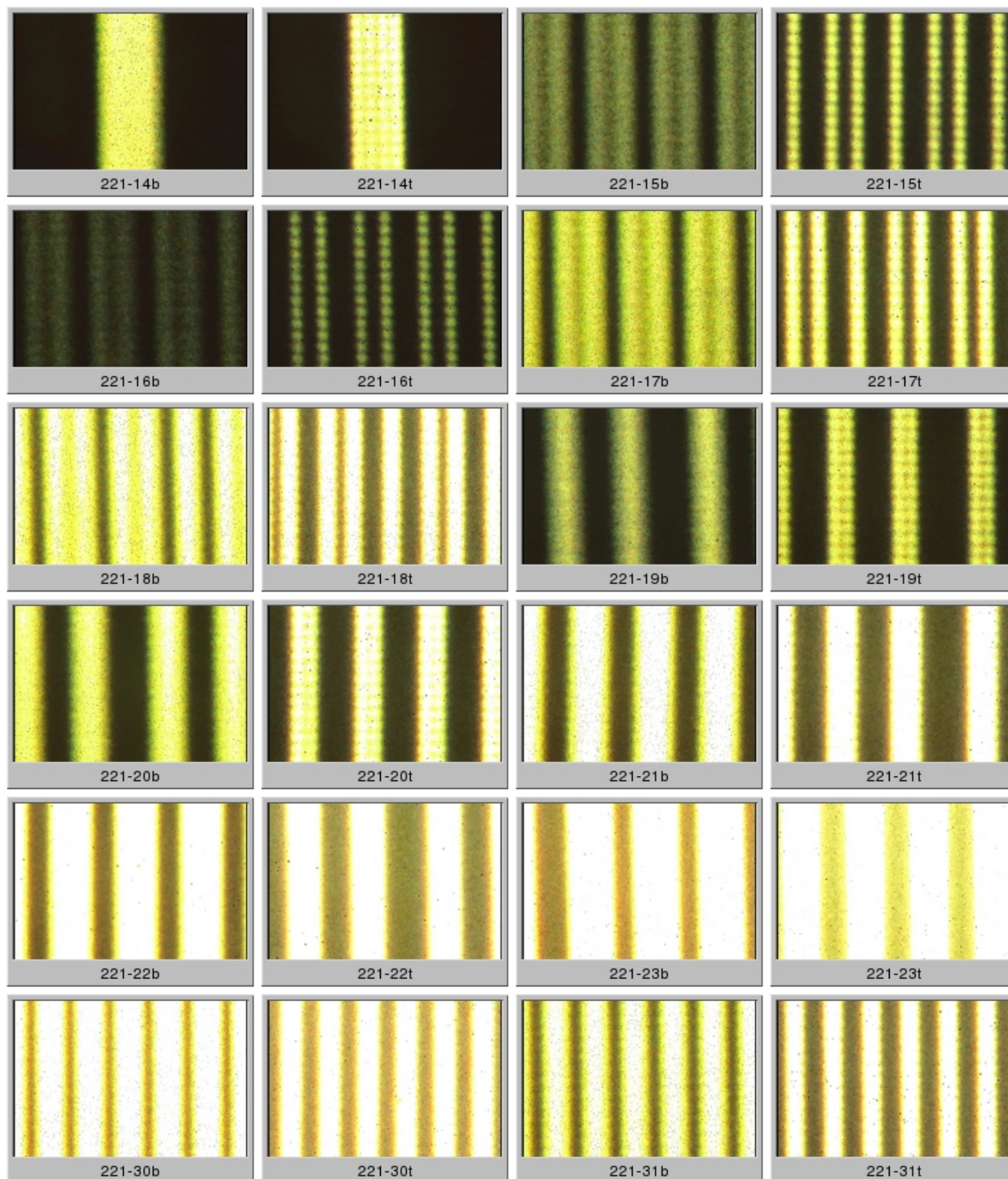
- タイプ 1
  - grating には全て干渉縞があらわれた
  - grating 以外では 12 に少し見えるくらいであとは全滅
- タイプ 2
  - grating には全て干渉縞があらわれた
  - grating 以外では 10,11 に少し見えるくらいであとは全滅
- タイプ 3
  - grating には全て干渉縞があらわれた
  - grating 以外では全滅
  - 干渉縞が暗い
- タイプ 4
  - grating には全て干渉縞があらわれた
  - grating 以外では全滅
  - 干渉縞が暗い

## 7.5.2 スリット部の拡大写真

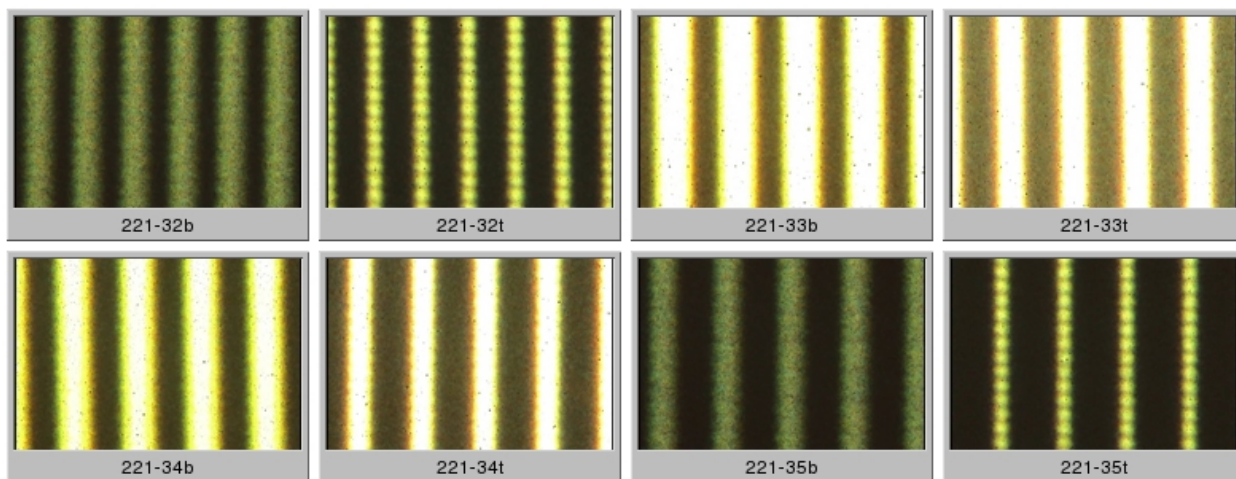
以下はフィルムのスリット部の拡大写真である．bはスリットの下方向、tはスリットの上方向を拡大したものという意味である．



