# 実験結果

## 偏光

　偏光角を0°～90°に変えていき、その時の光センサーの出力の数値及び透過率を表1に示す。ただし、透過率は偏光角θのとき、



で、算出した。偏光角と透過率の関係を別紙グラフ1に描いた。

表1：偏光角と透過率の関係

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 偏光角 | 1回目 | | 2回目 | | 3回目 | |
| 出力/V | 透過率 | 出力/V | 透過率 | 出力/V | 透過率 |
| 0° | 1.28 | 1.00 | 1.27 | 1.00 | 1.29 | 1.00 |
| 10° | 1.32 | 1.03 | 1.39 | 1.09 | 1.38 | 1.07 |
| 20° | 1.33 | 1.04 | 1.41 | 1.11 | 1.43 | 1.11 |
| 30° | 1.29 | 1.01 | 1.35 | 1.06 | 1.36 | 1.05 |
| 40° | 1.15 | 0.898 | 1.19 | 0.937 | 1.20 | 0.930 |
| 50° | 0.950 | 0.742 | 0.954 | 0.751 | 1.01 | 0.783 |
| 60° | 0.758 | 0.584 | 0.749 | 0.598 | 0.755 | 0.585 |
| 70° | 0.492 | 0.384 | 0.482 | 0.380 | 0.505 | 0.391 |
| 80° | 0.289 | 0.226 | 0.265 | 0.209 | 0.294 | 0.228 |
| 90° | 0.168 | 0.131 | 0.169 | 0.133 | 0.170 | 0.132 |

## 反射率

　レーザーの偏光方向が実験台の面に垂直（S波）の場合に、入射角を0°～90°まで変えたときの光センサーの出力の数値及び反射率を表2に示す。また、偏光方向が実験台の面に平行（P波）の場合に、入射角を0°～90°まで変えたときの光センサーの出力の数値及び反射率を表3に示す。ただし、反射率は入射角θのとき、



で、算出した。それぞれの場合について、入射角と反射率の関係を別紙グラフ2に描いた。

表2：S波の場合の、入射角と反射率の関係

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 入射角 | 1回目 | | 2回目 | |
| 出力/V | 反射率 | 出力/V | 反射率 |
| 10° | 0.060 | 0.0236 | 0.013 | 0.00512 |
| 20° | 0.118 | 0.0465 | 0.092 | 0.0362 |
| 30° | 0.147 | 0.0579 | 0.132 | 0.0520 |
| 40° | 0.174 | 0.0685 | 0.178 | 0.0701 |
| 50° | 0.267 | 0.105 | 0.257 | 0.101 |
| 60° | 0.382 | 0.150 | 0.395 | 0.156 |
| 70° | 0.710 | 0.280 | 0.610 | 0.240 |
| 80° | 1.24 | 0.488 | 1.17 | 0.461 |
| 90° | 2.54 | 1.00 | 2.54 | 1.00 |

表3：P波の場合の、入射角と反射率の関係

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 入射角 | 1回目 | | 2回目 | |
| 出力/V | 反射率 | 出力/V | 反射率 |
| 10° | 0.100 | 0.0392 | 0.089 | 0.0349 |
| 20° | 0.090 | 0.0353 | 0.092 | 0.0361 |
| 30° | 0.076 | 0.0298 | 0.056 | 0.0220 |
| 40° | 0.054 | 0.0212 | 0.056 | 0.0220 |
| 50° | 0.034 | 0.0133 | 0.036 | 0.0141 |
| 55° | 0.034 | 0.0133 | 0.034 | 0.0133 |
| 60° | 0.048 | 0.0188 | 0.045 | 0.0176 |
| 70° | 0.156 | 0.0612 | 0.145 | 0.0569 |
| 80° | 0.571 | 0.224 | 0.612 | 0.240 |
| 90° | 2.55 | 1.00 | 2.55 | 1.00 |

