

物理チャレンジ 2024
実験問題
2024年8月20日(火)

試験時間	13:20 ~ 18:20
実験器具後片付け	18:20 ~ 18:40

実験問題にチャレンジを始める前に下記の<注意事項>をよく読むこと。

<注意事項>

1. 開始の合図があるまでは、机の上の問題冊子、解答用紙、実験器具箱を開けてはいけない。
2. 監督者の指示があったら解答用紙の全てのページの所定の箇所にチャレンジ番号と氏名を記入しなさい。
3. 試験開始後、3ページに記載の「はじめに」と「物理量の記法に関する注意事項」を読みなさい。続いて4ページ以降に記載されている「器具・部品一覧」により、全ての物品を確認しなさい。
4. 実験問題には課題1、課題2、課題3があり、どれからはじめてもよい。ただし、課題2と課題3については、互いに関連があり共通の実験器具を用いているので課題2を先に行うことを推奨する。課題3を先に行う場合は、課題2の必要箇所を参照すること。
5. 持参した筆記用具と、与えられた器具・部品以外は使用してはならない。携帯電話、タブレット、電子辞書などの電子機器は使用禁止である。
6. 実験結果や計算結果、式の導出など、採点して欲しい事項は解答用紙の所定の箇所に記入すること。下書き用紙とグラフ用紙は回収・採点しないので、解答はすべて解答用紙に記入すること。
7. 器具・部品に不具合がある場合は、番号札を通路側に出して監督者に申し出ること。必要に応じて交換を行うが、数には限りがあるので交換できない場合もある。
8. 試験時間中に気分が悪くなったときやトイレに行きたくなったとき、あるいは質問があるときには、番号札を使って監督者に知らせること。
9. 終了の合図があれば、直ちに解答をやめ、解答用紙を机の上に置き、監督者による回収がおこなわれるまで静かに待つこと。その後、4ページ以降に記載の「器具・部品一覧」を参照しながら細かい部品をポリ袋などに入れ、最初の状態にして実験器具を箱の中に片付けること。ただし、計算機、滑り止めシート、乾電池(5本)は、箱の外に置くこと。

目次

はじめに	3
物理量の記法に関する注意事項	3
器具・部品一覧	4
課題 1 光の回折と構造解析への応用	7
課題 2 偏光と偏光板の働き	17
課題 3 光弾性効果による歪みの可視化	27

はじめに

光は肉眼による観測が可能のため古くから興味の対象となっており、光学は力学と並んで物理学の重要な分野として発展してきた。現在では、光は波と粒子の両方の性質をもつことが明らかとなっており、真空中の光の速さ 299792458 m/s は長さの単位であるメートルの定義として用いられている。

「百聞は一見にしかず」ということわざがあるように、光はたくさんの情報を私たちに届けてくれる。今回の物理チャレンジの会場であるSPring-8は、光速近くまで加速された電子から、X線、紫外線から遠赤外線までも含む幅広い波長域の光（放射光と呼ぶ）を発生し、それらの光を用いて物質の構造や機能を調べる施設である。同じような施設は全国各地に作られており、2024年4月には最新の施設であるナノテラスが仙台で稼働しはじめた。

今回の実験課題は、光を用いて物質の構造を調べるのが主なテーマである。課題1では光の回折を用いて周期的構造を調べる。課題2では偏光の特性を調べ、課題3では偏光を用いて物体中の歪^{ひず}みを調べる。

物理量の記法に関する注意事項

物理量は、単位とその何倍であるかを表す数値の積として、物理量 = 数値 × 単位 と表記される。今回の物理チャレンジの実験課題では、国際単位系（SI）で推奨されている以下のような記法を用いる。

物理量を表す記号は斜体（イタリック体）、単位を表す記号は立体（ローマン体）で表記する。

物理量を定量的に表すときには単位をつける。このとき、単位をカッコなどで囲わない。たとえば、「自転車の速さは $v = 18 \text{ m/s}$ である。」と書き、 $v = 18 \text{ (m/s)}$ や $v = 18 \text{ [m/s]}$ とは書かない。

表やグラフの目盛りなど、多くの数字を書くときにいちいち単位を書くのは煩わしい。この場合は以下のようにする。単位 U で表した物理量 X の数値を表やグラフに表す場合、表の見出し欄や座標軸には X/U と記す。たとえば、表やグラフに電流 I を mA 単位で表したい場合には、見出し欄や座標軸に I/mA と書く。物理量 = 数値 × 単位 なので、両辺を単位で割り算すると 物理量/単位 = 数値 となることはわかりやすい。

物理量を表す数値の自然対数を表やグラフに表す場合、たとえば、単位 V で測った電圧 V の数値の自然対数は、 $\ln(V/V)$ と記す。

器具・部品一覧

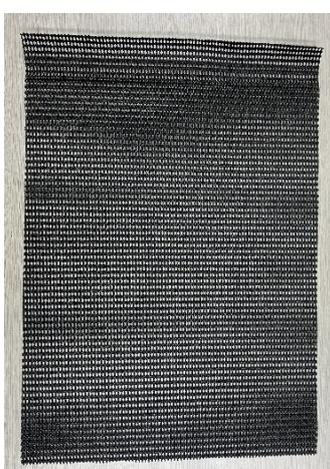
机上の物品を点検し，表の後にある写真も参考にしながら，以下の器具・部品があることを確かめなさい。この段階では袋を開ける必要はない。部品が不足していることがわかった場合は番号札を使って監督者を呼ぶこと。実験終了後，器具・部品はそれぞれの専用箱，小箱，ポリ袋の中に戻してもらうので，これらの梱包材は箱のふたなどの中にまとめておくこと。

【課題 1， 2， 3 に共通する器具・部品】

番号	品名	内容	数量	包装	確認
1	実験台	合板製 30 cm×45 cm	1 枚		
2	滑り止めシート	30 cm×45 cm	1 枚	箱の外	
3	スクリーン	アルミフレーム脚つき	1 台		
4	遮光箱	段ボール紙製 (おりたたみ)	1 個		
5	電池ボックス (2 本用)	単三 2 本用，スイッチつき	1 個	袋 A	
6	電池	単三	5 本	袋 A	
7	定規 (0.5 mm 目盛り)	金属製 30 cm	1 本		
8	虫メガネ		1 個		
9	はさみ		1 個		
10	両面テープ		1 個		
11	セロハンテープ		1 個		
12	方眼紙	A4，下書き用を含む	3 枚		
13	白紙	A4，下書き用	4 枚		
14	計算機		1 台	箱の外	



1. 実験台



2. 滑り止めシート



3. スクリーン



5. 電池ボックス (2 本用)

【課題1の器具・部品】

番号	品名	内容	数量	包装	確認
1	レーザー	支柱つき	1個		
2	焦点調整用治具		1個	袋B	
3	ミノムシクリップつき導線	赤色, 黒色各1本	2本		
4	回転台	スライドの保持と回転用	1台		
5	スライド	A: 2枚, B: 1枚	3枚	袋C	
6	白紙小片	名刺サイズ 光線確認用	1枚	袋C	
7	保護メガネ		1個		
8	目玉クリップ (豆型)	幅 20 mm	4個	袋B	
9	巻尺	1.5 m	1個		
10	分度器	半円	1個		



1. レーザー



2. 焦点調整用治具



3. ミノムシクリップ
つき導線



4. 回転台



5. スライド



7. 保護メガネ

【課題 2, 3 の器具・部品】

番号	品名	内容	数量	包装	確認
1	デジタルマルチメータ	測定導線（黒色，赤色）付属	1 台		
2	回転式偏光板	木片台つき	2 個		
3	固定式偏光板	木片台つき	2 個		
4	発光ダイオード (LED)	木片台，回路基板，導線つき	1 個	袋 D	
5	光検出器 (PD 基板)	スリット，導線つき	1 個	袋 D	
6	電池ボックス (3 本用)	単三 3 本用，スイッチつき	1 個	袋 E	
7	曲げ試験器	アルミフレーム製	1 台		
8	アクリル棒	10 mm×10 mm×250 mm 透明	1 本		
9	支点	半円柱形 黒色	1 個	袋 E	
10	アクリル板	0.5 cm×2 cm×5 cm 黒色	1 個	袋 E	
11	45 度カット偏光板	5 cm×17.5 cm	1 個		
12	目玉クリップ (小型)	幅 40 mm	1 個	袋 E	
13	トレーシング方眼紙		1 枚		
14	六角レンチ	M5 六角穴ボルト用	1 個	袋 E	



1. デジタルマルチメータ



2. 回転式偏光板 (2 個)



3. 固定式偏光板 (2 個)



4. LED (木片台つき)



5. 光検出器 (PD 基板)



6. 電池ボックス (3 本用)



7. 曲げ試験器



8. アクリル棒



9. 支点



10. アクリル板



11. 45 度カット偏光板

課題 1 : 光の回折と構造解析への応用

【課題の目的】

物質の構造を調べる方法に X 線回折がある。波の性質をもつ X 線が結晶などの周期的構造で回折されると、X 線の干渉によってその構造の特徴をもった輝点が現われる。輝点の位置を解析することで、結晶構造を決定することができる。

本課題では X 線の代わりに可視のレーザー光、結晶の代わりに平面的な構造を記録したスライドを用いる。最初に肉眼でも観測可能な構造を用い、現れる輝点と構造の関係を調べる。次に肉眼では観測が難しい小さな構造の決定を行う。

【課題の解説】

実験の概要

図 1-1 は本課題の実験の概要を示している。z 方向に進むレーザー光が、xy 面上の回折格子（スライドの周期的平行線）で回折され、スクリーン上に輝点列を作っている。本課題では、周期的構造の大きさ・向き・形を変えて、スクリーン上の輝点を観測する。

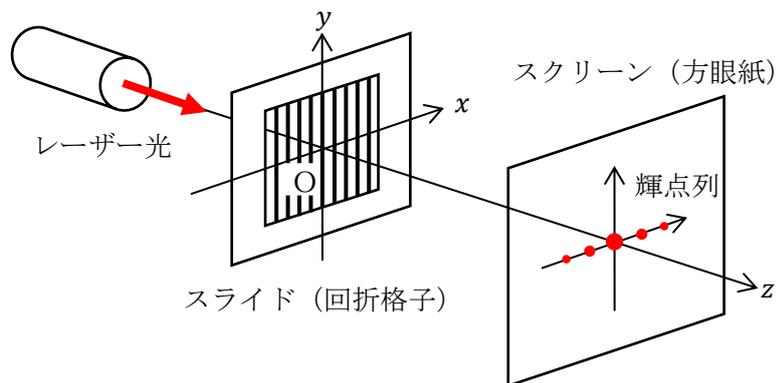


図 1-1 実験の概要。実際にはスライド側から方眼紙上の輝点列を観測する。

回折格子（周期的平行線）による回折

回折格子（周期的平行線）による回折を考える。線が細い場合には、線で回折された光は同じ位置に狭いスリット（開口）がある場合と同じになる。図 1-2(a)は z 方向に平行に進む光が、x 方向に間隔 d で並んだ線で角度 θ の方向に回折された場合である。隣り合う線で回折された光の光路差 ΔL は

$$\Delta L = d \sin \theta \quad (1-1)$$

である。この回折光が強め合うのは ΔL が光の波長 λ の整数倍のときであり、その方向の角度 θ は

$$d \sin \theta = N\lambda \quad (N \text{ は整数}) \quad (1-2)$$

を満たす。

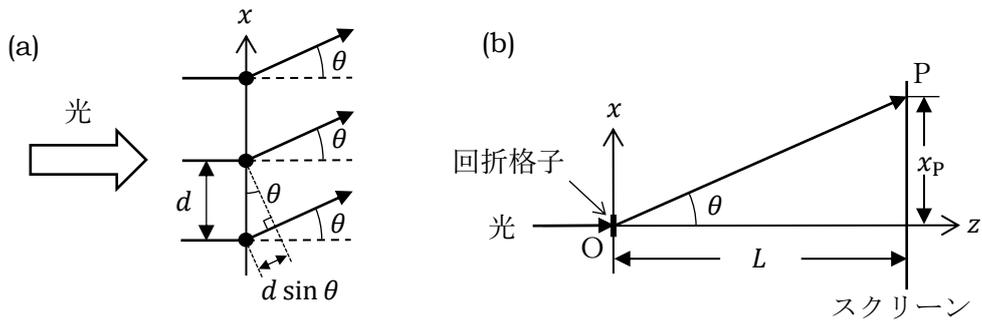


図 1-2 (a) 回折格子による光の回折。(b) スクリーン上の輝点位置。

図 1-2(b)は角度 θ の方向に進んだ光が距離 L だけ離れたスクリーンに輝点を作る様子を示している。輝点の位置 x_p は

$$x_p = L \tan \theta \quad (1-3)$$

である。この実験で扱う現象では回折角 θ は十分小さい ($\theta \ll 1 \text{ rad}$)。このとき、 $\theta \approx \sin \theta \approx \tan \theta$ と近似できるので、輝点の位置は

$$x_p \approx \frac{L\lambda}{d} N \quad (N \text{ は整数}) \quad (1-4)$$

となる。したがって、 x 方向に並んだ間隔 $x_s = L\lambda/d$ の輝点列が現われる。ただし、中央の輝点は線で回折されなかった光も含んでいるため、他の輝点より明るい。

