

2024年版実験キットのための実験指導の手引き (教員向け資料)

はじめに

第2 チャレンジ・コンテストで使用した実験キットは、高校生や教員を対象とした実験講座で使用するとともに、一部は希望者に配布されている。しかし、コンテスト問題の文章は試験を目的に作成されているため、これらの実験キットを教育現場で使用するにあたって参照するものとして、必ずしも適切な書き方になっているとは言い難い。どの課題も問題文に忠実に従えば実験は正しく実行できるはずであるが、実験手順や注意事項の根拠が分かりにくいところや、逆に未経験者を想定しているために冗長になっている部分もある。そこで、実験キットを学習に使用するため、あるいは学習指導に利用する方のための補足資料として、この「実験指導の手引き」を執筆した。実験キットを有効に利用し、物理教育の推進と普及に役立てていただければ幸いである。

目次

課題1 光の回折と構造解析への応用

課題2 偏光と偏光板の働き

課題3 光弾性効果による歪みの可視化

各課題に以下のような項目を設けて説明を加えている。

1. 課題作成の背景、ねらい
2. 実験装置の概要
3. 実験に必要な環境と機器など
4. 安全管理上の注意
5. 解説と補足
6. 課題の再構成、短縮版作成へのヒント
7. 発展課題へのヒント

※生徒の力量や実験の時間に合わせて、問題文のワードファイルから適当に設問をカットして綴り合せれば、最適化したテキストが作成できる。改作へのヒントを項目6, 7に掲載しているので参考にしてください。

編集用問題文・解答用紙 (マイクロソフトワード版)

問題文： 2024-Problems-exp123.docx

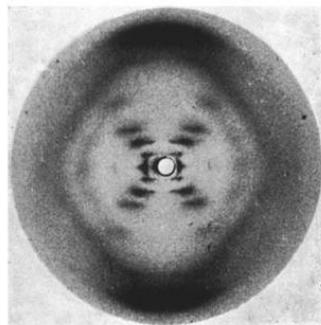
解答用紙：2024-Answersheet-exp123.docx

2024年版実験キットのための実験指導の手引き (教員向け資料)

課題1：光の回折と構造解析への応用

1. 課題作成の背景, ねらい

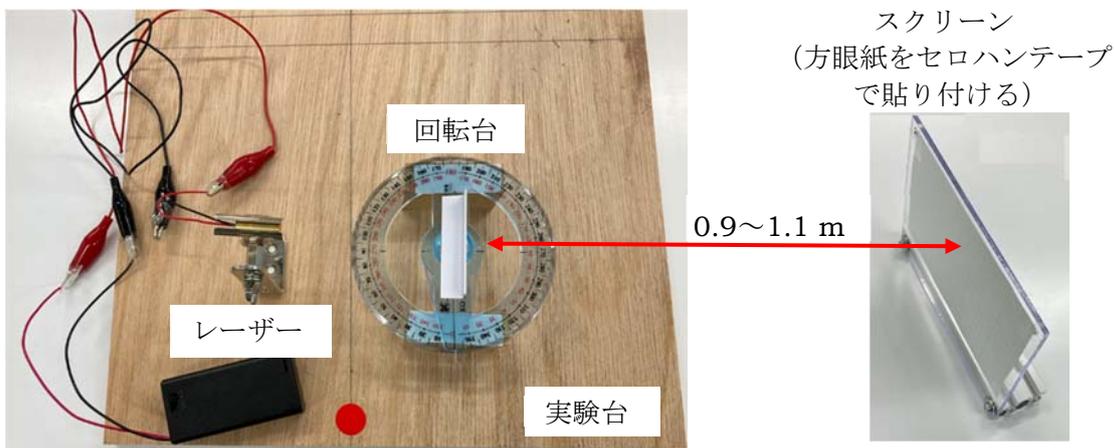
光の回折の実験を肉眼で大きさが確認できる構造で行うことで回折・干渉を定量的に理解し、X線回折の基礎となる構造解析を行ってもらうことを目的としている。さらに、未知構造としてDNAの2重らせん構造の解明につながったフランクリンとゴスリンのX線回折像(図A)と似た回折像が得られる構造を用意している。



図A DNAのX線回折像
R. E. Franklin and R. G. Gosling,
Acta Cryst. 6, 673 (1953).

2. 実験装置の概要

光学実験装置(図B)は、レーザー、スライドをのせる回転台、スクリーンの3点だけであり、設置は簡単である。机に粘着テープで直接取り付けてよい場合は、実験台は必要ない。レーザーの焦点調整は少し難しいので、授業に用いる場合はあらかじめ調整しておくとうい。



図B 課題1の準備が終了した状態。

3. 実験に必要な環境と機器など

光の実験なので部屋の照明は余り明るくない方がよい。明るすぎる場合は、課題2,3で用いる遮光箱をスクリーン部分にかぶせるとよい。

実験に使う机は幅が1m以上あったほうがよい。スクリーンまでの距離を十分とれない場合は

輝点間隔が狭くなり読み取りにくくなるが、実験の本質には影響しない。教室でのデモ実験などでスクリーンまでの距離を長くする場合は、付属の半導体レーザーでは焦点調整が困難と思われるのでヘリウムネオンレーザーなどの指向性が高いレーザーを用いた方がよい。ただし、輝点の広がり小さいので遠くからの確認は困難である。