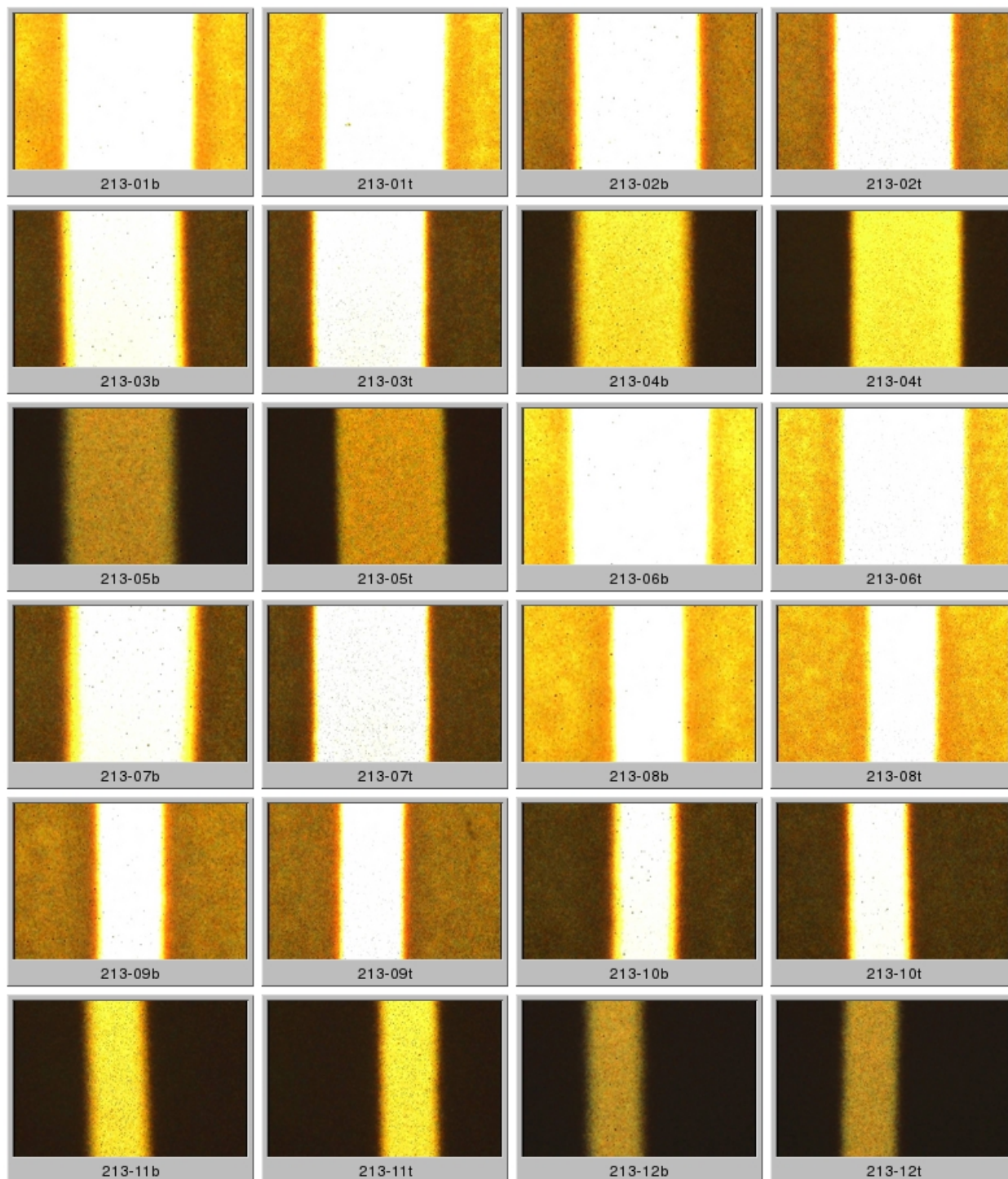
プロジェクターで投影したもの (ポジ) 1



プロジェクターで投影したもの (ポジ) 2

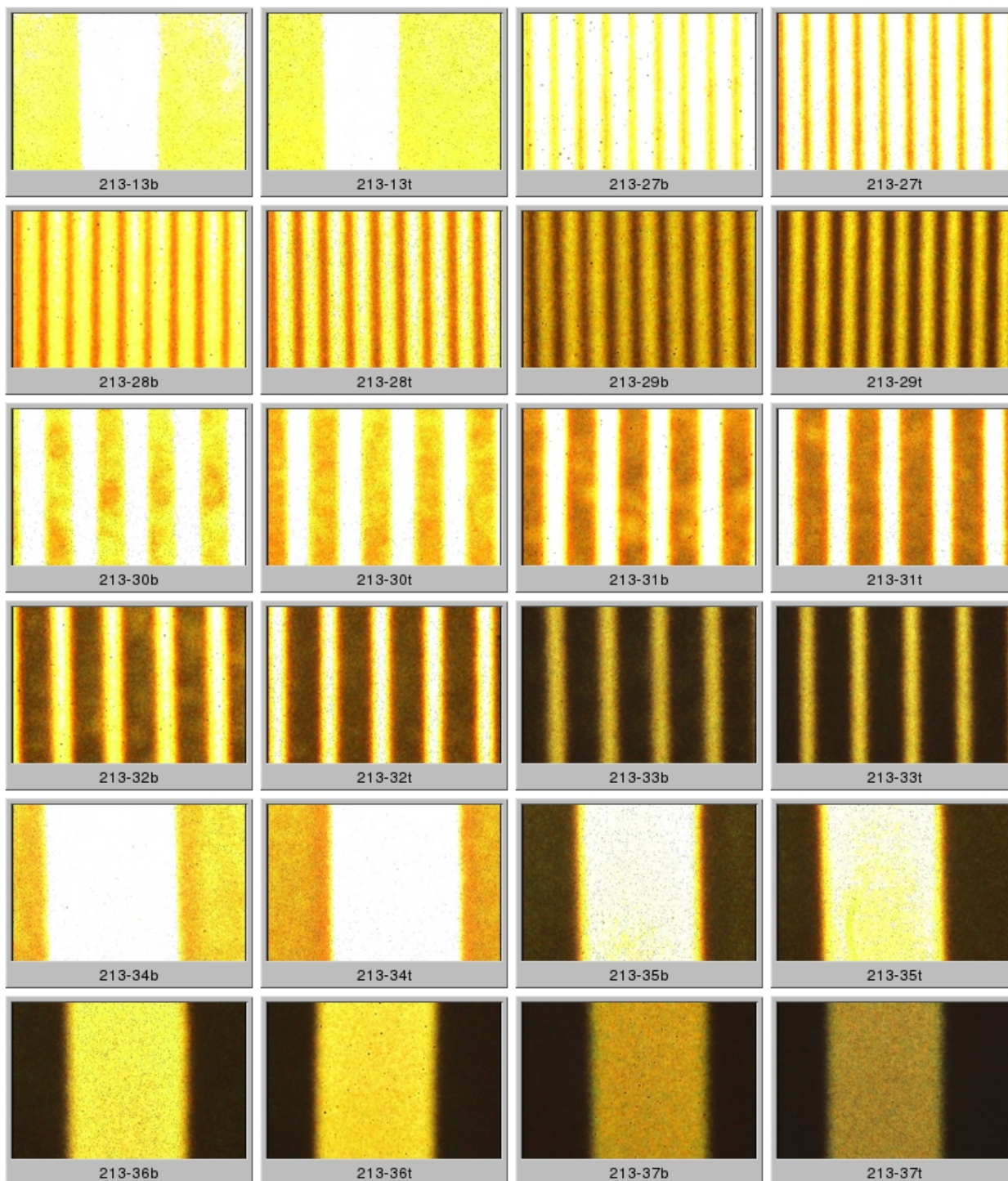


プロジェクターで投影したもの (ポジ) 3

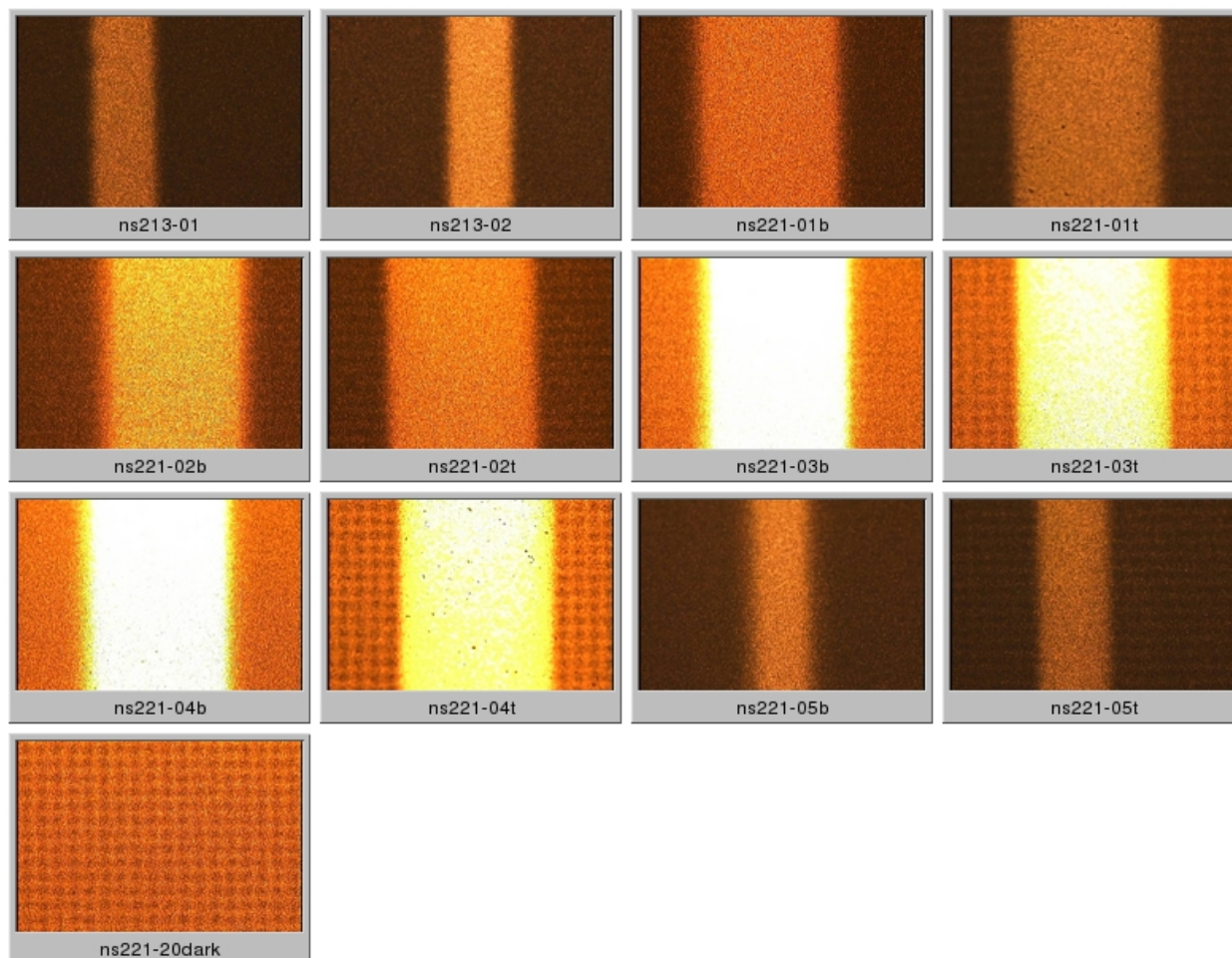


印刷したもの (ポジ) 1





印刷したもの (ポジ) 2



プロジェクターで投影したものと印刷したもの(ネガ)  
ns213 は印刷したもの、ns221 はプロジェクターで投影したもの

## 7.6 考察

- 実は、スライド画像を作成する際にフィルム幅 20mm としたが、実際は 35mm であったので、スケールがおかしくなりスリット幅と間隔は正しくない。
- grating は全てうまくいった。
- 一重スリットほとんど全滅だった。
- 二重スリットは全滅だった。スリット間隔が広すぎるのかもしれない。

- 拡大写真を見ると分かるが、プロジェクターで投影して作ったものは PC のドットの間が見えて格子ができています。また、上方と下方で出来が違います。
- 印刷した方は格子ができるなどの問題は特になさそう。
- ネガはスリット部が暗くなってしまうため良くない。

## 8 写真のフィルムを使用した干渉用スリットの作成 2

### 8.1 目的

写真のフィルムを干渉用スリットとして使用できるかを調べる。

### 8.2 概要

プロジェクターでスクリーンに映した画像や印刷した画像を写真に撮影し、そのフィルムを干渉用スリットとして使おうというものである。画像はどんなものでも良いため、自由な形のスリットを作れる可能性がある。干渉縞ができるかを半導体レーザー、He-Ne レーザーでそれぞれ試した。

### 8.3 実験装置

- フィルムを使用したカメラ
- プロジェクターとスクリーン
- スリット画像用自作プログラム
- レーザー
  - 半導体レーザー (波長 636nm)
  - He-Ne レーザー (波長 632nm)

### 8.4 実験方法

以下の2通りを試した。

- タイプ 1: PC からプロジェクターでスクリーンに投影して撮影
- タイプ 2: ノート PC の液晶をそのまま撮影

フィルムはコントラストの強いマイクロフィッシュなどに使う複写用の特殊なフィルム、ミニコピーフィルム富士フィルム HR11 を用いた。

スリット画像はスリットの幅と数を変えて色々試した。

フィルムは現像後、光の干渉実験でレーザーで干渉縞が出来るかを調べた。