この現象を構造決定の立場から見ると、間隔が x_s の輝点列が観測されたことで平行線の間隔が $d = L\lambda/x_s$ と決定されたことになる。

重ね合わせの原理と消滅則

回折を起こす周期的構造が複数ある場合には、**重ね合わせの原理**によりそれぞれの回折光が強め合ったり弱め合ったりする干渉が起こる。輝点が現われる位置が異なる場合には干渉が起こらないので、それぞれの輝点が別々に現われる。しかし、輝点と同じ位置に現れる場合には干渉が起こり、条件によっては一部の輝点が消滅する現象が見られる。これは**消滅則**と呼ばれ、構造を決定する重要な情報となる（補足解説 1）。

回転による構造（平行線の位置）の変化

本課題では、周期的平行線が描かれたスライドを回転したり重ねたりすることで構造を変化させる。図 1-3(a)は平行線の間隔が d のスライドに光が垂直に入射した場合（この状態を、入射光に対するスライドの角度 ϕ の原点とする。すなわち、 $\phi = 0^\circ$ ）であり、図 1-3(b)はスライドを回転して角度 ϕ とした場合である。本課題では、回転台の目盛りに合わせて時計回りを角度の正方向とする。スライドの角度 ϕ を変えると x 方向の間隔は $d_\phi =$

$d \cos \phi$ に変化する。回転により平行線の z 方向の位置に違いができるが、回折角 θ が小さいときはこの違いは輝点の位置に影響を与えない（補足解説 2）。このため、平行線を xy 面に投影した図 1-3(c) の構造と図 1-3(b) の構造は同じ輝点を作る。

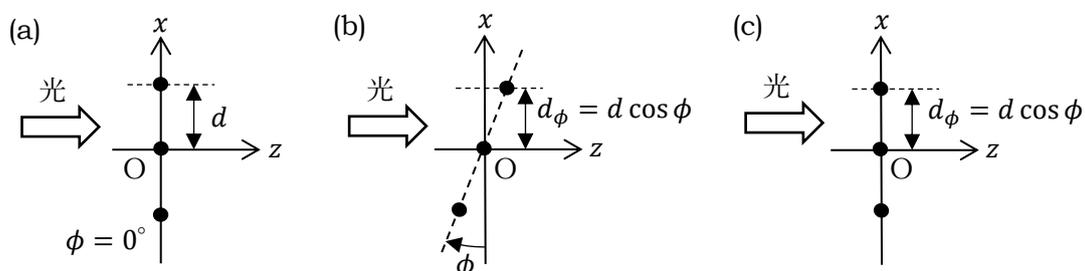


図 1-3 (a) 垂直入射。(b) (a) を ϕ 回転。(c) (b) と同じ輝点を作る構造。

図 1-4 は同じ間隔 d をもつスライド 2 枚を平行線の方法が同じになるように重ねた場合である。1 枚目の平行線の位置を●, 2 枚目の平行線の位置を○としている。図 1-4(a) の $\phi = 0^\circ$ の場合、1 枚目の平行線の 1 本は原点 O を通っており、2 枚目の平行線の 1 本は z 方向に a , x 方向に b の位置にある。 z 方向の違いは輝点の位置に影響しないので、図 1-4(a) の構造は図 1-4(b) の構造と同じ輝点を作る。

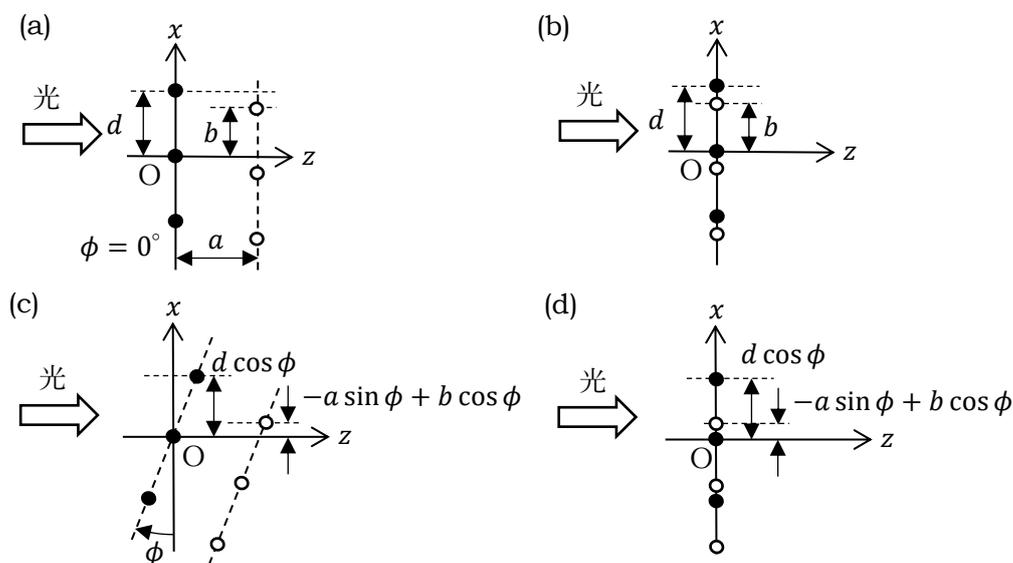


図 1-4 (a) 2 枚の重ね合わせ。(b) (a) と同じ輝点を作る構造。(c) (a) を ϕ 回転。

(d) (c) と同じ輝点を作る構造。

2 枚のスライドを重ねたまま原点 O を中心に回転してスライドの角度を ϕ とすると（図 1-4(c)）、平行線の x 方向の間隔は $d \cos \phi$ となり、 $\phi = 0^\circ$ では (a, b) にあった 2 枚目の平行線の x 方向の位置は $-a \sin \phi + b \cos \phi$ となる。 z 方向の違いは輝点の位置に影響しないので、図 1-4(c) の構造は図 1-4(d) の構造と同じ輝点を作る。 x 方向に注目すると、2 枚の平行線の x 方向の位置と間隔の比率 r は

$$r = \frac{-a \sin \phi + b \cos \phi}{d \cos \phi} = -\frac{a}{d} \tan \phi + \frac{b}{d} \quad (1-5)$$

となる。本課題の実験条件では $a \gg d$ となっているので、回転により 2 枚目の平行線の x 方向の位置は大きく変化する。このため、 r は 1 より大きくなったり負になったりする場合もある。

【課題の準備】

図 1-5 は本課題の準備が終了した状態である。本課題では輝点の読み取りを行うが、輝点が暗くて読み取りにくい場合に備えて、課題 2, 3 で用いる遮光箱を組み立てておくとい。遮光箱の組み立て方は課題 2 の問題文 (23 ページ) にある。

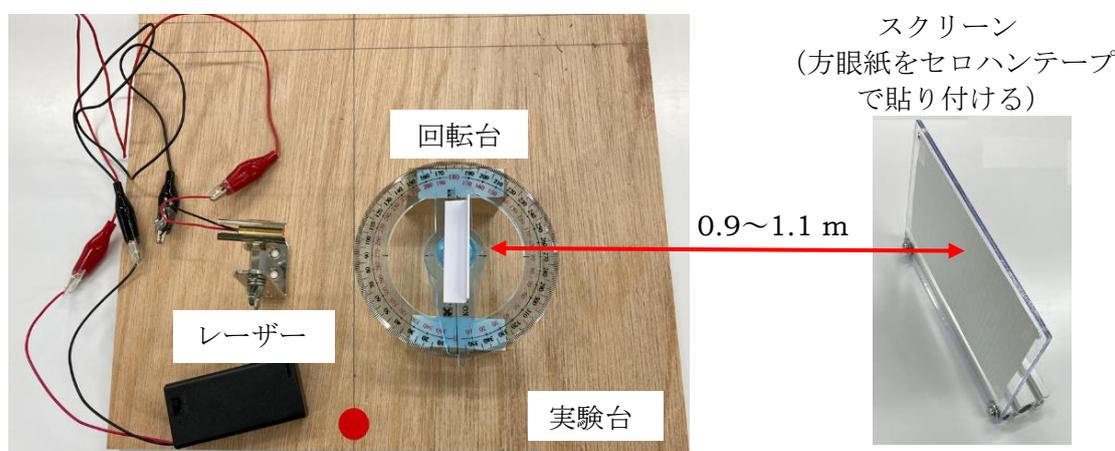


図 1-5 課題 1 の準備が終了した状態。

1. 安全のために保護メガネを着用しなさい。メガネの上からでも着用できる。本課題で使用するレーザーの出力はレーザーポインターと同等の 1 mW 以下であり、まばたきなどの反射行動で眼を保護することが可能なレベルである。
2. 実験台の位置を決め、滑り止めシートを実験台の下に敷きなさい。本課題では実験台の向きは自由であるが、図 1-5 に示すように回転台からスクリーンまでの距離が 0.9~1.1 m 必要であることに注意すること。
3. 両面テープをはさみで切って、レーザーの支柱の下面に貼り付けなさい。
4. 両面テープの剥離紙をはがし、レーザーを実験台に固定しなさい。レーザーの出射口 (図 1-6) がスクリーンの方を向くようにすること。
5. 電池ボックス (2 本用) のスイッチを OFF にして、単三乾電池を 2 本入れなさい。電池ボックスのふたは、強く押しながら導線が出ている方向にスライドすると開けることができる。
6. ミノムシクリップつき導線を用いて、電池ボックスとレーザーの同じ色の導線をそれぞれ接続しなさい。ミノムシクリップ部がショートしないように絶縁のためにセロハンテープで接続部を覆いなさい。

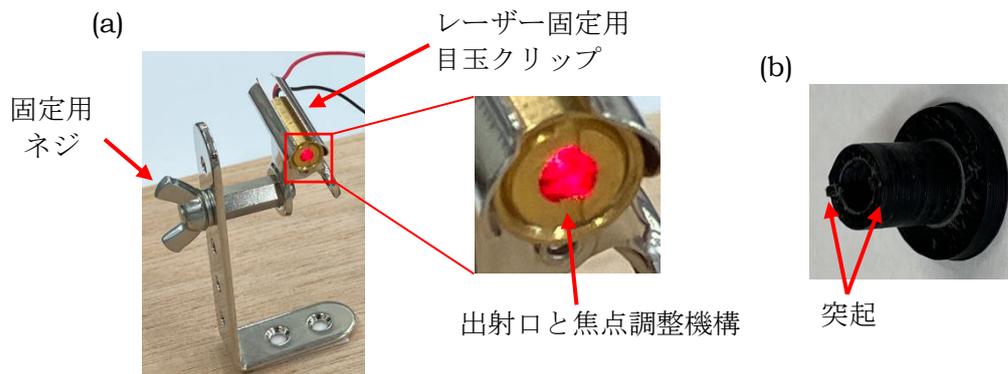
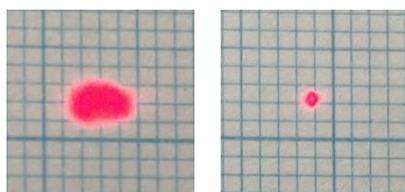


図 1-6 (a) レーザー。(b) 焦点調整用治具：突起を調整機構の溝に合わせて回す。

7. 電池ボックスのスイッチを ON にして、レーザー光の出射を確認しなさい。
8. レーザーから 1.0～1.2 m の位置に、光軸と垂直になるように両面テープを用いてスクリーンを机に直接固定しなさい。
9. 方眼紙を適切な大きさに切り、セロハンテープでスクリーンのレーザー側に貼り付けなさい。
10. スクリーンにおけるレーザー光の高さが 6～12 cm となるようにレーザーの角度を調整しなさい。固定用ネジ (図 1-6(a)) を緩めて角度を調整し、再び締めて固定すればよい。以下の調整でスポット位置が大きく変わった場合は、この調整を再度行うこと。
11. スクリーン上のレーザー光のスポットが最も小さくなるように焦点を調整しなさい (図 1-7)。図 1-6(b)の焦点調整用治具で図 1-6(a)の焦点調整機構を回転すると、焦点距離が変化してスポットの大きさが変わる。焦点調整用治具には穴が開いているので、回転中もレーザー光のスポットを確認することができる。レーザーが動かないように、レーザーを固定している目玉クリップを指でつまんで押さえるとよい。おおまかに調整した後は、スポットの大きさを虫メガネで確認しながら慎重に調整する。大きさが 1 mm 以下 (図 1-7(b)) であることが望ましいが、少々大きくても実験は可能である。