スクリーン上の輝点間隔を読み取るための方眼紙が必要である（使い残したものがキットに入っている場合もある）。単三の乾電池を 2 本使用する。課題 1 で使用する部品の詳細は問題冊子の 4,5 ページに掲載されている。

4. 安全管理上の注意

用いるレーザーの出力は 1 mW 以下（クラス 2）であり、まばたきなどの反射行動で眼を保護できる。しかし、教育的観点から保護メガネ（図 C）を用意してある。授業では以下のような指導をすることが望ましい。

- ・この実験で用いるレーザーは十分に安全であるが、この機会にレーザーを安全に扱う方法を学ぶ。
- ・レーザーの調整をするときは保護メガネをかける。
- ・レーザーを直接のぞき込まない。
- ・グループで実験する場合は 1 人ずつ調整を行う。2 人以上が同時に調整を行うと連携ミスで事故が起こる可能性がある。
- ・この実験で用いるレーザーは弱いので調整終了後は保護メガネをはずしてよい。



図 C 保護メガネ
可視光透過率 10%の簡易的なもの。眼鏡の上からかけることができる。1 個 1000 円以下で購入できる。

5. 解説と補足

テキストに忠実に従えば実験は正しく実行できるはずであるが、理論などにわかりにくい部分もあるので、問題文にしたがって補足を記す。

【課題の解説】

スライドに描かれた構造を決定するために必要な理論が説明されている。ほとんどの教科書では構造が与えられており、回折された光が強められる条件が記述されている。この課題は輝点位置を測定して構造を決めるという逆方向の実験である。この違いを理解してもらうことが重要である。

消滅則は波の重ね合わせによる弱め合いの条件になる。実験を始める前には強め合いと弱め合いが起こるといふ定性的な理解があれば十分である。この課題では輝点消滅と p の関係を実験的

に求めているが、補足 1 ではこの関係が理論的に導けることを示している。

この実験の特徴はスライドを回転することで、その構造を変化させていることである。この方法が有効なのは、回折角が十分に小さい条件では z 方向（奥行）の違いが影響を与えないためである。しかし、立体構造を平面構造に置き換えてよいという考えは受け入れにくい場合がある。補足 2 には数式による説明がなされているが、図 D のように斜め入射の場合と比較するののも一つの説明方法である。間隔が d の回折格子に光が角度 ϕ で入射して角度 $\phi + \theta$ の方向に回折された場合の光路差は、入射側と出射側の光路差の差となるので

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

が強め合いの条件となる。 θ が十分小さいときは

$$\sin(\phi + \theta) = \sin \phi \cos \theta + \cos \phi \sin \theta \approx \sin \phi + \cos \phi \sin \theta$$

より、強め合いの条件は

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

となる。この式は間隔 $d \cos \phi$ の回折格子に光が垂直に入射して角度 θ の方向に回折された場合と同じであり、問題文にあるように z 方向の位置の違いを無視できることを示している。

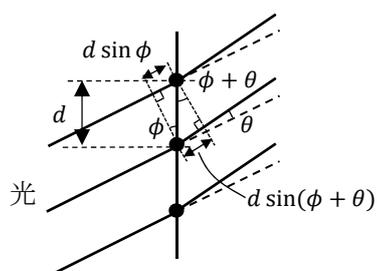


図 D 回折格子に角度 ϕ で入射した光が角度 $\phi + \theta$ の方向に回折される様子

【課題の準備】

「実験台」は合板製で、この上に光学系を組み立てることになっているが、机の上に直接両面テープで固定することが許されるならそれでもよい。項目 11 のレーザーの焦点調整には専用の治具を用いるが、噛み合わせの溝が浅いので少々回しづらいかも知れない。

安全面では、焦点を調整する手順がレーザー光をのぞき込む可能性が最も高い。あらかじめ調整しておけば、焦点調整は省略することができる。

問 1-1a

スライド A の平行線間隔を自分の眼で確認してもらうことが目的である。結果を与えてしまつて問 1-1b から始めても支障はない。

ここで求めた d を問 1-1c の実験条件と誤認してしまう例が多くみられる。ここでは d を d' のように別の文字に置き換えて、問 1-1c とは別であることを明確にするとよい。

問 1-1b

今後の実験の基準となる数値を測定する。スクリーンまでの距離は 70~120 cm ぐらいの間であればよく、測定精度も 1 cm ぐらいで十分である。角度の測定精度も 1° ぐらいで十分である。

問題文の指示にしたがえば α_0 は 0° に近いはずである。大きく違っていても原理上は実験に支

障はないが、回転台の使い方や反射光の観察方法をわかっていない場合があるので注意が必要である。

問 1-1c

この課題の d として問 1-1a で測定した値を使うものと誤解している場合が見られる。測定で得られる値は、距離 L と輝点間隔 x_S であり、測定条件 ϕ と波長 λ は与えられている。解析に用いる式は $d_\phi = L\lambda/x_S$ と $d = d_\phi/\cos\phi$ である。この関係式をテキストから導くことが難しい場合は、予め与えておいた方がよい。