### 8.5 実験結果

- 実験日: 2007 年 11 月 17 日
- 干渉実験でのスリットからスクリーンまでの距離 1m

#### 8.5.1 スリットのデータと干渉縞の数

以下の表で“S 数”はスリット数，“S 幅”はスリット幅，“S 間”はスリット間隔，“半導体”は半導体レーザーでの干渉縞の数，“He-Ne”は He-Ne レーザーでの干渉縞の数である。

## 1. タイプ 1

No.	S 数	S 幅 [mm]	S 間 [mm]	半導体	He-Ne
01	2	0.2	0.2	5	5
02	2	0.2	0.2	9	9
03	2	0.2	0.2	7	9
04	2	0.2	0.2	1	1
05	2	0.3	0.2	3	3
06	2	0.3	0.2	5	5
07	2	0.2	0.1	3	3
08	2	0.2	0.1	5	5
09	2	0.2	0.1	5	7
10	2	0.2	0.1	1	1
11	1	0.2		連続	連続
12	1	0.2		連続	連続
13	1	0.2		1	1
14	1	0.2		1	1
15	1	0.15		連続	連続
16	1	0.15		1	1
17	1	0.15		1	1
18	1	0.1		1	1
19	1	0.1		1	1

※ No.20 ~ 28 はボツ

No.	S 数	S 幅 [mm]	S 間 [mm]	半導体	He-Ne
29	2	0.2	0.15	5	5
30	2	0.2	0.15	5	7
31	2	0.3	0.15	3	3
32	2	0.3	0.15	3	3
33	4	0.2	0.2	連続	連続
34	4	0.21	0.21	連続	連続
35	4	0.21	0.21	連続	連続
36	4	0.3	0.21	連続	3
37	4	0.3	0.21	連続	3

## 2. タイプ 2

No.	S 数	S 幅 [mm]	S 間 [mm]	半導体	He-Ne
01	2	0.1	0.2	5	7
02	2	0.1	0.2	1	1
08	2	0.2	0.2	3	3
09	2	0.2	0.2	5	5
10	2	0.2	0.2	1	1
11	2	0.2	0.2	1	1
12	2	0.2	0.1	3	3
13	2	0.2	0.1	3	5
14	2	0.2	0.1	3	5
24	1	0.2		連続	連続
25	1	0.2		連続	連続
26	1	0.2		1	1
31	4	0.2	0.2	連続	5
32	4	0.2	0.2	連続	5
33	4	0.21	0.21	連続	5
34	4	0.21	0.21	1	1
35	3	0.21	0.21	3	3
36	2	0.3	0.2	1	1
37	2	0.3	0.2	連続	5