(a) 大きい (b) 十分小さい

図 1-7 レーザー光のスポット。

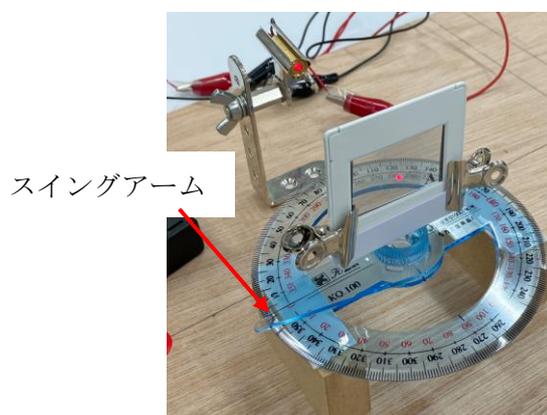


図 1-8 回転台とスライド。

12. 回転台を以下の条件を満たすように両面テープを用いて実験台に固定しなさい。(1) 回転中心がレーザー光の光軸の真下にある(2 mm 程度までの違いは問題にならない)。(2) 回転中心からスクリーンまでの距離が 0.9~1.1 m である。(3) 回転台の角度 α が 0° のときにレーザー光がほぼ垂直にスライドに入射する(スライドは図 1-8 のように回転台に取り付けられる)。

注意：回転台を回す(回転台の角度 α を変える)ときは、スイングアーム部分(図 1-8)を持って慎重に行うこと。

13. レーザー、回転台、スクリーンが固定されていることを確認しなさい。両面テープでの固定がはがれやすい場合は、両面テープを新しく貼り直すといよい。

注意：装置の準備ができた後は保護メガネをはずしてよい。ただし、レーザーをのぞき込んだりしてレーザー光を目に直接入れることがないように十分注意すること。輝点の観測が終わったら電池ボックスのスイッチを OFF にしてレーザーを止めること。

【課題 1-1：平行線の間隔】

問 1-1a

スライド A の周期的平行線(回折格子)の間隔 d を定規を用いて測定しなさい。虫メガネを用いるとよい。正確に測定するための工夫をし、測定手順を記述すること。

問 1-1b

1 枚のスライド A を図 1-8 のように 2 個の目玉クリップ(豆型)を用いて回転台に取り付けなさい。スライドは線が鉛直となるように取り付けること。スライドからスクリーンまでの距離 L を巻尺で測定しなさい。

白紙小片(名刺サイズ)を用いてスライドによるレーザー光の反射光線を確認し、回転台の角度 α を変えると方向が変化することを確認めなさい。反射光線がレーザー光源の方向に向かっているときの回転台の角度 α_0 を読み取りなさい。反射光線は入射光線とは上下方向に少しずれている場合があるが、同一鉛直面上にあるときの角度を読み取ること。このとき、レーザー光線がスライドに垂直に入射した状態($\phi = 0^\circ$)になっている。

問 1-1c

回転台の角度 α を入射光に対するスライドの角度が $\phi = 0^\circ$ および 30° となるようにして、以下の測定をしなさい。それぞれについて、スクリーン上の N 個離れた輝点の位置を読み取り、その間の距離 x_N を用いることで輝点の間隔 x_S をできるだけ正確に決定しなさい。輝点が暗くて読み取りにくい場合は、遮光箱をスクリーンにかぶせるとよい。

光を回折している平行線の x 方向の間隔 d_ϕ を、それぞれの角度の輝点間隔 x_S から計算して表に書きこみなさい。レーザー光の波長 λ は 650 nm ($6.5 \times 10^{-7} \text{ m}$) である。スライド A の平行線の間隔 d をそれぞれの結果について計算し、その平均値を求めなさい。

【課題 1-2：重ね合わせの原理と消滅則】

問 1-2a

図 1-9 のように 2 枚のスライド A を角度約 45°で重ね合わせて 2 個の目玉クリップ（豆型）で止めなさい。重ね合わせたスライドを別の目玉クリップ（豆型）を用いて回転台に取り付けなさい。回転台の角度を $\alpha_0(\phi = 0^\circ)$ として輝点を観察し、2 本の輝点列のなす角度が 2 枚のスライドのなす角度と同じであることを確認しなさい。確認ができれば解答用紙の確認欄に○印を書き込みなさい。



図 1-9 45°の重ね合わせ。

問 1-2b

図 1-10 のように 2 枚のスライド A を描かれた線が平行になるように重ね合わせて、問 1-2a と同様に回転台に取り付けなさい。スライドは線の方向が鉛直となるように取り付けること。回転台の角度を変えるとスクリーン上の輝点の明暗が変化することを確認しなさい。同じ状態で問 1-2d の測定を行うので、問 1-2b の観測終了後もスライドを取り外さないこと。



図 1-10 平行な重ね合わせ。

輝点が 1 つおきに消滅する状態を複数個所見つけ、そのときの回転台の角度 α を表に記録しなさい。それぞれのときのスライドの角度 ϕ と $\tan \phi$ の値を計算しなさい。

輝点が 1 つおきに消滅した状態では、2 枚目の平行線の位置は図 1-11 のように 1 枚目の平行線の間中となっている。このときの関係は式(1-5)の比率 r を用いて

$$r = N + \frac{1}{2} \quad (N \text{は整数}) \quad (1-6)$$

と表される（補足解説 1）。整数 N は、 r が 1 より大きくなったり負になったりする場合があることを表している。

$\tan \phi$ の絶対値が最小のデータに $N = 0$ を割り当てて表に書き込みなさい。他のデータは $\tan \phi$ の値の逆順に整数 N を割り当てなさい（逆順とするのは式(1-5)の $\tan \phi$ の係数が負であるためである）。 $\tan \phi$ と N の関係のグラフを作成しなさい。

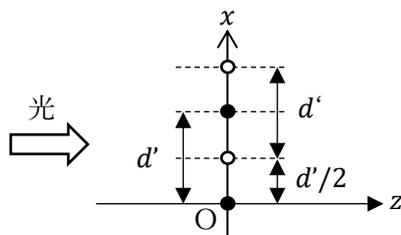


図 1-11 1 枚目の平行線の位置を●，2 枚目の平行線の位置を○とし、 xy 面に投影した形で示している。 d' はスライドの角度 ϕ により変化する。

問 1-2c

問 1-2b で作成したグラフを用いてスライドの間の距離 a と重ね合わせのずれ b の値を求めなさい (図 1-4(a)参照)。計算過程も記述すること。ただし、平行線の間隔 d の値は問 1-1c の結果を用いなさい。

問 1-2d

問 1-2b の状態のままスライドを回転し、中央の明るい輝点を 0 番目としたときに中央から 2 番目となる輝点が消滅する状態を複数個見つけ、そのときの回転台の角度 α を表に記録しなさい。このとき 2 枚目の平行線の位置は平行線の間隔の $1/p$ (図 1-12(a)) または $-1/p$ (図 1-12(b)) となっている。ただし、 p は 2 より大きい整数であり、その関係は比率 r を用いて

$$r = N \pm \frac{1}{p} \quad (N \text{ は整数, } p \text{ は } 2 \text{ より大きい整数}) \quad (1-7)$$

と表される。このときスライド 2 枚を合わせた構造を xy 面に投影すると図 1-13 のようになり、間隔 d' の平行線の間で平行線から d'/p だけずれた位置にもう 1 枚のスライドの平行線がある。

記録したそれぞれの角度について、式(1-5)で与えられる比率 r を計算し表に書き込みなさい。さらに、適切に N を割り当てて $|r - N|$ を計算しなさい。測定結果から整数値 p を決定しなさい。決定した理由も記述すること。

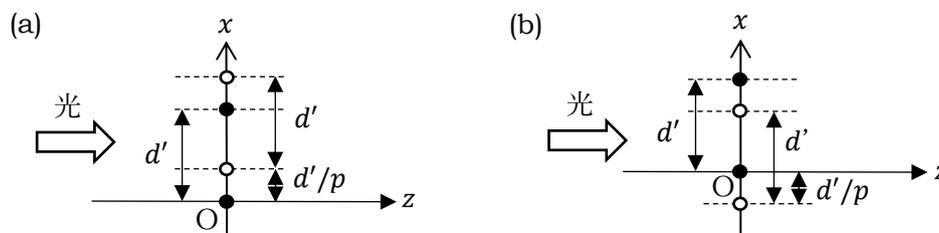


図 1-12 1 枚目の平行線の位置を●, 2 枚目の平行線の位置を○とし, xy 面に投影した形で示している。 d' はスライドの角度 ϕ により変化する。

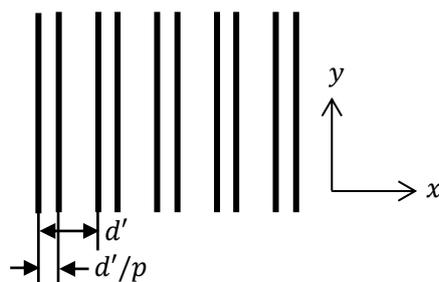


図 1-13 2 枚のスライドによる構造を xy 面に投影した図。

【課題 1-3 : 未知の構造の決定】

問 1-3a

スライド B を回転台に取り付けなさい。回転台の角度を $\alpha_0(\phi = 0^\circ)$ としたときのスクリーン上の輝点を解答用紙に写し取りなさい。

問 1-3b

写し取った輝点列を用いてスライド B の構造を決定しなさい。構造の概略図を図 1-13 にならって解答用紙に描き、大きさや角度を記入すること。決定した理由も記述すること。

【補足解説】

1. 重ね合わせの原理と消滅則

間隔が d の周期的平行線（回折格子）が 2 枚ある場合を考える。1 枚目は平行線の 1 本が原点 O にあり周期が x 方向とする。このとき、1 枚目の平行線で回折された光が強め合う位置は式(1-4)で表される。

問 1-2a のように 2 枚目の平行線の周期の方向が異なる場合を考える。例えば、2 枚目の平行線の周期が y 方向の場合には、2 枚目の平行線で回折された光が強め合う位置は

$$y_p \approx \frac{L\lambda}{d} N \quad (N \text{ は整数}) \quad (1-8)$$

となり、位置が異なっている。したがって、1 枚目で回折された光と 2 枚目で回折された光が干渉することはない、輝点列は x 方向と y 方向に別々に現れる。

図 1-14 のように 2 枚目の平行線の周期の方向と間隔が同じで、1 枚目の平行線の間隔の $1/p$ の位置にある場合を考える。1 枚目の平行線 (●) と 2 枚目の平行線 (○) で回折された光の光路長の差は

$$\Delta L = \frac{d}{p} \sin \theta \quad (1-9)$$

である。光路差 ΔL が光の波長 λ の半整数倍となる

$$\Delta L = \left(N' + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad (N' \text{ は整数}) \quad (1-10)$$

のとき光は弱め合い、その方向の輝点は消滅する。

問 1-2b の場合は $p = 2$ であり、弱め合う方向のスクリーン上での位置は

$$x_p \approx L \frac{p}{d} \Delta L = \frac{L\lambda}{d} (2N' + 1) \quad (N' \text{ は整数}) \quad (1-11)$$

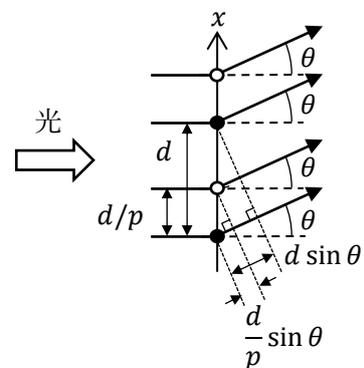


図 1-14

である。したがって、式(1-4)で表される輝点列の中央の明るい輝点を0番目とすると、中央から $\pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$ 番目が弱め合うので輝点は1つおきに消滅する。

2. 構造の奥行きの影響

光を回折する構造が同じ平面にない場合を考える。図1-15は例として回折格子の1本の線が xy 面から z 方向に a だけずれている場合を示している。このとき、隣りの線で回折された光との光路差 ΔL は

$$\Delta L = d \sin \theta + a \cos \theta - a = d \sin \theta - a(1 - \cos \theta) \quad (1-12)$$

となる。 $\theta \ll 1$ の場合には $\sin \theta \gg 1 - \cos \theta$ であり、本課題の実験条件では a と d の大きさの差は高々数倍ぐらいなので、光路差 ΔL は式(1-1)と同じとみなしてよい。この関係は、 xy 面からずれている構造が複数あってもそれぞれについて成り立つ。したがって、奥行きがある構造が作る輝点は、その構造を xy 面に投影した構造が作る輝点と同じになる。