レーザー光のスポットが約 1 mm あるので、中心を読み取っても 0.5 mm ぐらいの誤差が生じる。部屋を少し暗めにすれば中央から 4~5 番目の輝点まで見えるので、できるだけ離れた輝点を利用して間隔を読み取るとよい。輝点位置を読み取りにくい場合は、虫メガネを使うとよい。

問 1-2b

まず、回転台を $\pm 30^\circ$ ぐらい回して輝点の消滅が起きることを確認した方がよい。測定点は数個あれば十分なので、角度の正側で 2~3 点、負側で 2~3 点読み取れば十分である。明るい環境では完全に消滅した角度を決めるのは困難なので、輝点が見える状態からスライドを回していき、消滅してから同じ明るさに回復したときの中間を消滅した角度とする方法もある。

N の割り当て方法は理解しにくいですが、式(1-5)と式(1-6)の関係式から a, b を $a > 0$ かつ $0 < b < d$ の範囲で求めるために指定したものである。表 A のように実例を示すか、表 B のように測定手順で N を指定するのが望ましい。表 B の方法では、 $N=0$ が $|\tan\phi|$ が最小の点にならない場合もあるが、問 1-2c で得られる b は $(-d < b < d)$ の範囲に収まる。

表 A N の割り当てを示す例 ($\alpha_0 = 3^\circ$ の例, 角度は実際とは異なる)

$\alpha / ^\circ$	$\phi / ^\circ$	$\tan\phi$	N
7	4	0.070	0
18	15	0.268	-1
-3	-6	-0.105	1
-10	-13	-0.231	2
-22	-25	-0.466	3

表 B 測定手順を指定して N を割り当てる場合 ($\alpha_0 = 3^\circ$ の例, 角度は実際とは異なる)

測定手順	N	$\alpha / ^\circ$	$\phi / ^\circ$	$\tan\phi$
α_0 から 正の方向	0	7		
	1	18		
	2	30		
α_0 から 負の方向	-1	-3		
	-2	-10		
	-3	-22		

グラフを作ってみると直線から外れている場合がある。その原因の一つとして消滅する角度を見逃してしまった場合がある。消滅する角度は等間隔に近いので、見逃した角度は容易にわかる。見逃した角度の N の割り当てを飛ばすか、再測定を行うとよい。

問 1-2c

グラフの直線は $N = -\frac{a}{d} \tan \phi + \frac{b}{d} - \frac{1}{2}$ なので、傾きと切片を読み取って a, b を求める。横軸と縦軸の関係が逆のグラフを作っている場合は注意が必要である。 a がほぼスライドの枠の厚さ (2 mm 程度) になることは見た目にも明らかなので、大きく違う結果となっている場合に自分からミスに気づくことができるかもポイントとなる。

問 1-2d

$0 \leq |r - N| < 1/2$ となることを問題文から読み取って、 N の割り当てを行う。消滅する角度の見逃しがなければ、同じ N に 2 つの角度がある ($r - N$ の正負)。測定精度が悪いと 0.25 から大きくずれる場合もあるが、平均をとれば整数分の 1 の値としては 1/4 が最も近くなるはずである。

問 1-3

問 1-1, 1-2 の結果を基にして、論理的に構造決定を行うことが目的である。決定した根拠を適切に説明することを求めている課題である。

スライド B の構造は DNA らせん構造に類似したものである (図 E)。ただし、2 本目の位置は問 1-2d の結果と同じ 1/4 にしている。DNA は約 3/8 であるが、以下の理由で 3/8 とはしなかった。(1) 3/8 の場合は中央から 3 番目の輝点消滅となりわかりにくい。(2) 1/8 と 3/8 は消滅する輝点位置が同じであり、区別するには輝点の明るさの違いを議論する必要がある。

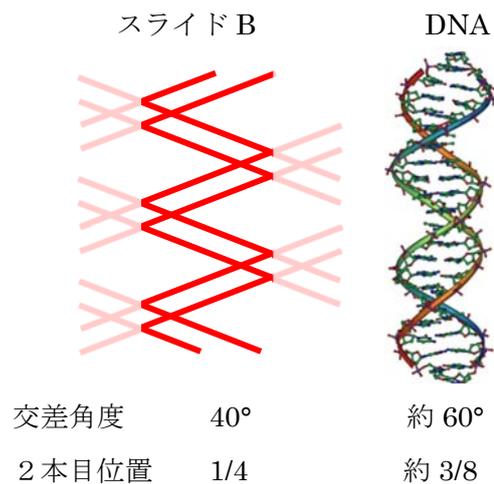


図 E

6. 課題の再構成, 短縮版作成へのヒント

光の実験は慣れが必要な部分もあり測定に必要な時間にはかなり個人差がある。しかし、高い精度は必要ないことを伝え、ポイントポイントで適切な指示をすれば、長時間をかけずに測定は