※ No.3 ~ 7, 15 ~ 23, 27 ~ 30 はボツ

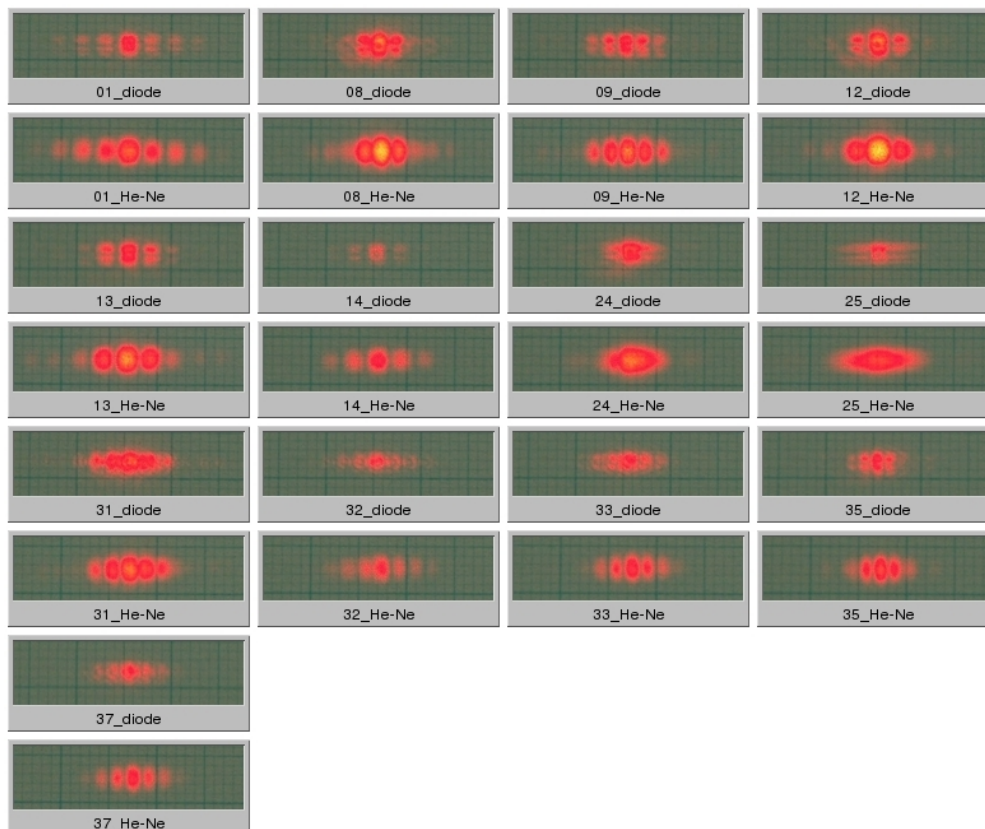
- 干渉縞の数が 1 のものはレーザーが通りにくい干渉縞が薄すぎて見えないということ。
- 干渉縞の数が連続のものは干渉縞の明の部分が広すぎ (強すぎ) たり暗の部分が狭すぎたりしているため明暗の区別が付かないもの。

## 8.5.2 干渉縞の写真

diode は半導体レーザー, He-Ne は He-Ne レーザーによる干渉縞を示す。



タイプ 1



タイプ 2

## 8.6 考察

- スリットとして実際使えそうなものがいくつかある。
- 全体的に He-Ne レーザーの方が半導体レーザーより干渉縞が明るい。
- フィルムに濃淡のムラがあるのでレーザーを当てる場所によって干渉縞の数の変化があるかもしれない。特にタイプ 2 のムラが酷い。
- スケールが間違っている気がする。タイプ 1 の No.2 の He-Ne レーザーの結果より

$$d = \frac{l\lambda}{x} = \frac{1 \times 632 \times 10^{-9}}{1.9 \times 10^{-3}} = 3.3 \times 10^{-4}[\text{m}] = 0.33[\text{mm}]$$

0.2 mm として作ったはずであったが、スリット幅が正しく測定されない。

## 9 スリット幅の実測

### 9.1 目的

写真のフィルムで作ったスリットは計算通りにスリット幅，スリット間隔ができていないかを調べる。

### 9.2 概要

写真のフィルムで作ったスリットは，自作ソフトで画像を作成したものを撮影したものである。スケールの計算は合っているかを調べるためにスリット幅，スリット間隔を顕微鏡で実測した。

### 9.3 実験装置

- 顕微鏡と CCD カメラと PC
- スリット
  - タイプ 1: PC からプロジェクターでスクリーンに投影して撮影
  - タイプ 2: ノート PC の液晶をそのまま撮影

### 9.4 実験方法

顕微鏡で測定する。スケールは対物微尺で合わせる。

### 9.5 実験結果

- 実験日: 2007 年 11 月 27 日

#### 1. タイプ 1

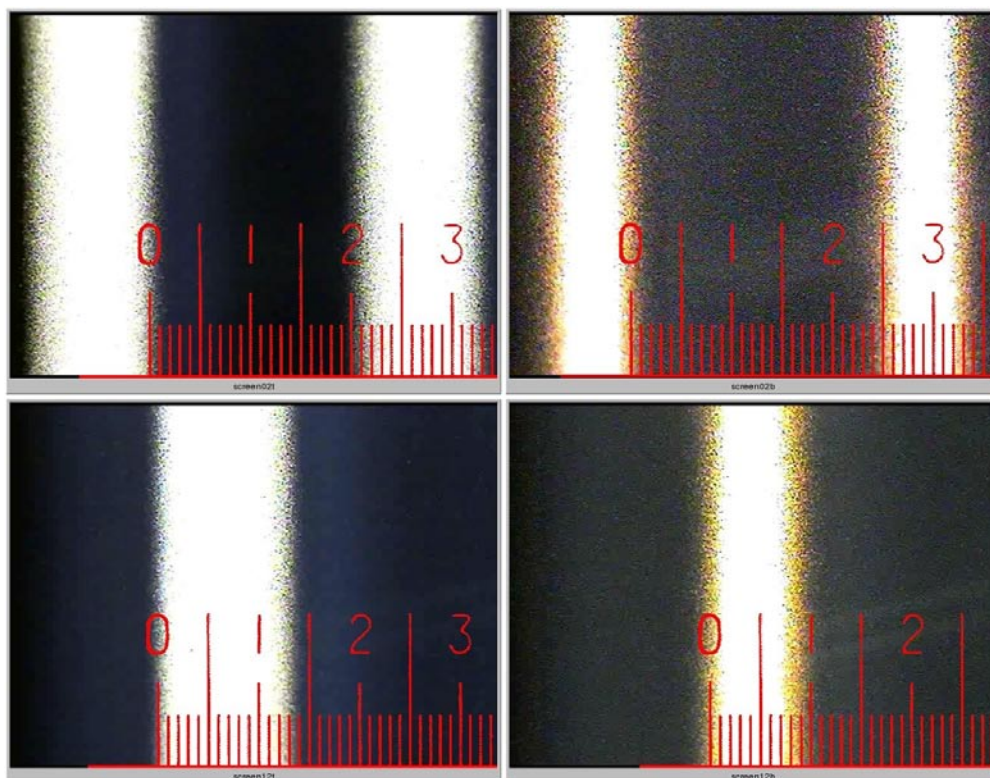
No.	位置	実測値		理論値	
		S 幅 [mm]	S 間 [mm]	S 幅 [mm]	S 間 [mm]
02	上	0.12	0.21	0.2	0.2
02	下	0.08	0.25		
03	上	0.09	0.23	0.2	0.2
03	下	0.04	0.29		
06	上	0.19	0.22	0.3	0.2
06	下	0.13	0.29		
12	上	0.13		0.2	
12	下	0.09			

#### 2. タイプ 2

No.	位置	実測値		理論値	
		S 幅 [mm]	S 間 [mm]	S 幅 [mm]	S 間 [mm]
01	上	0.07	0.19	0.1	0.2
01	下	0.08	0.18		
09	上	0.13	0.22	0.2	0.2
09	下	0.14	0.22		
24	上	0.16		0.2	
24	下	0.17			

#### 9.5.1 拡大写真

スケールは対物微尺のもので、画像上で合成した。



## 9.6 考察

- スクリーンタイプは上部と下部でスリット幅、間隔の差がかなりある。
- スリットの溝がかなり潰れていることが分かる。スケールが間違っているように感じたのはこれが原因であろう。
- エッジに鋭さはない。一重スリットはエッジの鋭さが結構干渉縞に効くのかもかもしれない。