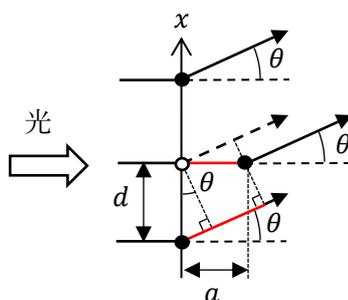


図1-15 奥行きがある構造の回折。赤線部分の光路差を考える。

課題 2 : 偏光と偏光板の働き

【課題の解説】

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。電磁波を構成する電場や磁場は，大きさと向きをもつベクトルと考えることができる。図 2-1 は， z 軸に平行な方向に進む光（電磁波）を，ある時刻における電場ベクトル \vec{E} ，磁場ベクトル \vec{H} のようすとして示した例である。図 2-1 のように，電場ベクトルと磁場ベクトルは波の進行方向である z 軸に対して垂直かつ互いに直交する。

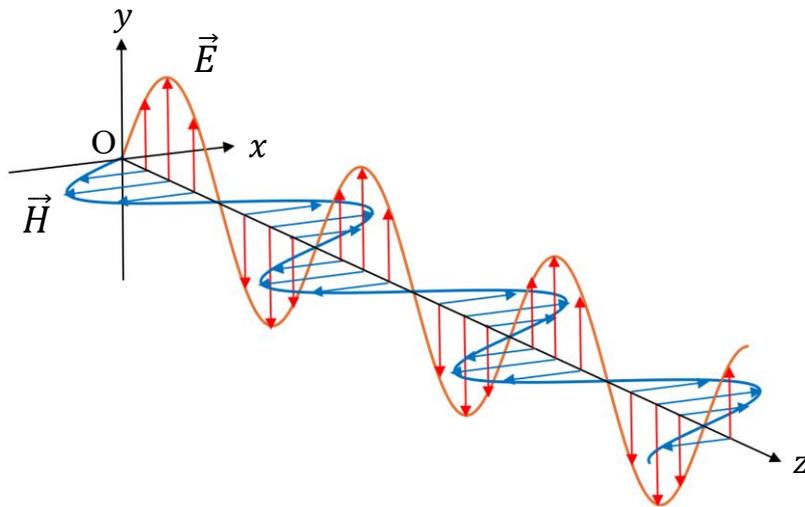


図 2-1 z 方向に進む電磁波の電場（赤色）と磁場（青色）の波形例。ここでは，電場ベクトルが y 方向，磁場ベクトルが x 方向を向いている場合を示している。

ここから先では，光の電場の振動に注目して考える。 z 方向に進む光の場合，一般に電場は， xy 面内のいろいろな方向に沿って振動している。この電場の振動方向を，光の偏光方向とよぶ。図 2-2 のように xy 面内の任意の方向に電場ベクトルをもつ波は， x 方向に電場ベクトルをもつ波と， y 方向に電場ベクトルをもつ 2 つの波の合成であると考えることができる。

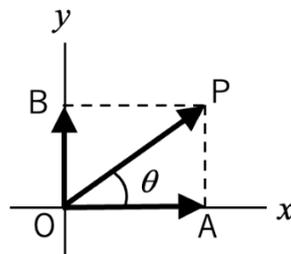


図 2-2 xy 面内で任意の方向を向く電場ベクトル \vec{OP} は，直交する x 方向の電場ベクトル \vec{OA} と y 方向の電場ベクトル \vec{OB} に分解することができる。元の電場ベクトル \vec{OP} が， x 軸と角 θ をなすとき，分解された 2 つのベクトルの大きさは， $|\vec{OA}| = |\vec{OP}| |\cos \theta|$ および $|\vec{OB}| = |\vec{OP}| |\sin \theta|$ で与えられる。

また、電磁波によって運ばれるエネルギーの流れ（波の進む方向に垂直な単位面積を単位時間に通過するエネルギー）の大きさは、電場ベクトルと磁場ベクトルの大きさの積で表される。電磁波では電場ベクトルの大きさと磁場ベクトルの大きさは互いに比例するので、エネルギー流れの大きさ、すなわち光の強さ（明るさ）は電場（または磁場）の大きさの2乗に比例する。図 2-2 では、 $|\overline{OP}|^2$ すなわち $|\overline{OA}|^2 + |\overline{OB}|^2$ に比例する。今回の実験装置で使う光検出器は、光の強さに比例した電圧を出力する。

一般に、媒質中を光が透過するとき光は減衰する。適切な厚さのある種の媒質では、特定の方向の振動電場をもつ光が完全に吸収される場合があり（この方向を吸収軸と呼ぶ）、これに垂直な方向に振動電場をもつ光だけを透過させる性質（切り出す機能）をもつことになる（この方向を透過軸と呼ぶ）。偏光板は、この様な性質をもつ光学部品と考えることができる。図 2-3 では、z 方向へ進行し、xy 面内に偏光方向をもつ 3 つの光、(a) y 方向に電場をもつ光、(b) x 方向に電場をもつ光、(c) x 軸と y 軸の中間の方向に電場をもつ光、が x 方向が吸収軸、y 方向が透過軸の偏光板を透過する様子を示している。この偏光板を透過した光のように、電場の振動方向が一方向にそろっている光を直線偏光と呼んでいる。

太陽光や、今回の実験で用いる発光ダイオード（LED）から放出される光を偏光板に通すとき、偏光板の透過軸の方向を変化させても、透過光の明るさはほとんど変わらない。このように、進行方向に垂直な面内のあらゆる方向に偏光した光が均一な強さで含まれている光を自然光という。

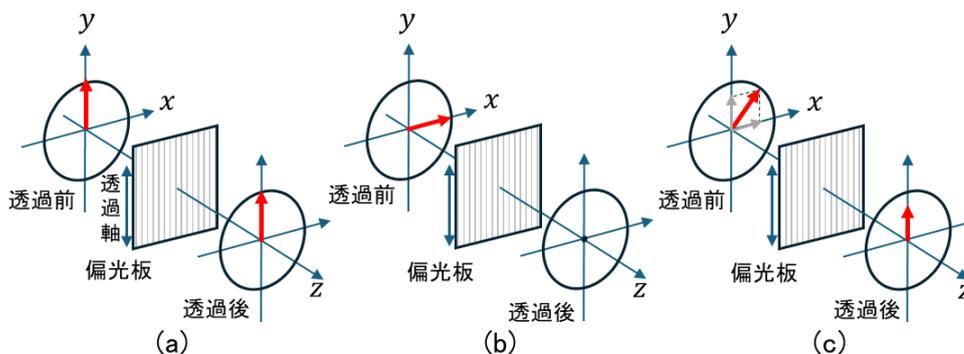


図 2-3 偏光板の働き概念図。電場が xy 面内で振動し、z 方向へ進む波が y 方向に透過軸をもつ偏光板に入射しており、y 方向に振動する電場成分のみが透過する。透過前、透過後の図の赤色の矢印は、ある時刻において、偏光板を透過する前後の電場ベクトルが最大に振れた位置での電場ベクトルの方向と大きさを模式的に表したものである。(a) 透過軸に平行な振動電場をもつ光は透過し、(b) 透過軸に垂直（吸収軸に平行）な振動電場をもつ光は透過しない。(c) 透過軸方向から傾いた振動電場をもつ光は図 2-2 のように透過軸方向と吸収軸方向の成分に分けることが可能で、透過軸方向の成分のみが透過すると考えることができる。

【課題の準備】

目視による確認

最初に、偏光板の性質を目視で確認してみよう。図 2-4 に示すように、2つの固定式偏光板は、透過軸がそれぞれ水平方向と鉛直方向になるように木片台に固定されている。

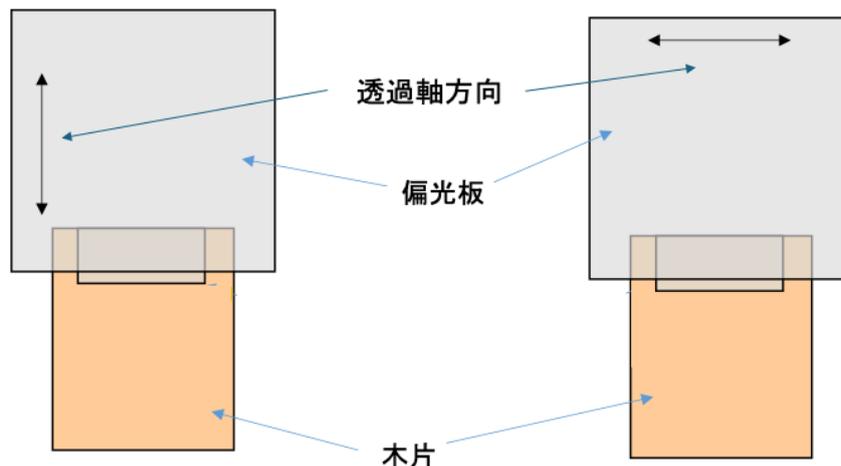


図 2-4 固定式偏光板。透過軸方向が矢印で示されている。左が鉛直方向透過軸をもつ固定式偏光板，右が水平方向透過軸をもつ固定式偏光板である。

最初に、図 2-5(a)のように1つの固定式偏光板を手に持ち、偏光板を回転させながら背景を観察しなさい。次に、2つの固定式偏光板を手に持ち、図 2-5(b)のように2枚を重ねて背景を目視で確認しながら手前の固定式偏光版を回転させなさい。1枚では偏光板を回転しても明るさは変わらないが、2つの偏光板を重ねて見る場合は透過軸のなす角度によって透過光の明るさが変わることが観察できる。偏光板を 180° 回転させると、透過軸方向が最初と同じ方向に向くことになる。このため、今回の実験では偏光板の回転は 0° から 180° の範囲で行う。

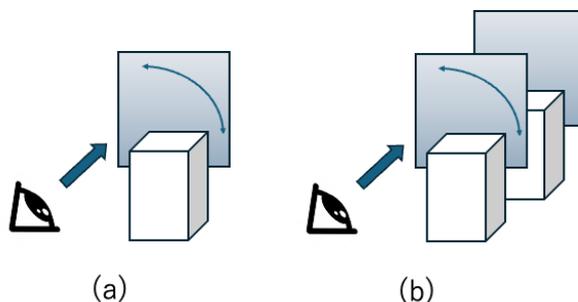
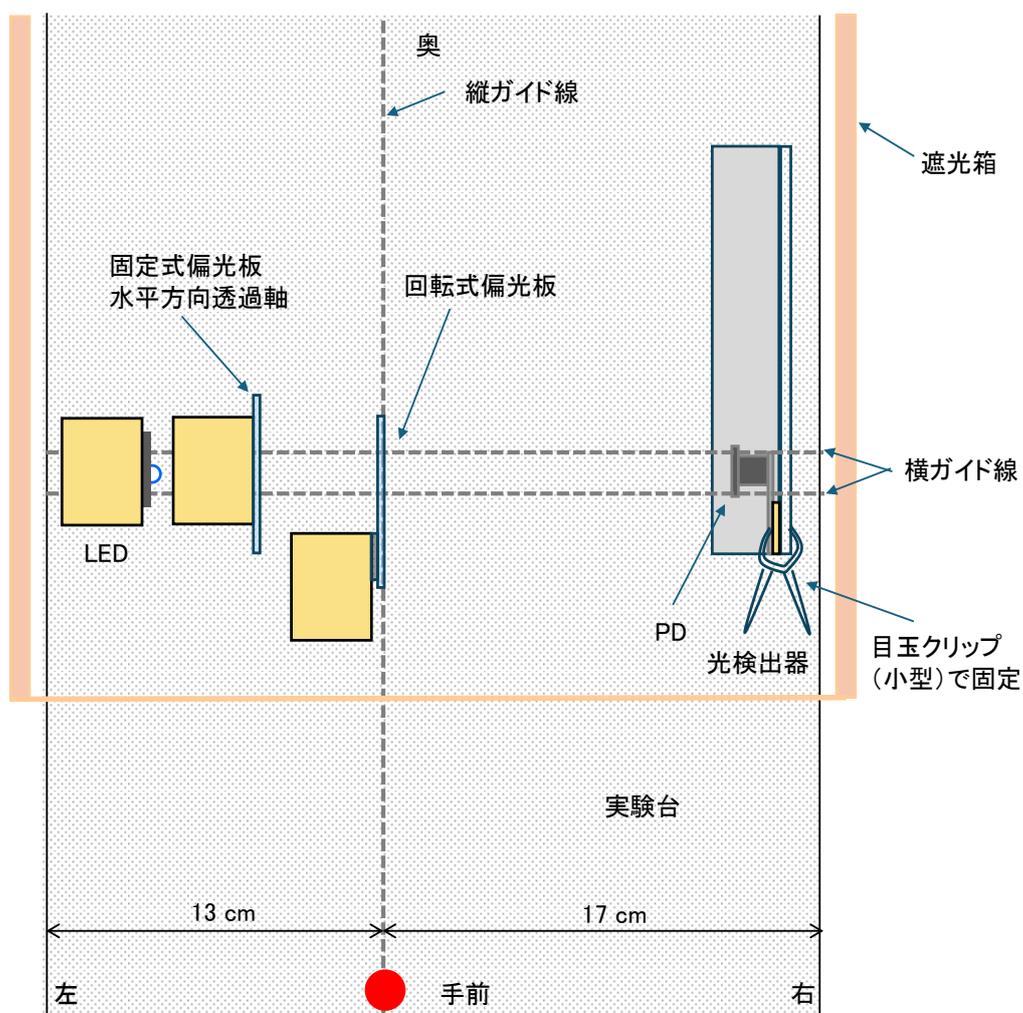