終了すると思われる。

解析を行うには理論式の実理解が必要である。事前に十分な予習をするか解析手順をあらかじめ指示した解答用紙を準備するとよい。

時間を短縮する場合は以下のコメントを参考にするとよい。

問 1-1a : 省略してもよい。

問 1-b, 1-1c : 省略せずに実施すべきである。

問 1-2a : 目視でおおよその角度を確認するだけでよい。

問 1-2b, 1-2c : 手順を明確にして直線となるグラフ作成をすることが望ましい。

輝点消滅を観察するだけの場合でも、消滅位置と p の関係の説明は必要である。

問 1-2d : 輝点消滅を観察するだけでもよい。問 1-2b の消滅角度の間に 2 回消滅することを確認して、 $1/4$ と $3/4$ ($= -1/4$) での消滅と説明するとよい。

問 1-3 : 大きさは測定しなくてもよい。その場合は、図におおよその角度と輝点の明暗パターンだけを写し取り、構造の形を議論するとよい。

7. 発展課題へのヒント

周期構造をもつものであれば、その間隔を測定することができる。例えば、定規の目盛りや CD, DVD, 薄い布地などがある。ただし、角度 θ が小さいという条件から外れる場合があるので用いる数式に注意が必要である。

細かな金網などの回折を観察すると強い輝点の間に弱い輝点が生じている場合がある。これは、金網に長周期の構造（例えば、3 本ぐらいの周期で間隔が狭い部分がある）があることを示している。消滅則が確認できる素材はなかなかないと思われるが、長周期構造がある素材を用いると輝点の明るさに大小のある複雑な回折像を観察できる。

課題 2 : 偏光と偏光板の働き

1. 課題作成の背景, ねらい

図 A (上) に示すように透過軸方向が直交する 2 枚の偏光板を重ねてみると光が全く通らなくなることが分かる。また図 A (下) に示すように液晶ディスプレイからの光が鉛直方向に偏光していることも分かる (偏光方向とコントラストは機種によって異なる)。

可視光は電磁波の一種であり, 電場と磁場からなる横波である。このことは教科書等を通じてよく知られているが, そのことを日常生活や実験から体験して納得している生徒は少ないと思われる。

そこで, この課題で偏光実験によって横波の性格を体験することを目的とした。また電磁波を構成する電場や磁場はベクトルと考えることができるが, 導入部を丁寧に説明し低学年でも解答できるようにしている。特に偏光板の特徴となる偏光方向を明確にするために, 図 2-3 で示すように吸収軸と透過軸を明示した。また, 定量的な測定の前に目視による確認を行い, 最初に実験のイメージを持つことができるように配慮している。なお, 実在の偏光板では, 偏光方向に関係なく透過による減衰があるために, 定量的考察にはその点を考慮する必要がある。

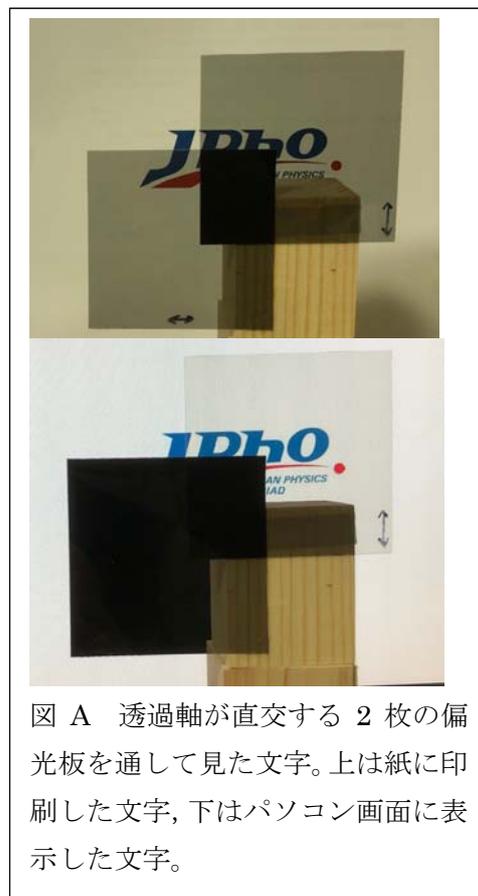


図 A 透過軸が直交する 2 枚の偏光板を通して見た文字。上は紙に印刷した文字, 下はパソコン画面に表示した文字。

2. 実験装置の概要

図 B に基本的な実験配置を示す。透過光の強度を定量的に測定するために, LED 光源 (左端) とフォトダイオード検出器 (PD) 及びデジタルマルチメーターを用いている。設問の内容に応じて LED と PD の間に何枚かの偏光板を挿入することになるので, 十分なスペースを取っておく必要がある。一般的に光による測定は, 光軸を正確に合わせて実験することが重要である。(正確な光軸がセッティングできれば実験は半分以上成功であろう。) 今回の装置では上方から確認できる水平面内配置だけでなく, 各光学部品の高さ調整も重要になる。加えて今回の実験装置の回転

式偏光板は、設定角度により光の透過部分が変化するので、偏光板全面を指紋などで汚さない配慮も大切になっている。

光源、偏光板、光検出器の配置が完了した後に、天井光などの影響を小さくするため上方に遮光箱を設置するデザインとしている。この遮光箱を設置する前に、フォトダイオードの直前のスリットに LED からの光が正確に照射していることを確認することも大切である。