# 10 放射能の測定

## 10.1 目的

塩化カリウムから放射能を測定する。

## 10.2 概要

ガイガーカウンターを購入したのでこれを使用して塩化カリウムから放射能を測定した。

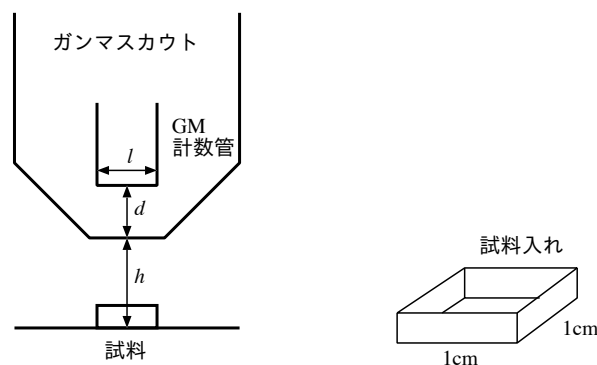
## 10.3 実験装置

- 測定器：ガンマスカウト  
GM(Geiger-Müller) 計数管を用いたドイツ製のガイガーカウンターである。これ一つで  $\alpha$  線 (4MeV 以上),  $\beta$  線 (0.2MeV 以上),  $\gamma$  線 (0.02MeV 以上) がそれぞれ計れる。GM 計数管では  $\beta$  線はほぼ 100% 検出できるのに対し、 $\gamma$  線は 1% ぐらいしか検出できないらしい。
- 試料：お塩で減塩 (日本海水)  
この塩は減塩のために塩化ナトリウムをカットし、その分、塩化カリウムの割合を増やしてある。成分表によると塩 100 g 中、カリウムは 26.2 g 含まれる。カリウムの同位体の中では  $^{40}\text{K}$  が  $\beta$  線を放射する。



## 10.4 実験方法

図の様に試料入れを作ってその中にお塩で減塩を入れて測定する。試料入れは GM 計数管まで  $d+h$  の距離に置いて測定と、 $d$  の距離に置いて測定の 2 通り試した。



## 10.5 実験結果

- 実験日: 2007 年 7 月 24 日
- 気温:  $t = 24.0[^\circ\text{C}]$
- 気圧:  $P = 1002.2[\text{hPa}]$
- GM 計数管 (円柱形) の内径:  $l = 1.1[\text{cm}]$
- ガンマスカウトの外枠から GM 計数管までの距離:  $d = 1.1[\text{cm}]$
- 試料からガンマスカウトまでの距離:  $h = 1.0[\text{cm}]$
- 試料入れ:  $1.0\text{cm} \times 1.0\text{cm}$
- 試料: 0.20 g
- パルスカウントは 1 回 10 分間をカウント
- ガンマスカウトの測定モードは  $\alpha + \beta + \gamma$  モード (観測窓にカバー無し)

background	$d+h$	$d$
155	188	189
135	156	195
148	181	190
150	153	162
138	168	177
145.2	169.2	182.6

$$(169.2 - 145.2)/10 = 2.40\text{cpm} \quad (1)$$

$$(182.6 - 145.2)/10 = 3.74\text{cpm} \quad (2)$$

cpm は count per min.

## 10.6 解析

### 10.6.1 カウント数の見積もり

$^{40}\text{K}$  の性質

- 原子量 39.96
- 崩壊モード
  - $\beta$  崩壊  $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} (\text{stable}) + e^- (\text{MAX } 1.31\text{MeV})$  89.3%
  - 電子捕獲 (EC)  $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar} (\text{stable}) + \gamma (1.50\text{MeV})$  10.7%
- 半減期  $1.277 \times 10^9$  year
- 存在比 0.012%

試料 0.20 g 中の  $^{40}\text{K}$  の個数

$$N = 0.2 \times \frac{26.2}{100} \times \frac{0.012}{100} \times \frac{1}{39.96} \times 6.02 \times 10^{23} = 9.47 \times 10^{16} \quad (3)$$

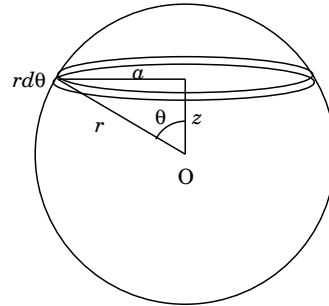
崩壊定数

$$\lambda = \frac{0.6931}{1.277 \times 10^9 \times 365 \times 24 \times 60} = 1.03 \times 10^{-15} [\text{min}^{-1}] \quad (4)$$

これより,

$$9.47 \times 10^{16} \times 1.03 \times 10^{-15} \times 0.893 = 87.1 \quad (5)$$

1 分間に 87.1 個の  $\beta$  崩壊が起こっているはず.



試料は点線源ではないが, 点線源と仮定した場合の GM 計数管に入る割合を考える. 点線源を中心とする球面において, 線源からの高さ  $h$ , 内径  $l$  までの頂点からの表面積を求める.

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{r^2 - z^2} \\ &= \sqrt{r^2 - r^2 \cos^2 \theta} \\ &= r \sin \theta \end{aligned} \quad (6)$$

$$\cos \theta_h = \frac{h}{r} \quad (7)$$

$$r = \sqrt{h^2 + \frac{l^2}{4}} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} S_h &= \int_0^{\theta_h} 2\pi a (rd\theta) \\ &= 2\pi r^2 \int_0^{\theta_h} \sin \theta d\theta \\ &= 2\pi r^2 (1 - \cos \theta_h) \\ &= 2\pi r^2 \left(1 - \frac{h}{r}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

球面全表面積との比は

$$R_h = \frac{S_h}{4\pi r^2} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{h}{r}\right) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + l^2/4h^2}}\right) \quad (10)$$

試料までの距離が  $h+d$  と  $d$  のそれぞれにおける比は

$$R_{h+d} = 0.0163 \quad (11)$$

$$R_d = 0.0528 \quad (12)$$

これより

$$87.1 \times 0.0163 = 1.42 \quad (13)$$

$$87.1 \times 0.0528 = 4.60 \quad (14)$$

距離が  $h+d$  の場合は 1.42 cpm,  $d$  の場合は 4.60 cpm のパルスカウントになる。ただ、実際は点線源ではなくて平面的に広がっているのだからこれより少なくなると思われる。

### 10.6.2 半減期と崩壊定数

同位体数  $N(t)$ , 崩壊定数  $\lambda$ , 経過時間  $t$  とする。

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \quad (15)$$

これを解くと

$$N(t) = Ae^{-\lambda t} \quad (16)$$

$$t = \frac{-\ln N(t) + \ln A}{\lambda} \quad (17)$$

$$N(t_1) = N(t_0)/2 \quad (18)$$

とすると、半減期  $t_{1/2}$  は

$$\begin{aligned} t_{1/2} &= t_1 - t_0 \\ &= \frac{-\ln N(t_1) + \ln A}{\lambda} - \frac{-\ln N(t_0) + \ln A}{\lambda} \\ &= \frac{\ln 2}{\lambda} \end{aligned} \quad (19)$$

である。 $^{40}\text{K}$  の半減期は  $\beta$  崩壊のみと考えると

$$\begin{aligned} t_{1/2} &\simeq 6.73 \times 10^{14} [\text{min}] \\ &\simeq 1.28 \times 10^9 [\text{year}] \end{aligned} \quad (20)$$

となる。

### 10.6.3 $\beta$ 線の飛程

$\beta$  線の物質中の飛程  $R$  [ $\text{mg}/\text{cm}^2$ ] (Feather の式)

$$R = 542E - 133 \quad (0.8 [\text{MeV}] < E) \quad (21)$$

$$R = 407E^{1.38} \quad (0.15 [\text{MeV}] < E < 0.8 [\text{MeV}]) \quad (22)$$

空気の密度

$$\rho = \frac{1.293}{1 + 0.00367t} \frac{P}{1013} = 1.18 [\text{kg}/\text{m}^3] = 1.18 [\text{mg}/\text{cm}^3] \quad (23)$$

$E_{\text{max}} = 1.31 [\text{MeV}]$  の飛程

$$R_{\text{max}} = 542 \times 1.31 - 133 = 577 [\text{mg}/\text{cm}^2] \quad (24)$$

$$R_{\text{max}}/\rho = 489 [\text{cm}] \quad (25)$$

$\beta$  線は連続スペクトルなので、最大 489 cm 飛ぶことができる。最低は不明。

## 10.7 考察

- 点線源の場合は，理論的には距離が  $h + d$  の場合は 1.42 cpm,  $d$  の場合は 4.60 cpm のパルスカウントになる．実験値の 2.40 cpm, 3.74 cpm と比べてもそんなに違わなかった．実際の試料箱では点線源じゃなくって平面状に広がっているんで，その差はあると思う．
- $\beta$  崩壊は確率的に起こるので，もっと測定回数を増やした方がいいが，結構時間がかかる．
- $\beta$  線の飛程は最大 489 cm で測定距離  $d + h$  より十分長いため，減衰は考えなくて良い．