## レーザーの波長

　金尺の溝dが0.5mm、1.0mmのそれぞれの場合において、ととの関係を表4に示す。また、を横軸、を縦軸にとったグラフを別紙グラフ3に載せた。

表4：ととの関係

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| d=1.0mm | | | | | |
| A; L=855mm | | | B; L=905mm | | |
|  | /mm | /mm |  | /mm | /mm |
| 0 | 53 | 0 | 0 | 60 | 0 |
| 1 | 66 | 858 | 1 | 74 | 1036 |
| 2 | 77 | 1848 | 2 | 84 | 2016 |
| 3 | 85 | 2720 | 3 | 94 | 3196 |
| 4 | 93 | 3720 | 4 | 101 | 4141 |
| 5 | 99 | 4554 | 5 | 108 | 5184 |
| 6 | 106 | 5618 | 6 | 114 | 6156 |
| 7 | 111 | 6438 | 7 | 120 | 7200 |
| 8 | 116 | 7308 | 8 | 126 | 8316 |
| 9 | 122 | 8418 | 9 | 132 | 9504 |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| d=0.5mm | | | | | |
| C; L=870mm | | | D; L=920mm | | |
|  | /mm | /mm |  | /mm | /mm |
| 0 | 82 | 0 | 0 | 77 | 0 |
| 1 | 102 | 2040 | 1 | 98 | 2058 |
| 2 | 116 | 3944 | 2 | 115 | 4370 |
| 3 | 129 | 6063 | 3 | 129 | 6708 |
| 4 | 140 | 8120 | 4 | 140 | 8820 |
| 5 | 150 | 10200 | 5 | 151 | 11174 |
| 6 | 158 | 12008 | 6 | 161 | 13524 |
| 7 | 167 | 14195 | 7 | 169 | 15548 |
| 8 | 175 | 16275 | 8 | 178 | 17978 |
| 9 | 182 | 18200 | 9 | 186 | 20274 |

# 考察

## 偏光

### 透過率の理論値について

光の場合、光の進行方向とその電界の大きさと向きを図示すると図1のようになる。隣り合う山と山の距離を波長λ、山の高さを振幅E、1回振動するのに要する時間を周期T、１秒間あたりの振動の回数を振動数ｆという。ここで、波の伝わる速さをυとすると、



と表せる。また、図1において波の振幅Eは電界の大きさを表していて、光強度*Ｉ*は振幅の２乗に比例する。



図1：光の進行方向と電界

　この場合、波の振動の方向は、波の進行方向に対して垂直であればよいので、いろいろな方向を取ることができる。この中でも、ある特定の向きだけに振動している波のことを偏光した波といい、この振動している方向を偏光方向、あるいは偏光軸という。

ある特定の偏光方向の光だけを通す性質を持った素子を偏光板という（図2；電界の振動する方向を矢印で表した）。偏光板は、決まった向き（透過容易方向）に振動している光は通すが、そうでない向きの偏光は通さない。光は一般にあらゆる方向の偏光を含んでいるが、この偏光板を通った光はある特定の方向に偏光した光だけになる。よって、2枚の偏光板を偏光軸が直角になるよう置くと光は通らなくなる。

図2：偏光板の働き

任意に偏光した光の電界は偏光軸とそれに垂直な電界に分解できる。2枚の偏光板を用いて光の偏光を観察する場合、1枚目の偏光板を通った光の電界は2枚目の偏光板の軸に平行な成分と垂直な成分に分けることができる。平行成分だけが2枚目の偏光板を通ることができ、電界の大きさはとなる（図3）。光強度は電界の大きさの2乗に比例するから、θだけ傾けた偏光板を通った後の光強度を*I*、最初の偏光板を通った後の光強度を*I*0とすると、





という関係となる。よって、透過率の理論値は





となる。

図3：電界の分解

### 透過率の実験値と理論値の比較

　以上のように透過率の理論値をそれぞれ計算し、実験値と比べた（表5）。

表5：透過率の実験値と理論値

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 偏光角 | 実験値 | | | 理論値 |
| 1回目 | 2回目 | 3回目 |
| 0° | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 10° | 1.03 | 1.09 | 1.07 | 0.970 |
| 20° | 1.04 | 1.11 | 1.11 | 0.883 |
| 30° | 1.01 | 1.06 | 1.05 | 0.750 |
| 40° | 0.898 | 0.937 | 0.930 | 0.587 |
| 50° | 0.742 | 0.751 | 0.783 | 0.413 |
| 60° | 0.584 | 0.598 | 0.585 | 0.250 |
| 70° | 0.384 | 0.380 | 0.391 | 0.117 |
| 80° | 0.226 | 0.209 | 0.228 | 0.0302 |
| 90° | 0.131 | 0.133 | 0.132 | 0 |