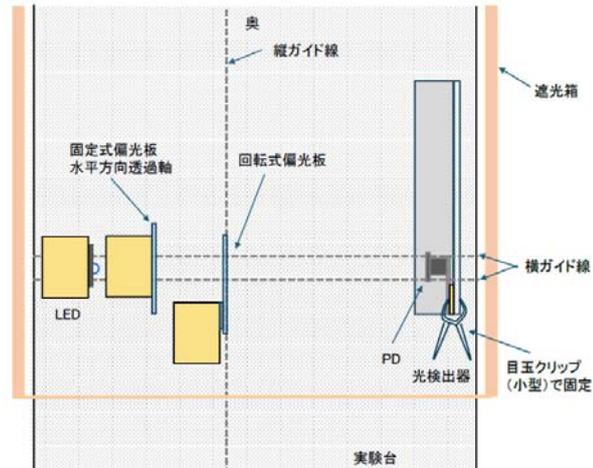


図 B 基本的な実験配置

3. 実験に必要な環境と機器など

合板製の「実験台」が約 45 cm あるので、実験に使う机は奥行き 45 cm 以上あった方がよい。「実験台」の上に光学系を組み立てることになっているが、机の上に直接両面テープで固定することが許されるならそれでもかまわない。

光の実験なので部屋の照明は余り明るくない方が良い。デジタルマルチメーター (DM) はキットに含まれていないので別途用意する必要がある。使用するのは直流電圧計測だけで、精度は 0.1 mV の桁まで読めればよい。DM の導線がミノムシクリップ付きでない場合は、両端ミノムシクリップ付きのケーブルなどで接続すること。光源と検知器用に単三の乾電池を 5 本使用する。

使用する部品の詳細は問題冊子の 4~6 ページに掲載されている。

4. 安全管理上の注意

光源は LED なのでレーザーほどの危険性はないが高輝度なので長時間見つめない方がよい。

5. 解説と補足

テキストに忠実に従えば実験は正しく実行できるはずであるが、根拠が分かりにくいところや、逆に未経験者を想定しているために冗長になっている部分もあるので、問題文にしたがって補足を記す。

【実験の準備】

ここでは 2 枚の偏光板を用いて偏光板の働きを定性的に理解させる。透過軸同志の角度を変えながら室内の風景を見たり、パソコンやスマホ画面の偏光特性などを見てもらうのもよいだろう。

【課題 2-1 : 2 枚の偏光板透過光の角度依存性】

偏光板 2 枚の透過軸の相対角度を変化させ、透過光強度の変化を測定する実験である。問 2-1b では、透過軸を平行にすることで偏光板を 1 枚追加する毎に角度に依存しない減衰が起こることを確認させ、その値を求めている。最終的な解析ではこの値を使うことになる。問 2-1c で

透過光の角度変化を求めるが、導入部で説明した電場強度の2乗に関連する事を理解できていれば、解答は比較的容易であったと思われる。なお、

I_0 : 1枚目の偏光板を通過した後の光の強度

I : 2枚目の偏光板を通過した後の光の強度

θ : 2つの偏光板の透過軸のなす角度

とする場合に

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

となることはマリュスの法則と呼ばれている。

この実験では模範解答にあるように $\alpha = 0$ の近くで信号がゼロに近い値まで落ちることが重要である。LEDの散乱光や部屋の光などがPDに入っていると、ゼロ近くまで落ちない。その疑いがある場合は、遮光箱の入り口を塞ぐ、部屋の照明を消すなどして漏れ光の有無をチェックすると良い。漏れ光問題を解決しておくことは、後に続く実験問題を成功させるためにも重要である。

【課題 2-2 : 3枚の偏光板】

2枚の偏光板の透過軸を直交させた場合、光は透過しない。つまり暗くなる。これはクロスニコルと呼ばれる配置で、顕物顕微鏡などでも用いられている。2枚の偏光板の間に顕物試料箱を挟んで顕物種類の特定制などに利用される。今回の実験では、第三の偏光板をクロスニコル配置偏光板対の上流あるいは下流に挿入しても、透過光に変化はない(透過光は無い)。しかしクロスニコル配置対の間に第3の偏光板を挿入すると、透過光が観測されるようになる。これは、図2-3の(3)の場合に、偏光面が回転していることが分かれば、理解する事ができる。実験では第3の偏光板を360度回転させる間に4回明暗が観測される。最も明るくなるのは、45度の角度で3枚目を挿入した場合である。この時に図2-2に示すように偏光面は45度回転し、電場振幅は45度方向への投影成分 $1/\sqrt{2}$ 、光強度は $1/2$ となる。

光の進行方向に沿って最下流に置かれた3枚目の偏光板でも同様に45度の回転が起こるため、結果的に $1/4$ の強度に減少した光が透過することになる。

【課題 2-3 : 4枚の偏光板】

水平固定式偏光板、回転式偏光板1、回転式偏光板2、鉛直固定式偏光板の配置で、各透過軸の方向は順に各30度で回転している。そのため、透過する電場の大きさの割合は3回の回転で $(\cos 30^\circ)^3$ であり、光の透過率(強度)は $((\cos 30^\circ)^3)^2 = 27/64$ となり約0.42に減少する。対して、偏光板3枚の場合、つまり水平固定式偏光板、回転式偏光板、鉛直固定式偏光板の成す角度が各45°の時は $((\cos 45^\circ)^2)^2 = 0.25$ である。