## 11 LED を使用したプランク定数の測定

### 11.1 目的

LED を使用してプランク定数を測定する．

### 11.2 概要

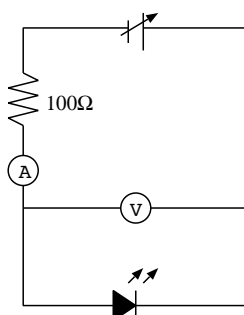
LED の発光は伝導帯の電子が価電子帯の正孔と再結合することで起こる．再結合の際に電子が失ったエネルギーが光として放出される．

### 11.3 実験装置

- LED
  1. 東芝 TLRE180AP 高輝度・赤
  2. 東芝 TLOH156P 高輝度・橙
  3. 東芝 TLOE180AP 高輝度・橙
  4. 東芝 TLYE180AP 高輝度・黄
  5. 東芝 TLGE183P 高輝度・緑
  6. 東芝 TLRH180P 超高輝度・赤
  7. 豊田合成 E1L53-3G 高輝度・緑
  8. 豊田合成 E1L53-YC 高輝度・青緑
  9. 豊田合成 E1L53-AB 高輝度・青
- ミニ分光器 (浜松ホトニクス製)
- デジタルマルチメータ (電圧, 電流測定)
- 安定化電源 DK-806

### 11.4 実験方法

次の様な回路で実験を行った．安定化電源は電圧可変 (1.5~15V) のタイプである．電流を一定にして電圧を測定した．



また、波長は LED をダンボールで覆ってミニ分光器で測定した。

## 11.5 実験結果

- 実験日: 2007 年 11 月 3 日

### 11.5.1 プランク定数

	$V$ [V]	$I$ [mA]	$\nu_p$ [ $\times 10^{14}$ Hz]	$\Delta\nu$ [ $\times 10^{14}$ Hz]	$eV$ [ $\times 10^{-19}$ J]	$h$ [ $\times 10^{34}$ J·s]	Energy Loss [%]
1	1.855	20.2	4.70	0.06	2.97	6.32	-5
2	2.05	20.2	4.92	0.07	3.28	6.68	1
3	1.939	20.2	4.92	0.06	3.11	6.31	-5
4	1.967	20.1	5.09	0.06	3.15	6.19	-7
5	2.13	20.1	5.28	0.06	3.41	6.47	-2
6	1.923	20.0			3.08		
7	3.28	20.3			5.25		
8	3.32	20.0			5.32		
9	3.19	20.0			5.11		
6	1.833	10.0	4.68	0.06	2.94	6.27	-6
7	3.11	10.0	5.76	0.17	4.98	8.65	23
8	3.18	10.0	6.01	0.17	5.09	8.48	22
9	3.06	10.0	6.37	0.17	4.90	7.69	14

- 1～5 は  $I \simeq 20$ [mA] に固定して測定。  
6～9 は  $I \simeq 20$ [mA] だと分光器が飽和してしまうため  $I \simeq 10$ [mA] で測定。
- $\nu_p$  は分光器で得られた波長分布を振動数分布に変換し、Gaussian として gnuplot で fit.

$$C(\nu) = C_0 \exp \left[ -\frac{(\nu - \nu_p)^2}{2(\Delta\nu)^2} \right] + B$$

$C(\nu)$  はカウント数,  $B$  は background.

- プランク定数  $h$  は

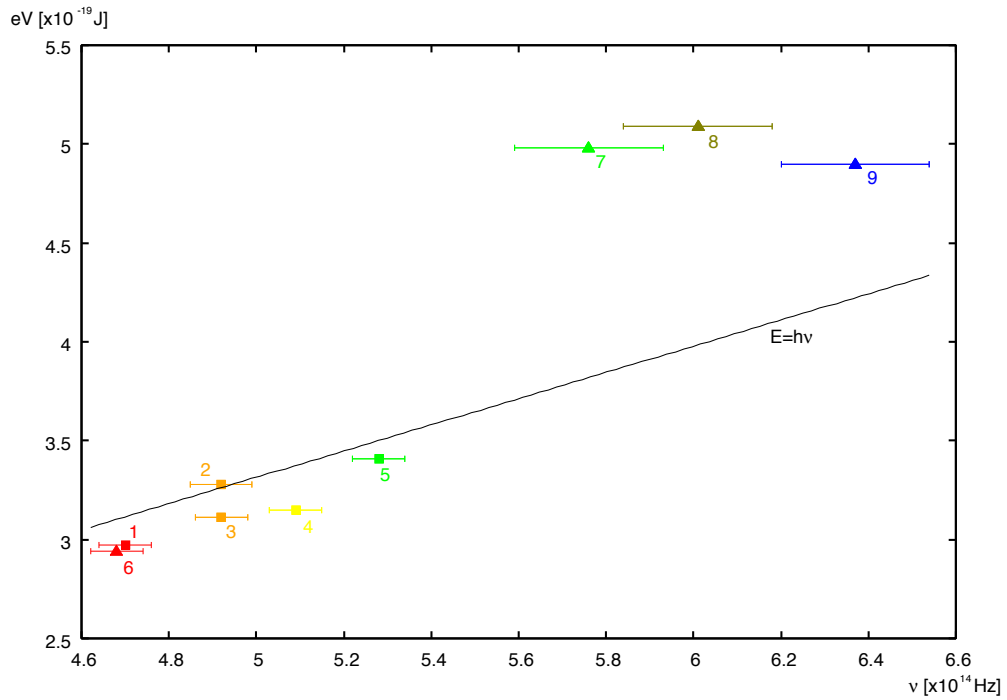
$$h = \frac{eV}{\nu_p}$$

で計算した。

- Energy Loss の計算は

$$\text{Energy Loss} = \frac{eV - h\nu_p}{eV}$$

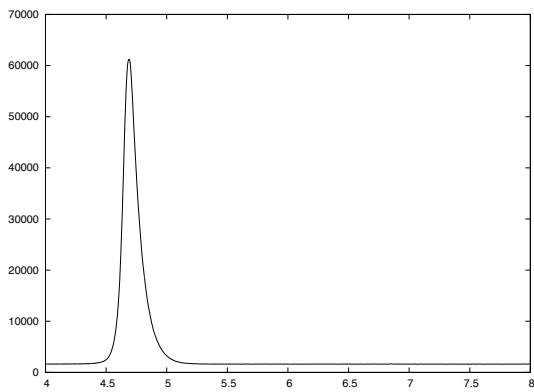
で行った。ここで  $h = 6.63 \times 10^{-34}$ [J·s] を用いた。



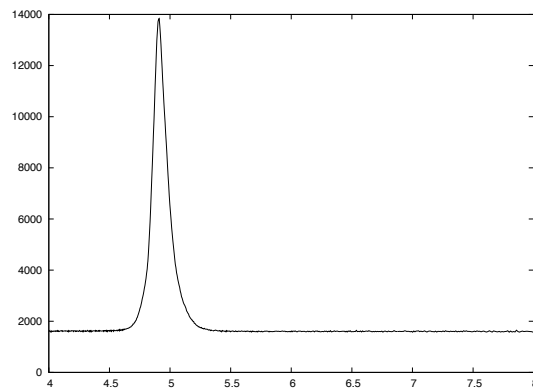
振動数  $\nu$  と  $eV$  のグラフ  
 直線は  $E = eV = h\nu$  ( $h = 6.63 \times 10^{-34}[\text{J}\cdot\text{s}]$  を使用)

11.5.2 振動数分布

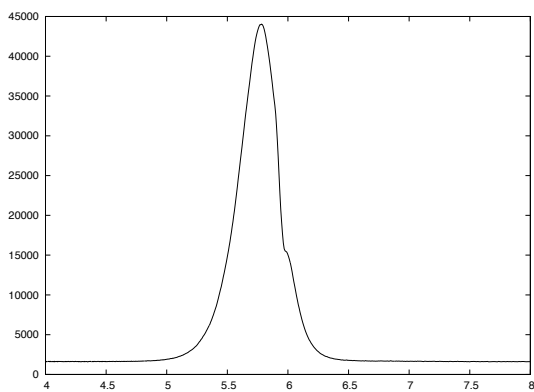
横軸は振動数  $\nu$  [ $\times 10^{14}\text{Hz}$ ], 縦軸はカウント数.