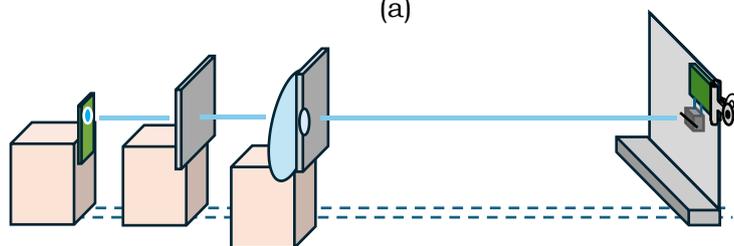
図 2-5 偏光板の目視による特性観察。

実験台

課題 2 と 3 の実験では、光源として青色 LED を使用する。**課題 1 を先に行った場合は、レーザー（赤色）とスライドの回転台を実験台から外す。**本課題で最初に行う課題 2-1 の実験配置を図 2-6 に示す。実験台は赤色のシールの貼ってある辺が手前に来るように、滑り止めシートを敷いた上に置く。



(a)



(b)

図 2-6 (a) 上方から見た 2 枚の偏光板による透過光測定実験装置の配置。
(b) 手前側、斜め上からの見取り図。青色の実線は測定する光の経路。

光源（青色 LED）

光源を作製する。電池ボックス（3 本用）のスイッチを OFF にし、単三乾電池を 3 本入れなさい。電池ボックスのふたは、強く押しながら導線が出ている方向にスライドすると開けることができる。電池ボックス（3 本用）の導線と LED 基板からのミノムシクリップつき導線を同じ色同士で接続し、ミノムシクリップ部がショートしないように絶縁のためにセロハンテープで接続部を覆いなさい。電池ボックスのスイッチを ON にすると LED が発光することを確認しなさい。接続を間違えると発光しないので注意すること。

図 2-6 のように、光源（LED）を実験台の左端に横ガイド線に合わせて両面テープで固定しなさい。光が実験台の上方約 75 mm で 2 本のガイド線の間を通るように設置すること。

デジタルマルチメータ

図 2-7 のように、デジタルマルチメータに付属している黒色測定導線のバナナ端子をデジタルマルチメータ本体下段中央にあるコモン穴（COM）に、赤色測定端子を下段左端の電圧測定端子穴（V/Ω/Hz）に差し込みなさい。中段左にある黄色の表示固定ボタンを押しながら回転つまみを DC 直流 V レンジに回して設定しなさい（この手順で自動パワーオフの機能が停止する）。

光検出器

図 2-7 のように光検出器の準備をおこなう。電池ボックス（2 本用）に単三乾電池を 2 本入れなさい（課題 1 で準備済みの場合には必要ない）。光検出器の電源導線の赤色と黒色のミノムシクリップつき電源リード線を電池ボックス（2 本用）の同じ色の導線にそれぞれ接続しなさい。絶縁のためセロハンテープで接続部を覆いなさい。次に、デジタルマルチメータの赤色と黒色の測定導線のミノムシクリップを、光検出器の橙色と青色の出力導線に、それぞれ接続しなさい。絶縁のためセロハンテープで接続部を覆いなさい。

次に、光検出器をスクリーンに取り付ける。図 2-7 のように、光検出器のフォトダイオード（PD）センサーに取り付けてある遮光スリットが水平方向になるように向きに注意して、実験台の表面から高さ 75 mm にスリット位置がそろうように目玉クリップ（小型）を用いてスクリーンのアクリル板と基板のホルダ板の重なった部分を挟んで固定しなさい。

図 2-6(a)のように光検出器の PD の位置が 2 本のガイド線の間となるように注意して、スクリーンを実験台の右端に両面テープで固定しなさい。課題 2-3 では図 2-11 のように光源（LED）と光検出器の間に 4 枚の偏光板を置くので、十分に間隔を空けておくこと。

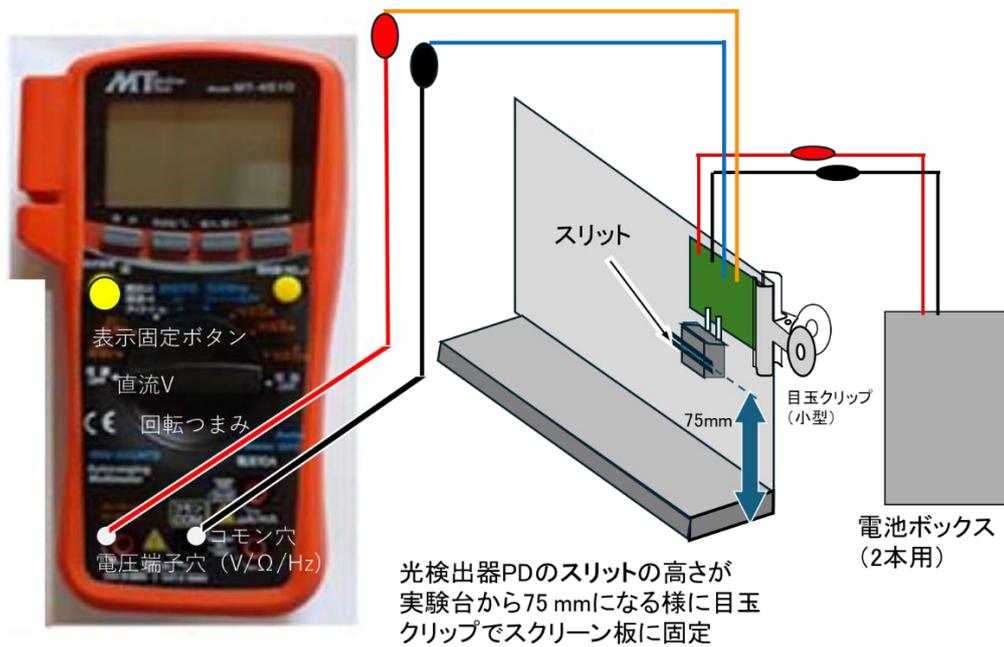


図 2-7 光検出器の配線と固定。

偏光板

まず, 水平方向透過軸固定式偏光板を, 図 2-6 のように横ガイド線に合わせて光源 (LED) の近くに両面テープで固定しなさい。光が偏光板の中央を通るようにすること。次に, 回転式偏光板を両面テープで固定しなさい。図 2-8 のように, 光が回転中心の右側にある偏光板部分 (高さ約 75 mm) を透過するようにすること。分度器部分が 2 本のガイド線内にかからないように手前のガイド線から約 5 mm 離して設置するとよい。

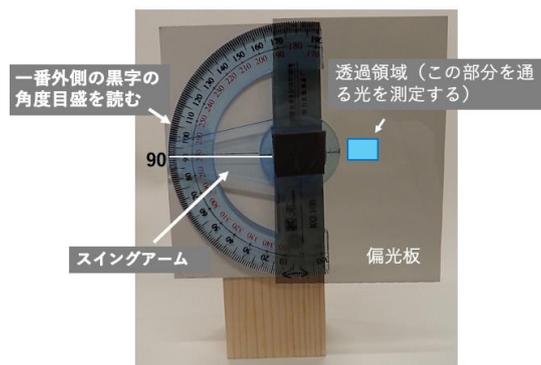


図 2-8 回転式偏光板の角度 α は, 分度器のスイングアームを使って一番外側の黒字の角度目盛りを読む。 $\alpha = 0^\circ$ で透過軸が鉛直に, 写真の状態の $\alpha = 90^\circ$ で透過軸が水平になる。偏光板が外れるのを防ぐため, 角度を変えるときはスイングアーム部分をもって回転させること。

遮光箱

遮光箱を組み立てなさい。図 2-9 に従って段ボールを折り、セロハンテープで固定しなさい。この箱は光検出器に室内照明の直接光などが影響を与えることを小さくするために使う。ここからの実験では、実験台の上に部品を設置した後、上方からこの箱をかぶせて用いなさい。このとき、実験台全体を覆うのではなく、図 2-6 を参照して、回転式偏光板の分度器目盛りが読める程度までかぶせるとよい。遮光箱があると目盛りを斜め方向から読むので、角度の読み取り精度は 1° 程度になるがそれでよい。

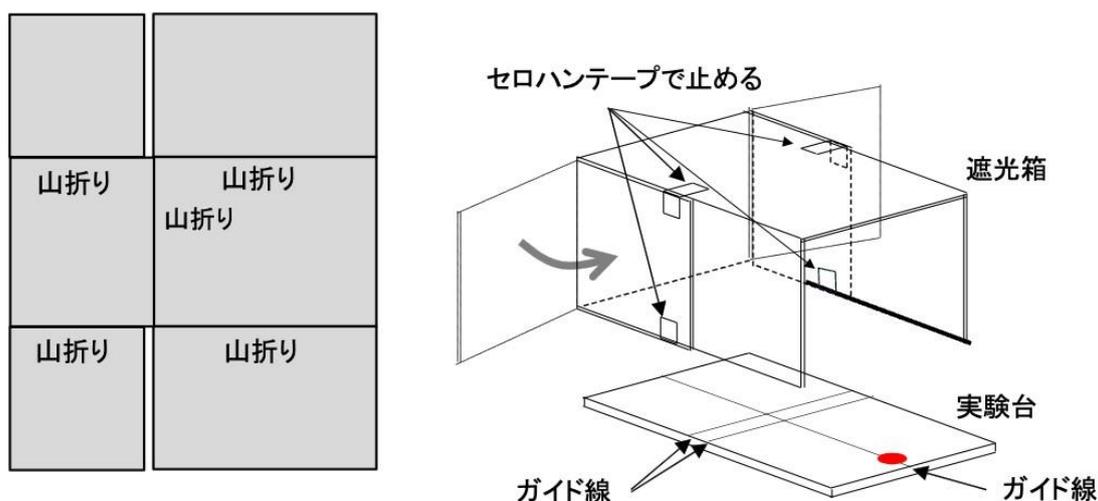


図 2-9 遮光箱の組み立て。LED と光検出器の上方にかぶせて、室内光が直接検出器に入ることを防ぐ。

出力電圧の確認

光源 (LED) と光検出器の両方の電池ボックス (3 本用と 2 本用) のスイッチを ON にしなさい。遮光箱をかぶせた状態で、回転式偏光板を 0° から 180° の範囲で回転させると、光検出器の出力電圧が変化することを確認めなさい。最大値が $100\sim 500$ mV 程度になるはずである。もしも出力電圧が低い、あるいは変化しない場合は、ガイド線に沿って部品が正確に配置されているか、光検出器のスリット部が水平で高さが 75 mm になっているかを確認めなさい。

実験の条件をそろえるために、光源 (LED)、水平方向透過軸固定式偏光板、光検出器の 3 部品は課題 2 の実験中は固定したまま動かさないように注意すること。

光検出器の出力電圧は透過光の強度に比例するので、以下では、いろいろな偏光板の配置を透過した光の強度の代わりに、光検出器の出力電圧を用いて解析・考察することにする。

【課題 2-1 : 2 枚の偏光板透過光の角度依存性】

問 2-1a

回転式偏光板を回し、回転式偏光板の角度 α を 0° から 180° の範囲で 10° 間隔で光検出器の出力電圧 V_2 を測定し、測定結果を解答用紙の表に記入しなさい。さらに、 V_2 の α に対する変化をグラフとして解答用紙に描きなさい。

問 2-1b

出力電圧 V_2 が最大になる角度 $\alpha_{2\max}$ と、そのときの最大出力電圧 $V_{2\max}$ を求めなさい。次に、回転式偏光板を実験台からいったん外し、固定式偏光板 1 枚のみの場合の出力電圧 V_1 を測定しなさい。さらに、その値から、最大透過率 $T_{2\max} = V_{2\max}/V_1$ の大きさを求めなさい。

問 2-1c

問 2-1a で得られたグラフから、出力電圧 V_2 が回転角 α に対してどのような周期をもっているかを調べなさい。さらに、回転角 α は回転式偏光板の透過軸が鉛直線となす角度を表すことと、出力電圧、したがって、透過光強度が、透過光の電場ベクトルの大きさの 2 乗に比例することを使って、出力電圧 V_2 が回転角 α のどのような関数になっているか説明しなさい。

【課題 2-2 : 3 枚の偏光板】

遮光箱を一旦外し、回転式偏光板を問 2-1a で測定した位置に戻して両面テープで固定しなさい。さらに、鉛直方向が透過軸となる固定偏光板を光検出器の直前に図 2-10 のように配置し、両面テープで固定しなさい。そして、遮光箱を再度設置して、以下の測定を実施しなさい。