上記の計算では、偏光板の角度に依存しない減衰を考慮していないが、問2-1で求めたように偏光板1枚を透過するごとに少なくとも0.83倍に減少する。

このことを考慮しても、偏光板2枚を30度ずつずらして挿入した方が明るいことがわかる。

仮に理想的な場合として、角度に依存しない減衰は無く透過率が1であれば、間に挿入する偏光板の枚数 n を大きくすることで、減衰を限りなく小さくして偏光面を90度回転させることがで

きる。

6. 課題の再構成, 短縮版作成へのヒント

偏光の基本的な特性だけを理解させるなら, 課題 2-1 (2 枚の偏光板) で止めても良いだろう。また課題 2-3 (4 枚の偏光板) は課題 2-2 の延長なので省略してもよいだろう。

7. 発展課題へのヒント

この実験器キットに使用した偏光板は吸収が比較的大きいので, 5 枚以上重ねてもほとんど透過率を上げることができず, 逆に低下してしまうが, 品質の良い吸収が小さいものを選べば, もう少し枚数を増やして透過光を強めることも可能と思われる。吸収による損失も考慮した計算によって, 透過率の n 依存性を再現してみるのもよい (設問の一つとして入れる案もあった)。

この課題では取りあげなかったが, ガラスや水面からの反射光が偏光していることは偏光板が 1 枚あれば簡単に確かめることができる (偏光サングラスの原理)。青空の偏光を観察させるのも面白いだろう。太陽の方向から 90 度離れた空を, 偏光板を通して見ると太陽の方向と垂直の方向に偏光していることが分かる (レイリー散乱の特徴)。

8. その他

この課題は課題 3 の光弾性効果の実験への導入部分という意味もあるので, 連続して体験させると理解が深まると考えられる。

課題 3： 光弾性効果による歪みの可視化

1. 課題作成の背景, ねらい

この課題は課題 2「偏光と偏光板の働き」で偏光の基礎を学んだ後に続く応用編である。偏光の面白い応用の例として透明物体中の歪みの観察がある。図 A は 2 枚の偏光板の間にプラスチック製の CD ケースを挿入したときに現れる色付いた模様である。インターネットや書物の中でもよく見かける画像であるが、これを定量的に扱った記事はあまり見かけない。アクリル棒を万力とヤットコで挟んで曲げてみると B 図のように比較的単純な縞模様が現れるが、よく見ると縞の間隔、各縞の太さ、色の付き方が異なり、複雑である。



図 A CD のケース

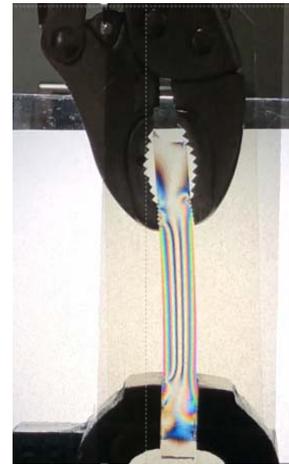


図 B 曲げられたアクリル棒

この課題では、波長が分かった単色光を使う事で、はっきりした明暗縞のパターンを作り、そこからプラスチック内部の歪みを正確に計測できることを体験する。

2. 実験装置の概要

パーツを並べ替えていくつかの実験を行うが、その中の一つ、光検出器を用いた実験の配置図を図 C に示す。透明材料としてはアクリルの角棒（10 mm 角）を利用する。この角棒を曲げ試験器の支点（枕）の上にセットし、両端をネジで押して曲げて行くことで歪みを与える。光源から出た光は偏光板、アクリル棒、偏光板の順に透過して光検出器とスクリーンに到達する。スクリーン上の縞模様を観察したり、試料上の一点における透過光の変化を、光検出器を用いて計測する。その結果からアクリル棒内部の歪みの分布を求めることが課題の目標である。