　理論値は、偏光角を0～90°と変えていくと、徐々に光を通す量が減っていき、偏光角=90°では完全に光を通さなくなってしまう。しかし実験値は、1～3回目を通して、偏光角=10～30°で1.0を上回り、その後単調減少し、最後、偏光角=90°では0.13程度に落ち着いた。理論上この実験で透過率が1.0を上回ることはありえない。それにも関わらず、このような実験結果が出てしまったのは、実験室の明かりの影響が大きいと考えられる。したがって、実験装置の周りの電気は消し、レーザー以外の光は完全に遮断することによって、より正確な実験結果が得られると思われる。また、3回の実験を行った結果がこれほどずれてしまったのは、以下のような要因が考えられる。

* 偏光角の調節を手動で行った。
* 光センサーで光を受ける際、光をすべて拾えたとは言えない。
* 偏光板と光センサー間の距離やその場所の違いによって、吸収する周りの光の量が異なった。

3つのデータを比べて、理論値に1番近かったのは1回目のデータなので、1回目の実験が最も精度良く行えたと言える。

## 反射率

### S波とP波のふるまいの違いについて

　光の反射は、入射光の振動面が入射面と垂直な波（S波）と、入射光の振動面が入射光と平行な波（P波）とによって違いがあらわれる。媒質aの屈折率を、媒質bの屈折率をとし、媒質aから媒質bへの入射角をα、媒質aから媒質bへの屈折角をβとすると（図4）、フレネルの公式より、





となる。ただし、ここではS波の振幅反射率、はP波の振幅反射率をあらわす。光強度*I*は振幅Aの2乗に比例するから、反射率はそれぞれ、





となる。ここで、スネルの法則



を用いると、





と変形することができる。また、媒質aを空気（屈折率1）、媒質bをガラス（屈折率n）とし、入射角をθとすると、





となる。

以上より、入射角と反射率の関係をグラフにした場合、P波とS波のふるまいには違いが見られたのである。グラフ2から分かるように、RSは入射角が大きくなると単調に増大するのに対して、RPは入射角が増大するといったん減少し、その後増大する。また、入射角90°では、RSもRPも1となる。

図4：入射光の反射と屈折

### ブリュースター角の理論式について

グラフ2のRPは、入射角が55°付近でほとんど0となる。このように反射率の消失する入射角のことをブリュースター角という。ブリュースター角は、



の時の角度である。これより



を満たす角であることが分かる。また、媒質aを空気（屈折率1）、媒質bをガラス（屈折率n）とし、入射角をθとすると、



を満たす角のことであるとも言える。

### 実験値と理論値の比較

グラフ2より、ブリュースター角の実験値は、1回目が50～55°の間、2回目が55°付近であると見積もれる。また、今回用いた半導体レーザーの波長は約670nmであることを考えて、ガラスの屈折率n=1.46（波長=656.3nm，温度=18℃の時の石英ガラスの屈折率）とすると、ブリュースター角の理論値は55～56°の間である（表6）。

表6：ブリュースター角の実験値と理論値

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 実験値 | | 理論値 |
| 1回目 | 2回目 |
| 50～55° | 55° | 55～56° |

実験値と理論値は近い値となった。この誤差は、

* 反射率測定の際の誤差
* ブリュースター角の実験値を目分量によって見積もった際の誤差
* ブリュースター角の理論値を算出する際の、ガラスの屈折率の誤差

などによるものであると考えられる。

　また、ガラスの屈折率n=1.46（波長=656.3nm，温度=18℃の時の石英ガラスの屈折率）とすると、反射率の理論値は表7および表8のように算出される。また、入射角と反射率の理論値との関係を表したグラフはグラフ3のようになる。

表7：S波の場合の、反射率の実験値と理論値

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 入射角 | 実験値 | | 理論値 |
| 1回目 | 2回目 |
| 10° | 0.0236 | 0.00512 | 0.0360 |
| 20° | 0.0465 | 0.0362 | 0.0408 |
| 30° | 0.0579 | 0.0520 | 0.0505 |
| 40° | 0.0685 | 0.0701 | 0.0681 |
| 50° | 0.105 | 0.101 | 0.100 |
| 60° | 0.150 | 0.156 | 0.161 |
| 70° | 0.280 | 0.240 | 0.281 |
| 80° | 0.488 | 0.461 | 0.520 |
| 90° | 1.00 | 1.00 | 1.00 |