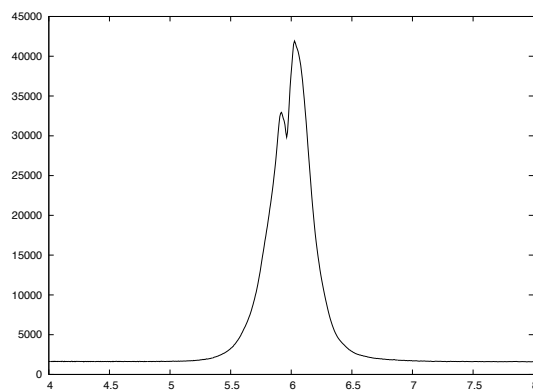
1.TLRE180AP (高輝度・赤)



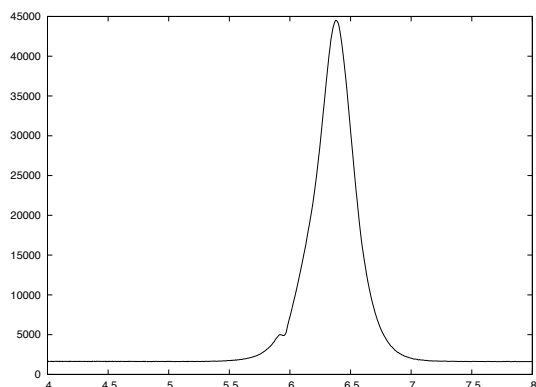
2.TLOH156P (高輝度・橙)



7.E1L53-3G (高輝度・緑) ( $I = 10[\text{mA}]$ )



8.E1L53-YC (高輝度・青緑) ( $I = 10[\text{mA}]$ )

9.E1L53-AB (高輝度・青) ( $I = 10[\text{mA}]$ )

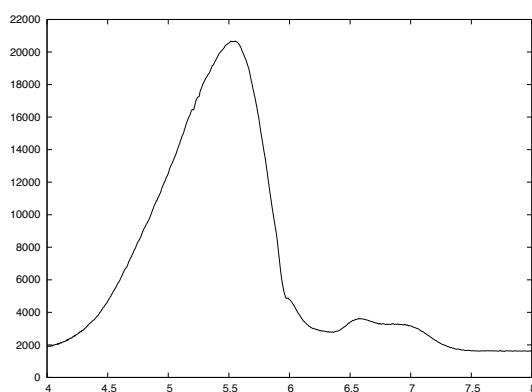
## 11.6 考察

- プランク定数は全ての LED からとても良い値が得られた。
- 東芝製の LED はわずかに Energy Loss が負になっている。ということは与えた電圧以上のエネルギーの光が出ているのだろうか？ LED 発光の原理をもっと知る必要がある。
- 豊田合成製の LED は Energy Loss が正になっているため、妥当と思われる。ただし、青より振動数の低い緑、青緑の電圧が上回っているのが気になる。振動数分布を見ると単純なピークになっていない (特に青緑) のでこれらは二次的な発光かもしれない。

## 11.7 おまけの実験

### 11.7.1 蛍光体による発光

- LED: 日亜化学工業 日亜 NSPY500S (レモン色)
- $V = 3.23[\text{V}]$ ,  $I = 20.1[\text{mA}]$

振動数分布  $\nu$  [ $\times 10^{14}\text{Hz}$ ]

青色 LED の発光を黄色蛍光体に当ててレモン色を出していると思われる。実際、電圧は青色 LED の場合の電圧に近いし、LED を見ると黄色蛍光体が見える。

## 12 ミリカンの実験

### 12.1 目的

ミリカンの実験で素電荷の精度を上げる。

## 12.2 概要

ミリカンの実験で学生実験用の装置を使って素電荷を求めてみた。大きめの素電荷が得られたので、これを Cunningham 補正を用いて補正して精度が上がるかを確認する。

## 12.3 実験装置

- ミリカン電気素量測定器 MLD-20 (島津理化製)
- 日清キャノーラ油
- デジタルマルチメータ

## 12.4 実験方法

実験テキスト参照。ただし、極板間電圧の測定はデジタルマルチメータを接続して行った。

## 12.5 実験結果

- 実験日: 2007年8月4日(土)
- 気温: 24 [°C]
- 気圧: 999.6 [hPa]
- 測定距離: 1.01 [mm]
- 重力加速度:  $g = 9.80$  [m/s<sup>2</sup>]
- 油の密度:  $\rho = 909$  [kg/m<sup>3</sup>] (日清キャノーラ油)
- 空気の粘性密度:  $\eta = 1.82 \times 10^{-5}$  [kg/m·s]
- 電極間距離:  $d = 5.00 \times 10^{-3}$  [m]
- 極板間電圧:  $V = 300$  [V]

### 測定距離について

実験したときは方眼紙の 1mm を PC 画面上で 73mm と見積もったが、方眼紙の線がくっきりしなかったため、後日、ステンレス製定規の 1mm で測ったら PC 画面上で 72mm と分かったため、補正をした。

回	$t_0$ [s]	$t_u$ [s]	$t_d$ [s]	$v_0$ [ $\mu\text{m/s}$ ]	$v_u$ [ $\mu\text{m/s}$ ]	$v_d$ [ $\mu\text{m/s}$ ]	$r$ [ $\mu\text{m}$ ]	$q_1$ [ $\times 10^{-19}$ C]	$q_2$ [ $\times 10^{-19}$ C]
1	28.16	44.73	10.90	35.9	22.6	92.7	0.575	1.92	1.89
2	25.80	91.47	10.45	39.1	11.0	96.7	0.600	1.72	1.84
3	37.81	27.95	10.69	26.7	36.1	94.5	0.496	1.78	1.85
4	27.76	58.47	11.20	36.4	17.3	90.2	0.579	1.78	1.78
5	27.11	59.80	11.43	37.3	16.9	88.4	0.586	1.81	1.76
6	15.81	62.71	7.09	63.9	16.1	142.5	0.767	3.50	3.47
7	31.90	47.26	11.17	31.7	21.4	90.4	0.540	1.64	1.72
8	35.03	33.03	11.01	28.8	30.6	91.7	0.515	1.75	1.80
9	26.67	68.75	11.33	37.9	14.7	89.1	0.590	1.77	1.75
10	29.27	41.28	11.07	34.5	24.5	91.2	0.563	1.90	1.86
平均							0.581	1.78	1.80
$\sigma$								0.08	0.06



$t_0$  : 自由落下時間     $t_u$  : 上昇時間     $t_d$  : 下降時間

$v_0$  : 自由落下速度     $v_u$  : 上昇速度     $v_d$  : 下降速度

※  $q_1$  と  $q_2$  の平均値と標準偏差  $\sigma$  は単位電荷に換算した値

- かかった時間
  - 自由落下時間と上昇時間だけの測定なら 30 分
  - 自由落下時間と上昇時間と下降時間の測定なら 60 分
  - $q_1$  を求めるだけなら計算時間 20 分