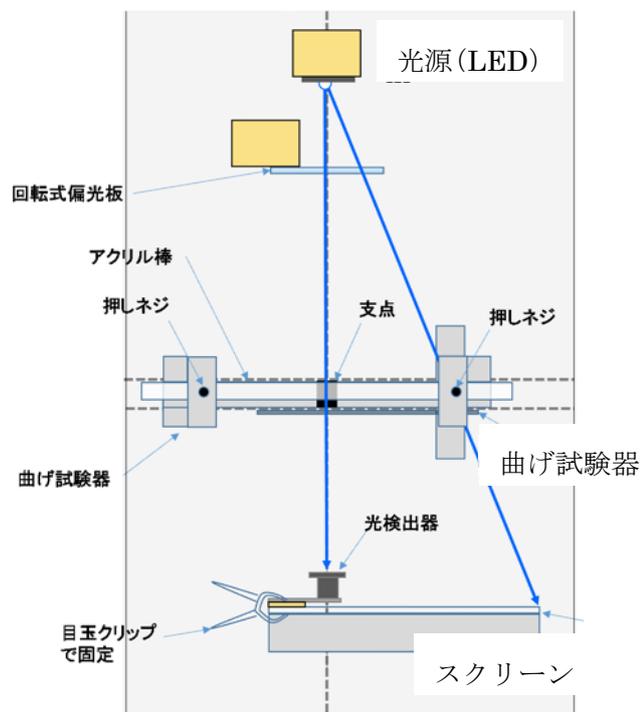


図 C 基本的な実験配置。

3. 実験に必要な環境と機器など

実験に使う机は奥行き 45 cm 以上あったほうがよい。光の実験なので部屋の照明は余り明るくない方がよい。デジタルマルチメーター (DM) はキットに含まれていないので別途用意する必要がある。使用するのは直流電圧計測だけで、精度は 0.1 mV の桁まで読めればよい。スクリーンに像を投影して背後から観察するためにトレーシングペーパー (できればトレーシング方眼紙) が必要である (使い残したものがキットに入っている場合もある)。DM の導線がミノムシクリップ付きでない場合は、両端ミノムシクリップ付きのケーブルなどで接続すること。光源と検知器に単三の乾電池を 5 本使用する。使用する部品の詳細は問題冊子の 4~6 ページに掲載されている。

4. 安全管理上の注意

光源は LED なのでレーザーほどの危険性はないが高輝度なので長時間見つめない方がよい。アクリル棒が折れて破片が飛び散る可能性もあるので、アクリル棒に大きな力が掛かっているときに、試料に目を近づけないこと。

5. 解説と補足

テキストに忠実に従えば実験は正しく実行できるはずであるが、根拠が分かりにくいところや、逆に未経験者を想定しているために冗長になっている部分もあるので、問題文にしたがって補足を記す。

【解説 1 : 弾性体の力学】

弾性体力学の簡単な解説である。ここでは図 3-1(a) に示した伸縮歪みだけ理解すればよい。次に実験ではアクリル棒を支点となる枕にのせて両端を押して変形させるので、その考え方が書いてある。実験の解析には曲率半径 R の式を使うのであるが、ここではその導き方までは書かず、天下り式に式 (3-2) が与えてある。曲がったアクリル棒内部の位置を表すためにやや変則的であるがアクリル棒に沿って曲がった座標を定義している点に注意が必要である。

【解説 2 : 歪みに起因する屈折率の異方性と偏光方向の回転について】

この課題の中心となる「光弾性効果」について解説している。媒質が歪むと屈折率がわずかに変化するが、伸縮歪みの方向とそれに垂直な方向で変化の大きさ (符号) が異なるので、光学的異方性を持つことになり、そこを透過した光の偏光状態が変わる。ここで重要なのは、入射光の偏光を光学的異方性の各主軸方向の成分に分解して考えることである。これについては課題 2 ですでに学習しているはずである。10 mm の試料の厚みの中に光の波は 10,000 周期 (波長) 程度入っているため、わずかな位相差 (屈折率の差) が大きな偏光回転となって現れる。それが感度の良い歪みの検出法になる理由である。

原理の理解にこだわるのであれば、結果の式 (3-4) と (3-5) だけ与えてもよいだろう。

【実験の概要】

図 3-4 は実験の原理を説明した重要な図である。

【実験の準備】

「実験台」は合板製で、この上に光学系を組み立てることになっているが、机の上に直接両面テープで固定することが許されるならそれでもよい。

「曲げ試験器」はこの実験の中心になる装置である。フレームを組み立てる止ネジが緩んでいる場合は締め直してください。

光源のLEDと回転式偏光板は課題2で使用するものなので、使用法は課題2を参照のこと。照明の具合でスクリーン上の像の見えやすさがかなり違うので、部屋の照明、遮光箱（課題2を参照）の位置などを工夫してください。LEDはかなり指向性に個性があるので適当に向きを変えると良い。ここは定性的な実験なので、LEDとアクリル棒、アクリル棒とスクリーンの距離は見やすいように適当に設定してよい。

【課題3-1：縞の明暗】

実験装置が正しく組み立てられているかのチェックである。同時に偏光板の回転でどういう現象がおこるかを納得してもらうための問題になっている。2枚の偏光板の偏光方向を垂直にして重ね合わせると光は全く通らないが、その間に屈折率が異方性を持つ透明体（撓めたアクリル棒、セロハンテープなど）を入れると偏光が回転して光が通るようになることがある。2枚の偏光板を通して壁などを見て、角度によって明るさがどう変わるか体験するところから始めると良いであろう。ここでいろいろ試して肉眼で観察してもらいたい。

【課題3-2：弾性光学定数（歪みの大きさと屈折率差の関係）の測定】

ここからが本番の実験である。アクリル棒を曲げていくと、縞の数が増えていくので、ある一点で透過光を観察していると、縞が通過するたびに明暗をくりかえす。透過光をフォトダイオード（PD）を使った光検出器とDMで測定し、グラフを作る。光検出器は目玉クリップを使ってスクリーンに固定する（取り付け方は課題2の図2-10を参照のこと）。