表7：P波の場合の、反射率の実験値と理論値

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 入射角 | 実験値 | | 理論値 |
| 1回目 | 2回目 |
| 10° | 0.0392 | 0.0349 | 0.0331 |
| 20° | 0.0353 | 0.0361 | 0.0287 |
| 30° | 0.0298 | 0.0220 | 0.0214 |
| 40° | 0.0212 | 0.0220 | 0.0118 |
| 50° | 0.0133 | 0.0141 | 0.00230 |
| 55° | 0.0133 | 0.0133 | 0.00003 |
| 60° | 0.0188 | 0.0176 | 0.00245 |
| 70° | 0.0612 | 0.0569 | 0.0444 |
| 80° | 0.224 | 0.240 | 0.239 |
| 90° | 1.00 | 1.00 | 1.00 |



理論値と2回の実験を行った結果がこれほどずれてしまったのは、以下のような要因が考えられる。

* 反射板の調節を手動で行った。
* 光センサーで光を受ける際、光をすべて拾えたとは言えない。
* 半導体レーザー、反射板、光センサーの距離やその場所の違いによって、吸収する周りの光の量が異なった。
* 反射率の理論値を算出する際、ガラスの屈折率は近似値を用いた。

2つのデータを比べると、S波の場合は1回目のほうが理論値に近く、より正確に実験でき、P波の場合は2回目の方が理論値に近く、より正確に実験できたと言える。

## レーザーの波長

### レーザーの波長の算出

図5のように、ヘリウム・ネオンレーザー光を金尺のメモリのついた部分に、入射角が90°に近くなるように当て、L離れたスクリーンに輝点を映し出す。金尺がないときにレーザー光の当たる点をOとして、1番明るい輝点から順にその位置をl0、l1、l2・・・とする。また、図6のように金尺の目盛の間隔をｄとし、入射光と反射光が反射面とそれぞれα、βの角をなすときを考える。このとき、隣り合う2つの光路1-1’と2-2’の光路差Dは



である。ここで、ｘ（単位はrad）が1に比べて十分小さいとき、



であるから、αとβが小さいとき光路差Dは



と、近似できる。光路差が波長λの実数倍に等しいとき、反射光は互いに強め合って干渉し、スクリーン上に輝点を生じる。したがって、回折光の角βmは



（1）

を満たす。図5より



（2）

である。特にβ0=αであるから、（2）式より、



（3）

となる。（2）式と（3）式より、



（4）

となり、（2）式と（4）式を（1）式に代入すると、



（5）

を、近似式として得る。

図5：レーザーの波長の測定

図6：金尺部分の拡大図

（5）式を変形すると、



となり、この式はグラフ2の直線の式を表している。したがって、直線の傾きaは、



である。ここで最小自乗法より、未定定数aの推定値<a>は、



となることを用いて、波長λを算出する。また、<a>の標準偏差σ<a>は、



である。ここで、物理量ｙ（今回の場合は）の実験標準偏差σyは、n個の残差δk=ｙk－ａを用いて、



となる。これより、不確かさの伝播則



を用いて、波長λの標準偏差σλを求めた。以上の結果を表8に載せた。

表8：レーザーの波長

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | A | B | C | D |
| d/mm | 1.0 | 1.0 | 0.5 | 0.5 |
| L/mm | 855 | 905 | 870 | 920 |
| <a> | 929.6 | 1043 | 2027 | 2253 |
| σ<a> | 7.4 | 8.0 | 7.9 | 15 |
| λ/nm | 635.8 | 637 | 669.5 | 665.6 |
| σλ/nm | 5.0 | 4.9 | 2.6 | 4.3 |

### レーザーの波長の実験値と理論値の比較

レーザーの波長の実験値と理論値をまとめた（表9）。ただし、今回使用したヘリウム・ネオンレーザーの波長は632.8nmであり、これを理論値とした。また、精度は、



によって、求めた。

表9：レーザーの波長の実験値と理論値

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 実験値 | | | | 理論値 |
| A | B | C | D |
| λ/nm | 635.8±5.0 | 637.0±4.9 | 669.5±2.6 | 665.6±4.3 | 632.8 |
| 精度/％ | 0.47 | 0.66 | 5.8 | 5.2 | - |