## 12.6 解析

油滴の半径

$$r = 3\sqrt{\frac{\eta v_0}{2\rho g}} \quad (26)$$

自由落下時間 + 上昇時間から求める電荷

$$q_1 = \frac{d}{V} 6\pi\eta(v_u + v_0) \quad (27)$$

上昇時間 + 下降時間から求める電荷

$$q_2 = \frac{d}{2V} 6\pi\eta(v_u + v_d) \quad (28)$$

$$3\sqrt{\frac{\eta}{2\rho g}} = 9.59 \times 10^{-5} \text{ [(m} \cdot \text{s)}^{1/2}] = 0.0959 \text{ [}(\mu\text{m} \cdot \text{s)}^{1/2}] \quad (29)$$

$$\frac{d}{V} 6\pi\eta = 5.71 \times 10^{-9} \text{ [C} \cdot \text{s/m}^2] = 5.71 \times 10^{-21} \text{ [C} \cdot \text{s}/\mu\text{m}^2] \quad (30)$$

## 12.7 考察

- 素電荷が大きめに出ている。
- 上昇時間が 60 秒くらいの上昇速度が遅い油滴を選んで観測したが、単位電荷の油滴だけである必要もない (差分が見ればよい) ので、上昇時間が 30 秒くらいのもので十分なのかもしれない。
- $v_u + v_d$  で求めた電荷の方が誤差は少ないようだが、大した差ではない。  $v_0$  や  $v_u$  が遅い場合はブラウン運動でふらふらしているように見える。下降時は  $v_d$  が速く、空気抵抗に対して動作が安定して落ちていくように見える。
- 自由落下時間と上昇時間だけの測定なら、油滴を上の方からでも下の位置からでも測定を開始できる。自由落下時間と上昇時間と下降時間の 3 つを測定する場合は、上の位置から始めないと効率が悪いので一度上の位置まで油滴を移動させる手間がかかる。
- $r$  を求めるのに電卓で間違いやすい。

$$r = 3\sqrt{\frac{\eta}{2\rho g}} \times \sqrt{v_0} \quad (31)$$

電卓で先に  $\sqrt{v_0}$  を計算して定数をかけなくてはならない。  $\sqrt{v_0}$  の計算棒を作るか  $r^2$  の計算をして  $r = \sqrt{r^2}$  としたらどうだろうか。

- 電荷の計算も  $v_0 + v_u$  を先に計算する必要があるので間違いやすい。
- 単位は m じゃなくて  $\mu\text{m}$  を使ったらどうだろうか。
- 装置のボタン操作にコツが必要。レバーはレバーを倒している間だけ電圧がかかる。レバー上で上昇、レバー下で下降。上昇ボタン、下降ボタンを押すと電圧がかかりっぱなしになる。この状態を解除するには同じボタンを押すか、レバーを倒す。自由落下ボタンは押しても何も変わらないので意味が無い。

- 現在の電圧の向きは油滴の動きを見て判断するしかないのがちょっと苦しい。

## 12.8 カニンガム補正 (Cunningham Slip Correction)

球状粒子 (油滴) の大きさが大気中気体の平均自由行程ほどの大きさになると, 粒子の表面で気体がスリップするために落下速度が変化し, Stokes の法則からのズレが大きくなるため補正が必要となる。

$$F = \frac{6\pi\eta r v}{C} \quad (32)$$

ここで  $C$  はカニンガム補正因子 (Cunningham correction factor) [3] と呼ばれるもので

$$C = 1 + \frac{l}{r} \left[ A + B \exp\left(-c\frac{r}{l}\right) \right] \quad (33)$$

で与えられる。  $l$  は平均自由行程,  $r$  は粒子の半径,  $A, B, c$  は実験的に決められるパラメーターである。

粒子の半径  $r$  を固定して気圧を変化させてみる。気圧が高くなると  $l$  が小さくなり,  $l/r \ll 1$  では  $C \simeq 1$  となるので本来の Stokes の法則になる。逆に気圧が低くなると  $l$  が大きくなり,  $l/r \gg 1$  では  $C \simeq (A+B)l/r$  となるから  $F \propto r^2$  となる。これは気圧が低くなると, 粒子に対する抵抗は粘性よりも気体分子が直接衝突する効果の方が大きくなるため, 粒子の断面積に抵抗が比例するからである。

以下に各文献で上げられているパラメーターを示す。

著者	$A$	$B$	$c$	粒子
Knudsen & Weber (1911) [4]	0.772	0.400	1.63	ガラスビーズ
Millikan (1924) [5]	0.864	0.29	1.25	油滴
Mattauch (1925) [6]	0.898	0.312	2.37	油滴 (窒素中)
Davies (1945) [7]	1.257	0.400	1.10	油滴

この中で Davies の値が推奨されているらしい。 Davies はそれまでの文献で示されているパラメーターを解析して平均値を出し, さらにそれらの文献中で使っていた平均自由行程の定義式

$$l = \frac{\eta}{0.3502\sigma\bar{c}} \quad (34)$$

のかわりに最新の定義 (Chapman & Enskog)

$$l = \frac{\eta}{0.499\sigma\bar{c}} \quad (35)$$

を使ってパラメーターの値を出した。ここで  $\sigma$  は媒質の密度,  $\bar{c}$  は気体分子の平均の速さ。

カニンガム補正を以前行った実験に適用する。パラメーターは Davies のものを用いるものとし, 大気中の気体 (1013 hPa, 293K) の平均自由行程は  $l = 6.80 \times 10^{-2} [\mu\text{m}]$  を使う。自由落下の式に補正を入れると

$$\frac{4\pi}{3} r'^3 \rho g = \frac{6\pi\eta r' v_0}{C} \quad (36)$$

$r'$  は補正後の  $r$  を表す。実験値から  $r$  の平均値  $0.58 [\mu\text{m}]$  を  $C$  に入れてみると

$$B \exp\left(-c\frac{r}{l}\right) = 3.4 \times 10^{-5} \ll 1.257 \quad (37)$$

指数項はほとんど効かないことが分かる。このため  $C$  は

$$C \simeq 1 + A\frac{l}{r} \quad (38)$$

と近似して良い。  $r'$  について解くと

$$r' = -\frac{Al}{2} + \sqrt{\left(\frac{Al}{2}\right)^2 + r^2} \quad (39)$$

となる.

電荷を求める式も補正を入れて

$$q' = \frac{d}{V} \frac{6\pi\eta r'(v+v_0)}{C} = q \frac{r'}{r} \frac{1}{C} \quad (40)$$

これから電荷を求めると以下の様になった.

回	$r$ [ $\mu\text{m}$ ]	$r'$ [ $\mu\text{m}$ ]	$C$	$q_1$ [ $\times 10^{-19}$ C]	$q'_1$ [ $\times 10^{-19}$ C]
1	0.574	0.534	1.16	1.92	1.54
2	0.600	0.559	1.15	1.72	1.39
3	0.496	0.455	1.19	1.78	1.37
4	0.579	0.538	1.16	1.78	1.43
5	0.586	0.545	1.16	1.81	1.45
6	0.767	0.725	1.12	3.50	2.95
7	0.540	0.499	1.17	1.64	1.30
8	0.515	0.474	1.18	1.75	1.36
9	0.590	0.549	1.16	1.77	1.42
10	0.563	0.522	1.16	1.90	1.52
平均				1.78	1.43
誤差				11.3%	-10.6%

$q_1$  は補正前の電荷,  $q'_1$  は補正後の電荷である.

補正が効き過ぎて求めた電荷が小さくなる結果となった.

## 参考文献

- [1] Wikipedia, URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Cunningham\\_correction\\_factor](http://en.wikipedia.org/wiki/Cunningham_correction_factor)
- [2] H. R. Pruppacher and J. D. Klett, Microphysics of Clouds and Precipitation (Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, Vol 18), Kluwer Academic Pub, p450.
- [3] E. Cunningham, Proc. Roy. Soc. A **83**, 357 (1910).
- [4] M. Knudsen and S. Weber, Ann. Phys. **36**, 982 (1911).
- [5] R. A. Millikan, Phys. Rev. **22**, 1 (1924).
- [6] J. Mattauach, Z. Phys. **32**, 439 (1925).
- [7] C. N. Davies, Proc. Phys. Soc. **57**, 259 (1945).