問 2-2a

回転式偏光板を回し、回転式偏光板の角度 α を 0° から 180° の範囲で 10° 間隔で光検出器の出力電圧 V_3 を測定し、測定結果を解答用紙の表に記入しなさい。さらに、 V_3 の α に対する変化をグラフとして解答用紙に描きなさい。

問 2-2b

出力電圧 V_3 が極大となる角度 $\alpha_{3\max}$ と、そのときの出力電圧 $V_{3\max}$ を求めなさい。(極大値が $0^\circ \sim 180^\circ$ で複数あれば、すべて答えなさい。)

問 2-2c

問 2-2a で得られたグラフから、出力電圧 V_3 が回転角 α に対してどのような周期をもつ

ているかを調べなさい。さらに、出力電圧 V_3 が回転角 α のどのような関数になっているか説明しなさい。

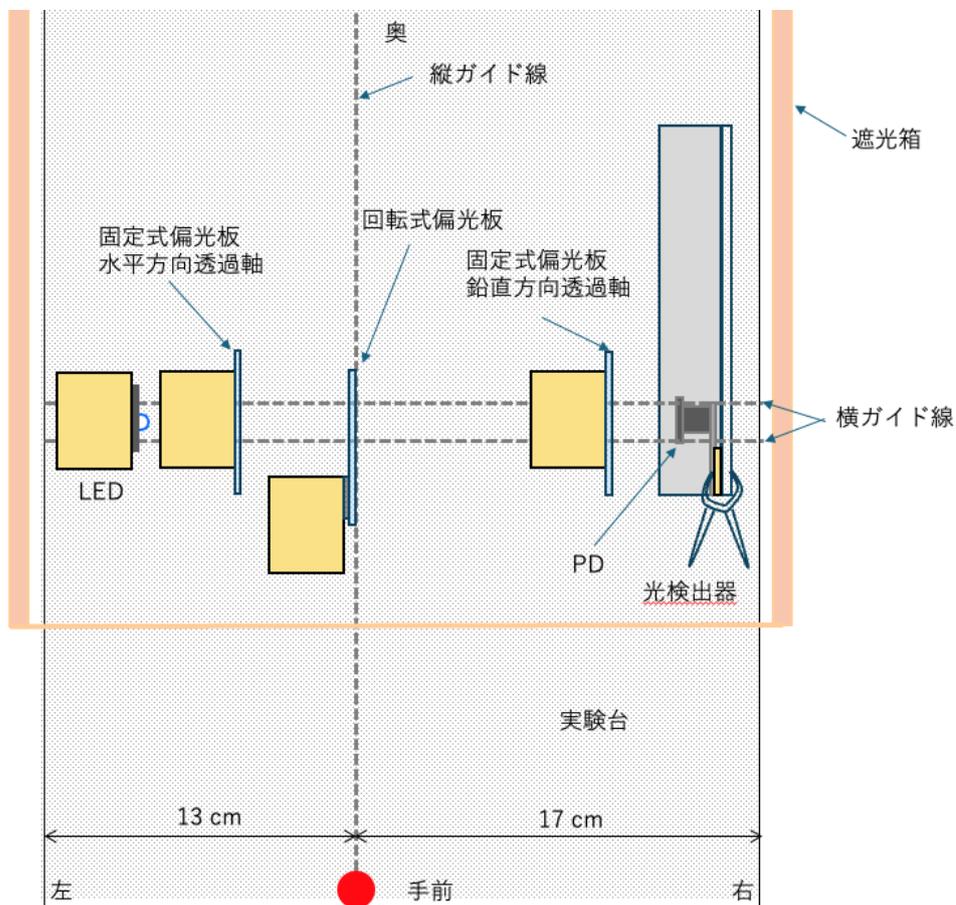


図 2-10 3 枚の偏光板による透過光測定実験の配置。

【課題 2-3 : 4 枚の偏光板】

遮光箱を一旦外し，図 2-11 のように、回転式偏光板 1 と固定式偏光板（鉛直方向透過軸）の間に回転式偏光板 2 を新たに加え，両面テープで固定しなさい。そして，遮光箱を課題 2-2 と同じ場所に戻した後，水平透過軸の偏光板の後ろにある回転式偏光板 1 を $\alpha = 60^\circ$ ，鉛直透過軸偏光板の前にある回転式偏光板 2 を $\alpha = 30^\circ$ に調整しなさい。

問 2-3a

この状態での光検出器の出力電圧 V_4 を測定しなさい。

問 2-3b

課題 2-2 における出力電圧 V_3 が極大値となった場合の出力電圧 $V_{3\max}$ と V_4 を比較し，どちらの出力電圧が高いかを示しなさい。また，その理由を，問 2-1b で求めた $T_{2\max}$ を考慮して説明しなさい。

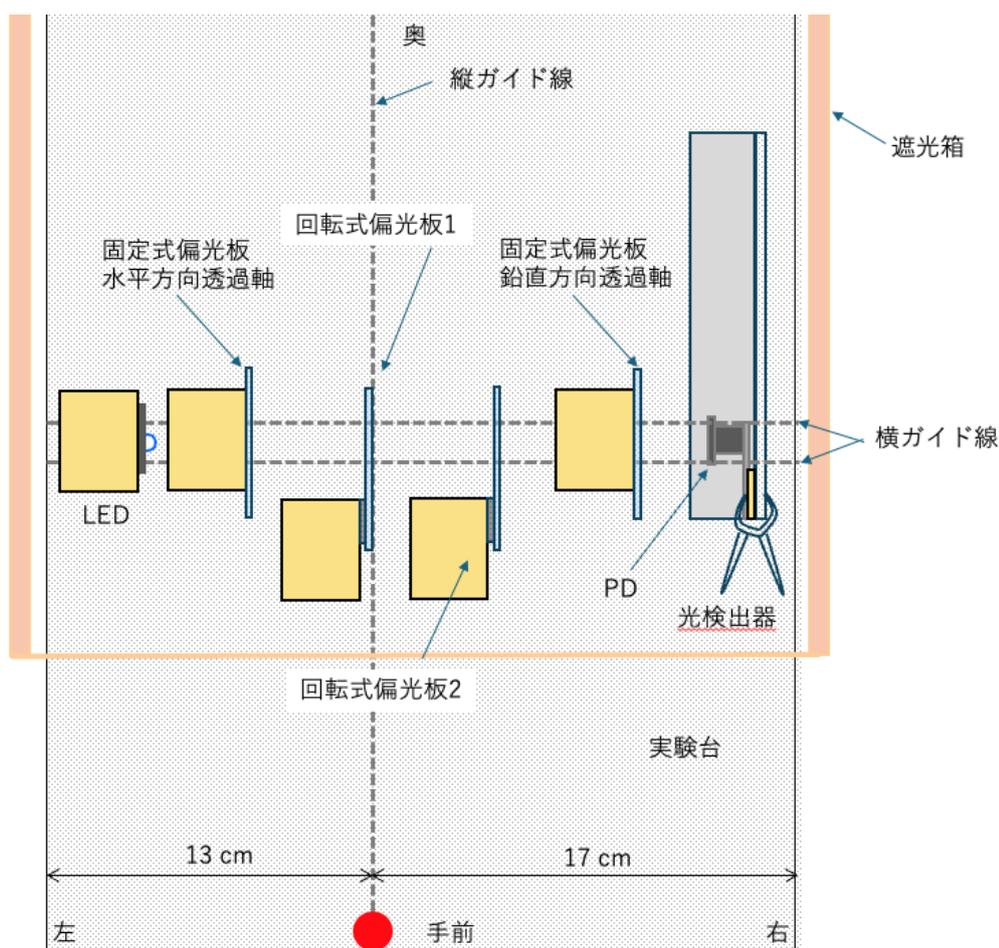


図 2-11 4 枚の偏光板による透過光実験装置の配置。

課題3：光弾性効果による歪みの可視化

【課題の目的】

均一で**等方的**な物体（透明媒質）に力を加えて変形させる（歪ませる）と、偏光の方向（光がもつ電場の振動方向）が歪みの方向に平行か垂直かで屈折率が異なるという現象（**屈折率の異方性**）が生じる。これを光弾性効果という。この屈折率の差を検出することができれば、物体の歪みの方向や大きさを知ることができる。フックの法則（応力が歪みに比例すること）を仮定すれば、応力（物体内部の隣り合う部分同士が及ぼしあう単位面積あたりの力；例えば圧力）の分布を知ることができる。

応力は構造物の安全性を見積もるときに重要であり、プラスチック製の構造体モデルに実際に荷重を与えて応力分布の様子を可視化する手法が実用化されている。

この課題では、アクリル棒を変形させたときに内部でどのような歪みが発生しているかを調べてみる。

【解説1：弾性体の力学】

歪みと応力

金属やガラスなどの硬い物質でも外から力を加えるとわずかに変形する。力を取り除いたあと、元の形状に戻るような変形を**弾性変形**といい、物質のそのような性質に着目するとき、これを**弾性体**という。ここでは、弾性体の力学を簡単に紹介しよう。

図3-1に示すように、物体の中に微小な直方体（破線で示す）を考える。図3-1(a)上図のように物体の微小部分に矢印で示したような引っ張りの力を加えると、力の大きさに応じてわずかに伸びる。逆に、押す力を加えれば縮む（図3-1(a)下図）。これらの変形を**伸縮歪み**という。伸縮歪み s は

$$s = \frac{\Delta l}{l} \quad (3-1)$$

で定義される。ここで、 l は直方体の一辺の長さ、 Δl は伸びた長さである。

図3-1(b)に示すのは**せん断歪み**（この課題では扱わない）であり、物体内に考えた微小直方体の断面が平行四辺形に変形する。

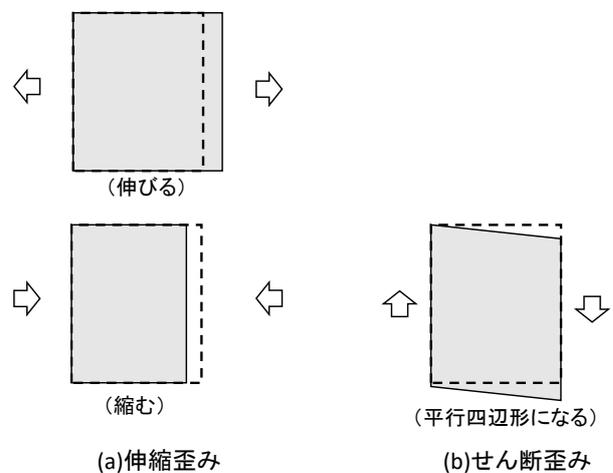


図3-1 応力と歪みの定義。

たわみ変形の形状

図 3-2(a)に示すように、(y 方向の) 太さ t の棒の中心 ($x = 0$) を支点として支え、両端近く $x = \pm a$ の位置 (図の押しネジの位置) に下向きの同じ大きさの力を加えると、変形してたわむ。棒の断面の中心を結んだ線を中心線という (図 3-2(a)の一点鎖線)。中心線の鉛直方向の変位で表されるたわみ変形の形状は支点に関して左右対称であり、たわみが小さい場合には、たわんだ棒の形状は $0 \leq x \leq a$ の領域で位置 x の 3 次関数で表される。支点 ($x = 0$) の近傍の形状を円弧で近似すれば、その半径 (曲率半径という) は、

$$R = \frac{a^2}{3U} \quad (3-2)$$

となることが知られている。ここで、 U は押しネジの位置 ($x = \pm a$) での中心線の変位の大きさである。

曲率半径と位置の表し方

変形したアクリル棒の形状は図 3-2(b)のように局所的に円弧で近似することができる。その半径 r を曲率半径、中心を曲率中心という。

変形前のアクリル棒の中の位置は、支点の真上の中心線上に原点 O をとり、座標 (x, y) で表す。この課題では、変形したアクリル棒を扱うので、アクリル棒内の部位の変形後の位置と変形前の位置を図 3-2(b)のように対応させる。すなわち、変形前に座標 $(x, 0)$ にあった媒質の部位 P は変形後には、原点 O から (曲がった) 中心線に沿って x だけ進んだ位置に変位し、変形前に座標 (x, y) にあった部位 Q はその位置から中心線に垂直に y だけ進んだ位置に移動している。以下では、変形前の状態において座標 (x, y) で表される位置にあった部位 Q に生じた歪みを $s(x, y)$ と表すことにする。