実験値Ａ、Ｂについては、実験値と標準偏差の間に理論値が含まれ、また、精度も0.5％程度と信用できる結果となった。実験値Ｃ、Ｄについては、実験値と標準偏差の間に理論値が含まれてなく、精度は5％程度と、あまりいい結果とは言えなかった。これより、d=1.0mmの方がd=0.5mmに比べて、より正確に測定できることが分かった。

ここで誤差考察をする。

ⅰ）λの式が近似式である。

λの近似式を出す際に、角度α、βが極小であると近似した。これはＬをできるだけ大きくして、金尺の角度をできるだけ水平にすることで解消されるよう努力した。

ⅱ）Ｌの長さを目分量で測り、5mm単位で表した。

Ｌの長さはスクリーンから金尺上の反射点までの距離であるが、反射点が横に広がってしまったため、だいたいの値とするのがやむをえなかった。ここで、Ｌの長さを1mmずつかえて、それによってλの実験値がどのように変化するかを、実験値Aを用いて計算した（表10）。

表10：Ｌの長さと波長λ

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| L/mm | λ/nm | σλ/nm |
| 850 | 643.3 | 5.1 |
| 851 | 641.8 | 5.1 |
| 852 | 640.3 | 5.1 |
| 853 | 638.8 | 5.1 |
| 854 | 637.3 | 5.0 |
| 855 | 635.8 | 5.0 |
| 856 | 634.4 | 5.0 |
| 857 | 632.9 | 5.0 |
| 858 | 631.4 | 5.0 |
| 859 | 630.0 | 5.0 |
| 860 | 628.5 | 5.0 |

今回理論値は632.8nmだから、Ｌの値が854mm～860mmの範囲では実験値と標準偏差の間に理論値が含まれ、より理論値に近い値となったのはL=857mmであった。Lの値を1mm変えてもλの実験値は約1.5nmしか変化しないので、5mm単位で測定することは許容の範囲であると言える。

ⅲ）輝点の広がりに対して、その中心を目分量で決め、測定した。

スクリーンに映る輝点は横に広がりを持っていたため、輝点の中心を目分量ではかり、その点を用いてを測定するしかなかった。ここで、の長さを1mmずつ変えて、それによってλの実験値がどのように変化するかを、実験値Aを用いて計算した（表11）。

表11：の長さと波長λ

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| /mm | λ/nm | σλ/nm |
| 52 | 642.8 | 4.2 |
| 53 | 635.8 | 5.0 |
| 54 | 628.9 | 7.4 |
| 55 | 621.9 | 10.4 |

今回理論値は632.8nmだから、の値が53～54mmの範囲では実験値と標準偏差の間に理論値が含まれていた。の値が1mm変わるとλの実験値は約7nm変化し、誤差が生じる。また、この表ではの長さのみを変えただけであり、、・・・とそれぞれの値が少しずつ変化すると、誤差は大きく出ることが予想される。そして、d=1.0mmのときはd=0.5mmのときに比べて、輝点の広がりが小さかったことを考慮すると、d=1.0mmの方がd=0.5mmに比べて、より正確に測定できたことも理解できる。

# 結論・感想

## 偏光

* 偏光角θが大きくなるにつれて透過率は小さくなる。
* θ=0°のときはすべての光を通し、θ=90°のときは光を全く通さない。

## 反射率

* P波にはブリュースター角があるのに対し、S波にはブリュースター角がない。
* ブリュースター角では反射率は０になる。
* ガラス板のブリュースター角は約55°である。

## レーザーの波長

* ヘリウム・ネオンレーザーの波長はλ=(635.8±5.0)nmである。
* 波長の実験値は、Lの長さには左右されにくいが、の長さには左右されやすい。
* ｄの長さは0.5mmより1.0mmの方が正確に実験できる。

# 参考文献

* 慶應義塾大学理工学部，理工学部1年 自然科学実験 物理編 2007，p.12-13,22-25,57-59,86，2007年
* 山口重雄，物理学One Point-14 屈折率，p.53,58-60,124，1981年
* 株式会社ルケオ，“偏光-1”，偏光板・円偏光板・波長板・歪検査器‐製造・販売‐，入手先 http://www.luceo.co.jp/m-k/henkou1.htm，（参照 2008/01/10）