ここでは光検出器に十分な光が入ることが重要なので、LEDの向きを調整して光検出器の付近が明るくなるようにするとよい。

問3-2a～dで実際の測定を行う。【注意4】に書いたように、余計な光が光検出器に入らないようにすることが重要である。LEDをオフにしても出る信号は迷光なので、遮光の工夫が必要になる。疑いがある場合は部屋を暗くするか、光検出器のスリットを手などで覆って、暗黒での電流値を確認してみる。【注意5】に書いた通り、押しネジの位置を設定したあとに時間と共に出力の値が少しずつ変化していくことがある。これはマルチメータの数値の動きを見て待ち時間を取ればよいのであるが、落ち着く前の値を読み取ってしまうのは手際の悪い生徒ほど陥りやすい失敗である。光検出器の受光面はかなり大きいので、スリットから多少斜めに入射した光も検出できる。したがって検出器の向きについてそれほど神経質にならなくてよい。遮光における注意点としては、光検出器から見た時の背景（LEDの後ろ）に明るいものを置かないことが重要である。

【課題3-3：アクリル棒内部の歪みの分布】

ここでは曲げの大きさを固定して縞模様を観察記録し、そこから歪の空間分布を求める。比較

的手間のかかる実験で、実験技量も要求される。

問 3-3a は実験準備から始まって縞の位置の記録、 y 方向（鉛直方向）の歪分布の算出に至る。ここでは支点（枕）の位置から右側の押しネジ近辺までの像をスクリーン上に作る必要がある。またよいデータを得るためには像が全体的に明るく鮮明であり、適当な倍率で拡大されていることが有利になる。問題文に書かれている設定距離で実験はできるはずであるが、迷光のレベルなどによって最適条件は異なって来るので現場の状況に合わせて最適化を行うとよい。LED の方向、スクリーンの位置などに注意が必要。コンテスト会場では不可能であったが、部屋を暗くするのも有効。

縞の位置をトレーシングペーパーに記録するのはかなり細かい作業になるので、辛抱強くやってほしい（解答例の図を参照）。トレーシングペーパーからの読み取りはスクリーン枠から外して行うので、記録漏れがないように注意する。最終的にグラフにプロットして原点を通る直線に乗ればよいのであるが、ある程度の誤差は避けられないだろう。歪みが棒の中心位置からの距離に比例することが分かれば良い。

問 3-3b では x 方向（水平方向）の歪み分布を求める。記録データは上と同じものを使うが、今度は場所 x の関数として縞間隔の振舞いを見る。ただし縞間隔 D をそのままプロットすると曲線になって分かりにくいので、逆数にしてプロットするのがポイントである。最初はそこまで考えさせようと思ったが、難易度が高くなるので、設問では逆数をプロットせよと指示してある。そうすると直線が得られ、その x 切片は押しネジの位置に一致する。したがって歪み s が押しネジ位置からの距離に比例していることがわかる。言い換えれば、縞模様は双曲線の集合になることになる。アクリル棒を曲げた時に現れるきれいな縞模様が計算結果とぴったり一致することがわかり、これを設問の一つにすることに思い至った。

問 3-3a で求めた係数を使えば各場所での歪みの大きさが計算できるが、この課題ではそこまでは要求していない。余力があれば挑戦してみるとよいだろう。

【課題 3-4：支点を板にした場合】

これは付録問題とってよい。ここまでの問題では棒の中心を 1 か所で支持していたのであるが、これを 2 ヶ所（板の両端）で支えるとどうなるか、という問題である。2 か所の支点の間では平行線の集合になるというのが答えである。ちょっと不思議に思えるが、よく考えると当たり前というのが面白いので、設問にしてみた。図 B に示した万力とヤットコを使った実験は力学的にはこれに近い条件になっている。（これは棒が破壊して飛び散る恐れがある実験なのでお勧めはしない。）

【補足解説：弾性体の力学と光弾性効果】

この部分はあくまで理解を深めるために収録されているので、ここを読まなくても実験して設問に答えることに支障はない。

6. 課題の再構成、短縮版作成へのヒント

かなりボリュームがある課題なので、課題 3-2 の光検出器による測定までで止めるのも選択肢

の一つである。課題 3-3 の縞の解析は課題 3-2 と独立しているので、課題 3-2 を省略するパターンも可能であろう。さらに課題 3-3 のうち、 y 方向依存性はそれほど面白くないと感じるのであれば、問 3-3a の一部を省略し、問 3-3b の x 方向依存性の課題だけ残すのもよいだろう。

7. 発展課題へのヒント

光源の波長を変えれば、弾性光学定数が変わるので、縞の間隔が変わる。この実験は赤、緑、青の LED を用意すれば可能である（実証済み）。RGB の 3 波長での実験を行うと、なぜ白色光を使うと図 A の虹のような色が現れるかがわかり、その結果から色を計算で再現することも可能であろう。波長依存性の実験を課題に含めることも考えたが量が多くなりすぎるので取り止めた。

8. その他

- ・アクリル棒は 10 mm 角の物を使っている。棒材は板材から切出したものらしく、面によって歪みが異なる。元々の歪みによる偏光回転があると実験できないので、曲げ試験器にセットする時に向きに注意する必要がある。光学特性はメーカーによっても違うので、破損等に伴って再購入する場合は注意が必要。

- ・単に歪みによって縞模様が出ることだけをデモンストレーションするという利用法もある。その場合は、スクリーンに映し出すのではなく、光源と最初の偏光板の間に白い紙を置き、その散乱光をスクリーンの位置で、肉眼で観察してもよい。その方が、縞模様が鮮明に見えるので、明るい場所でも実験できるというメリットがある。光源として白色 LED を使えば、虹色も再現できる。