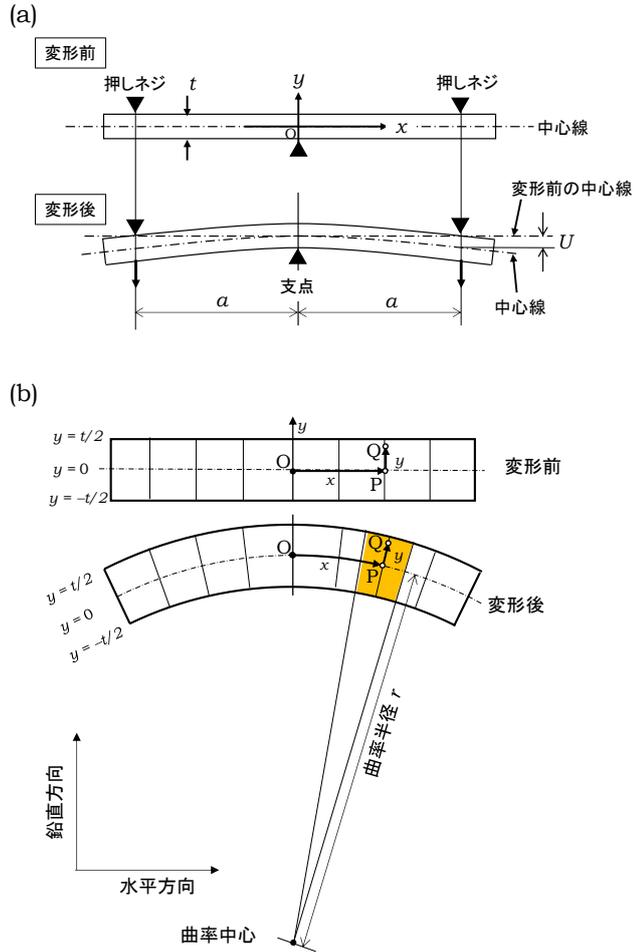


図 3-2 (a) たわんだ棒の形状。(b) たわんだ棒の中での位置の表し方と曲率半径。

【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】

屈折率変化と偏光の関係

均一で等方的な物体（媒質）に力が加わり図3-1(a)のような伸縮歪みが生じると、屈折率がわずかに変化する。その変化は伸縮方向と偏光方向が平行の場合と垂直の場合で異なる（原理については【補足解説】を参照のこと）。

x, y, z 方向の偏光に対する屈折率をそれぞれ n_x, n_y, n_z とすると、 x 方向に伸縮しているとき

$$n_x \neq n_y = n_z \quad (3-3)$$

である（偏光方向は光の進行方向に垂直であることに注意せよ）。このとき、媒質を透過した光の偏光方向がどのような振舞いを示すか見てみよう。

図3-3(a)のように x 軸と y 軸に対して 45° 傾いた偏光方向をもった光が $-z$ 方向からこの媒質に入射しているとする。課題2ですでに学習したように、この光は x 偏光（ x 方向に偏光した光）と y 偏光の光に分解できる。図3-3(b)は、ある瞬間にとらえた媒質内の電場ベクトルの x 方向成分 E_x と y 方向成分 E_y の様子を描いたものである。光が媒質に入る位置で E_x, E_y とともに正なので、合成した電場ベクトルは（図3-3(b)では）右上向き 45° になっている。この例では y 偏光に対する屈折率が x 偏光のそれより小さいので、波長が長くなり、媒質から出る位置では x 偏光と y 偏光との間に π の位相のずれが生じることにより、 E_x が極大、 E_y が極小になっている。これを合成すると、図のように右下向き 45° になる。つまり、偏光方向が 90° 回って出て来ることになる。媒質の屈折率を n 、（ z 方向の）厚さを w とすると、この媒質の中に入っている波長 λ/n の波の周期数は nw/λ となる。ここで、 λ は真空中の波長である。

したがって、2つの偏光成分が媒質内にもつ波の周期数の差は、

$$N = \frac{n_x w}{\lambda} - \frac{n_y w}{\lambda} = \frac{w}{\lambda} \Delta n, \quad \Delta n = n_x - n_y \quad (3-4)$$

と書くことができる。媒質を出る位置で位相が π ずれる条件は、 N が半整数（整数 + $1/2$ ）となることである。図3-3(b)の例は $N = 1/2$ の場合に相当する。 N が整数ならば位相が元に戻るので、偏光の方向は出口では元の方向に戻っている。

歪みが小さいとき、生じる屈折率の差は歪み s に比例するので、

$$\Delta n = C s \quad (3-5)$$

と書くことができる。 C は物質固有の定数である。

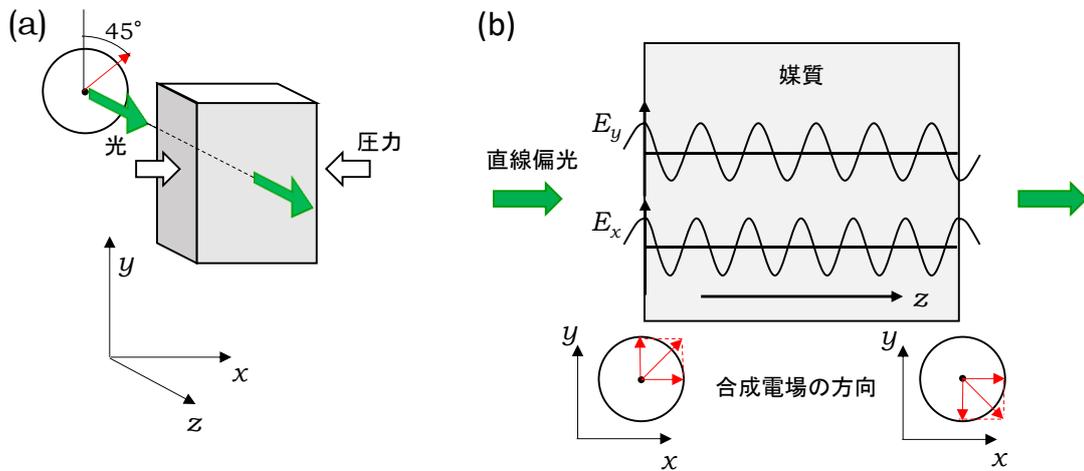


図 3-3 (a) x 軸と y 軸に対して 45° 傾いた偏光方向をもった光が $-z$ 方向から媒質に入射している場合（観測者側から見た図）。(b) 媒質への入口と出口における電場ベクトル（赤色）と媒質中の E_x と E_y 。

実験の概要

図 3-4 に実験の概要を示す。2 枚の偏光板の間に置かれたアクリル棒を曲げ試験器によって変形させ、アクリル棒を透過した光源（LED）の光をスクリーンに映し出し、歪みによる偏光状態の変化を観察する。また、アクリル棒を変形させながら、光検出器を用いて透過光強度の変化を測定することで、歪みと屈折率の異方性との関係を明らかにすることが目標である。各課題で部品の配置が異なるので、各課題に対応する図を参照して実験すること。

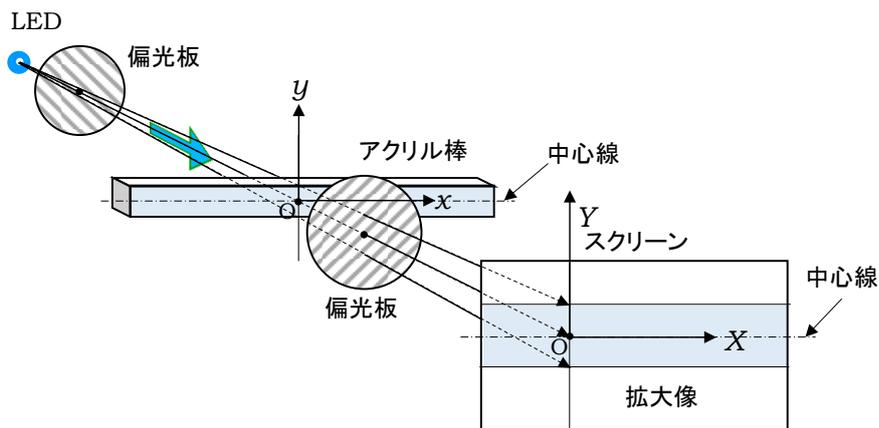
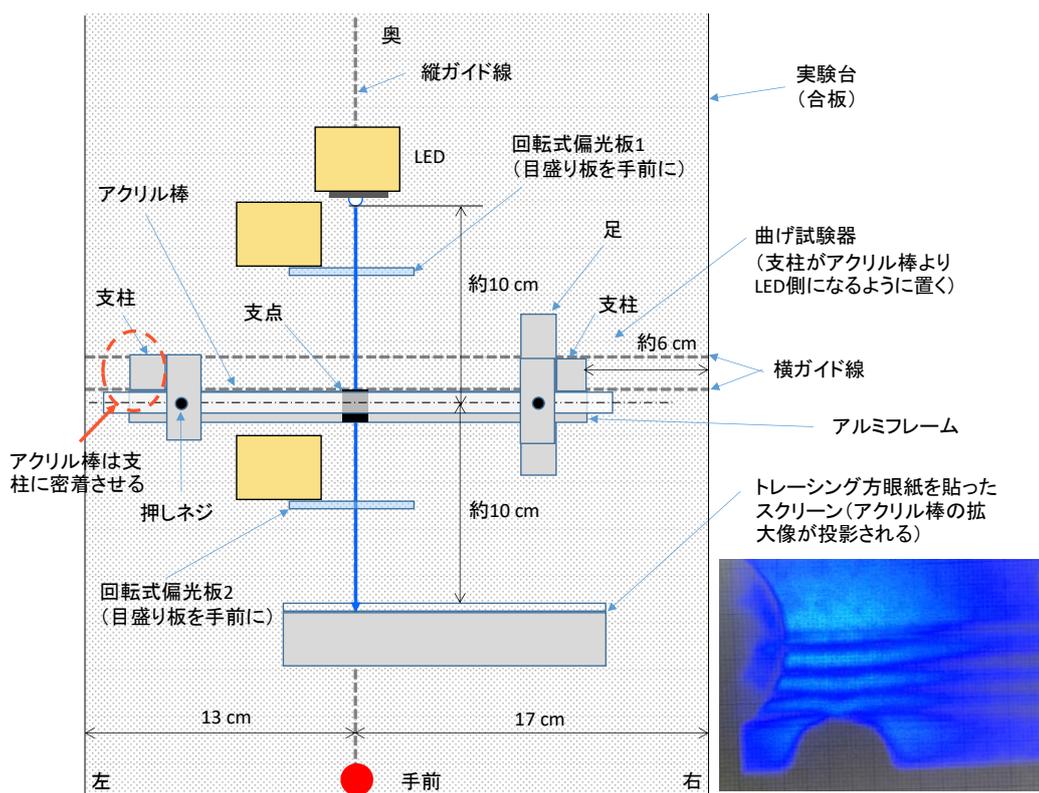


図 3-4 実験の概要。光源（LED）から出た光を偏光板によって直線偏光とし、アクリル棒と 2 枚目の偏光板を通し、その光をスクリーンに投影して観察する。拡大像における座標は大文字 X, Y で表す。座標の原点 O は中心線上にとる。

【実験の準備】

実験台

問 3-1, 3-2 の配置を図 3-5 に示す。課題 2 と配置が異なるので、課題 2 で取り付けた部品は外しておくこと。実験台は赤色のシールの貼ってある辺が手前に来るように、滑り止めシートを敷いた上に置きなさい。なお、滑り止めシートが偏光板やプラスチック製の部品に接触すると、曇りができて取れなくなるので、十分に注意すること。



曲げ試験器

図 3-6(a)に組みあがった状態の曲げ試験器の写真と各部の名称を示す。曲げ試験器は足を 90°回転した状態で箱に納められている。足のネジを六角レンチで少し緩め、本体を 90°回して起こし(図 3-6(b)),さらに図 3-6(c)のように足が左右均等になるようにスライドし、実験台に安定して自立する状態にしてから、ネジをしっかり締めなさい。

足の組み立てがうまくいかない場合は、番号札を使って監督者に知らせなさい。

図 3-6(a)の写真のように、曲げ試験器のアルミフレームの中央側面に鉛筆で縦線を引き、その位置で半円柱形の支点をフレームの溝に差し込みなさい(両面テープでフレームに固定)。

図 3-5 および図 3-6(a)の写真のようにアクリル棒 (10 mm × 10 mm × 250 mm) をそ

の両端が押しネジの外側に等分にはみ出るように（また支柱に密着するように）セットしなさい。赤色のシールが貼ってある面を上にする。亚克力棒が滑り落ちないように、半円柱形支点と亚克力棒との間に両面テープを挟んでおくこと。

図 3-5 のように曲げ試験器の支柱を実験台の 2 本の横ガイド線に合わせ、支点の位置が縦ガイド線の上に来るようにして、支柱と足の接地面に両面テープを貼って固定しなさい（足が右に来るように）。

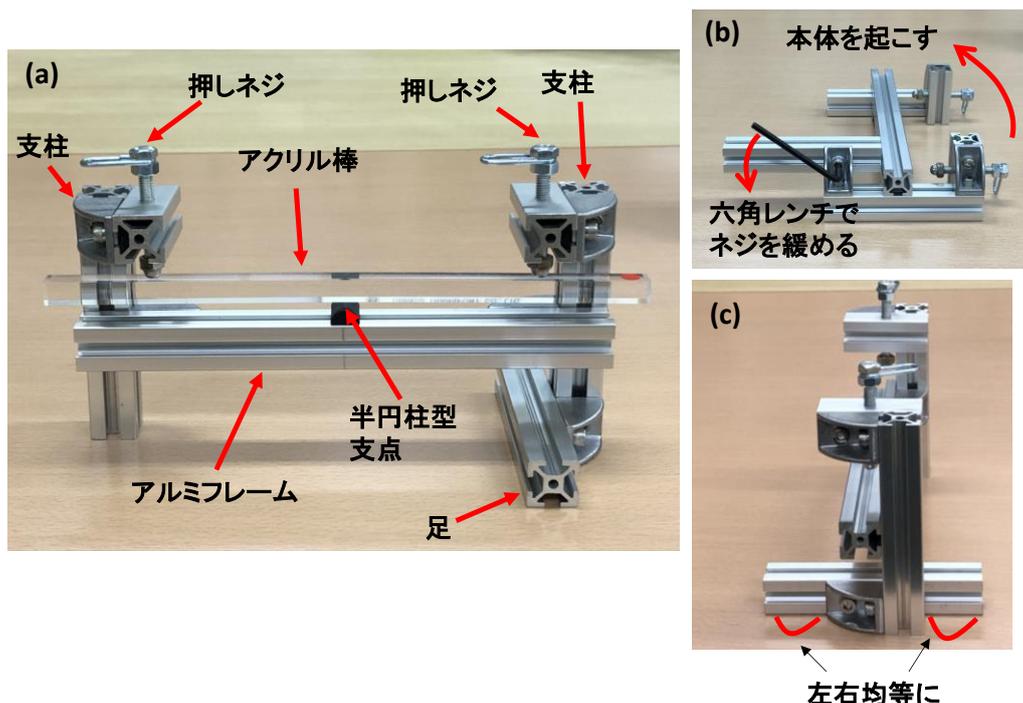


図 3-6 (a) 曲げ試験器の構造と各部の名称。(b)足の組み立て。ネジを少し緩めて本体を 90°回転する。ナットが抜けてしまった場合は、フレームの溝に差し込んでからねじ止めする。(c) 完成した状態。

光源（青色 LED）

課題 2 で準備 (p.21) した光源 (LED) を、図 3-5 のように、亚克力棒から約 10cm 離れた縦ガイド線上に固定しなさい（両面テープは数回着脱が可能である）。

回転式偏光板

2 枚の回転式偏光板を図 3-5 のように配置する。光源側から順に回転式偏光板 1, 2 と呼ぶ。このとき、偏光板の透過領域 (p.22 の図 2-8 参照) が縦ガイド線上に来るように注意すること (課題 2 図 2-8 参照)。偏光板は必要に応じて両面テープで実験台に固定すること。

スクリーン

スクリーンの手前側にトレーシング方眼紙をセロハンテープで貼り付けなさい(課題 1 で取り付けた方眼紙や、課題 2 で取り付けた光検出器は外しておく)。図 3-5 のように、スク

リーンはアクリル棒から約 10 cm 離して配置しなさい。光源 (LED) を点灯し、スクリーン上にアクリル棒の支点付近の影が映っていることを確かめなさい。眼の位置をスクリーンの高さにもってくると像が明るく見えるはずである。アクリル棒の影が見えにくいときは、偏光板の角度や LED の向きを調整してみるとよい。スクリーンは必要に応じて両面テープで実験台に固定すること。部屋の照明が邪魔になる場合は遮光箱を使用するとよい。

準備の確認

曲げ試験器の両端の押しネジを回してアクリル棒がほぼ水平になるように調整しなさい。この段階ではアクリル棒を変形させないために、押しネジは力を加えずにわずかに触れている状態にしておくこと。この状態を、棒の変形前の状態 ($U = 0$) とする。

偏光板 1 を 135° (-45° と等価) に固定し、偏光板 2 を回して、アクリル棒の内外を含めて全体が一樣に明るくなる角度と、暗くなる角度があることを確認しなさい。次に、偏光板 2 を最も暗くなる角度に固定し、アクリル棒の端を手で強く押してみてもアクリル棒の影の中に横向きの縞が現れることを確認しなさい (図 3-5 の写真)。

この現象は次のように理解できる。偏光板 1 を透過した光の偏光方向が 135° (-45° と等価) 方向を向いているので、水平方向と鉛直方向の二つの偏光成分が等量ずつ含まれていることになる (課題 2 (p.17, 図 2-2) を参照)。アクリル棒を曲げると上側は伸び、下側は縮むので、その歪みによって、鉛直方向に偏光した光と水平方向に偏光した光の屈折率が等しくなくなり、棒を通過するときに両者の間に位相差ができる。その位相差が π の奇数倍 (N が半整数) のときは、偏光方向 (棒を透過後の 2 つの偏光成分の合成として作られる電場ベクトルの方向) が 90° の奇数倍変わるので、暗かった背景が明るくなる。位相差が π の偶数倍 (N が整数) ときは、偏光方向がさらに 90° 変化して元に戻るため、再び暗くなる。棒の場所によって歪みの大きさが異なるので縞模様が見える。【解説 2】の式(3-4)を参照

アクリル棒を手で押して曲げてみて、棒の中心線付近は常に暗いままであることを確認しなさい。このことから、ここでは屈折率の異方性は生じていない、すなわち伸縮歪みはないことがわかる。

【課題 3-1 : 縞の明暗】

問 3-1

偏光板 1 を 135° 、偏光板 2 を 45° に設定し、押しネジを回してアクリル棒を曲げ、縞が 2~4 本見える状態にする。すべての実験で、対称性を保つために左右の押しネジを $U = 0$ から同じ角度だけ回すこと。偏光板 1 はそのままにして、偏光板 2 を回し、アクリル棒の外側の背景が最も明るくなる角度①と、最も暗くなる角度②を記録し、①、②の場合について半円柱型支点付近の棒の内部での縞のでき方を簡単にスケッチしなさい。暗線 (暗い帯の中心) の位置を実線で示すこと。①と②の違いとそうなる理由を述べなさい。観察が終わったら押しネジを $U = 0$ の状態まで緩めておくこと。

【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】

光学的測定から歪みの大きさを求めるには、歪みと屈折率の差の関係を知らなければならない。歪みが小さいとき、歪みと屈折率変化は比例すると考えられるので、本課題ではその比例係数を求めてみよう。実験配置を図 3-7 に示す。LED から出た光をアクリル棒に当て、透過した光を光検出器（受光部分にフォトダイオード（PD）が入っている）で受けると、アクリル棒の曲がりによる縞の移動に応じて透過光強度が変化するので、それに比例して光検出器の出力電圧が変化する。以下では、この出力電圧の測定を行うための準備を行う。

実験の準備

図 3-7 を参照して実験装置を組み立てなさい。本課題では、鮮明な像を得るために、LED とアクリル棒の間隔を少し広く（15 cm 程度に）するとよい。回転式偏光板 2 を取り外し、偏光の透過軸に対して 45° にカットした偏光板（課題 2, 3 の器具・部品の写真 11）を曲げ試験器のフレームに両面テープで固定しなさい。このとき、図 3-7 の写真に示すように、透過軸方向を右上向きにして、支点から押しネジの位置までをカバーするように注意すること。回転式偏光板（残された回転式偏光板 1）を背景が明るくなる角度に合わせ、スクリーンにアクリル棒の支点付近が鮮明に映るように LED の向きやスクリーンの位置を調整し、それぞれ両面テープで固定しなさい。

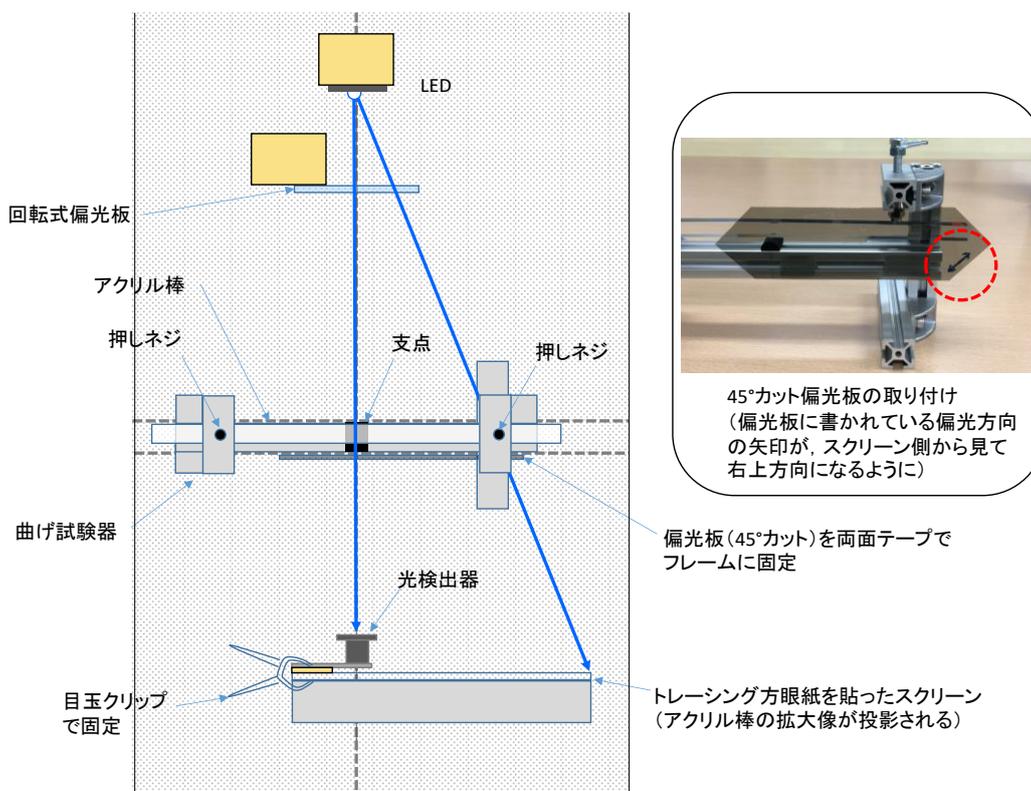


図 3-7 課題 3-3, 3-4 の実験配置と 45° カット偏光板の取り付け。

スクリーン上でアクリル棒の位置を確認したのち、図 3-8(b)に示すようにアクリル棒の支点の真上で、上端近く（端からアクリル棒上での実寸で 1 mm 程度）を通った光が光検出器のスリット（幅 1 mm）に入るように、光検出器の位置を調整し、目玉クリップ（小型）でスクリーンの枠に固定しなさい。このとき、スリットがアクリル棒に平行になるように注意すること。

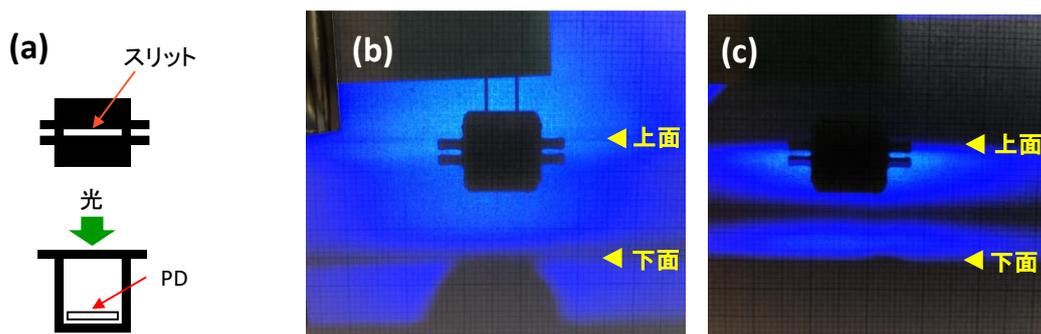


図 3-8 (a) 光検出器の受光部分の構造。(b) 押しネジを緩めて、LED 側の回転式偏光板をアクリル棒の外側の背景が明るくなる角度にしたときスクリーンに映った像。アクリル棒の外形と支点と光検出器の受光部分が映っている。(c) 押しネジを使ってアクリル棒を少し変形させ、回転式偏光板を背景が暗くなる角度に調整した状態。縞の明るい部分の光が光検出器のスリットに入っている。黄色い三角印はアクリル棒の上面、下面の位置を示す。

問 3-2a

実験条件として、支点から押しネジまでの距離 a 、光源からアクリル棒までの距離 L_1 、光源からスクリーンまでの距離 L_2 を測り記録しなさい（およその値でよい）。光検出器のスリットの y 方向（アクリル棒の中心線を原点として）のスクリーン上での位置 Y_{PD} （大文字はスクリーン上の座標を表す）を測定して記録しなさい。さらに、像の倍率 $A = L_2/L_1$ を考慮して、光検出器に入った光が通過したアクリル棒における位置 y_{PD} を求めなさい。

次に、回転式偏光板の角度を背景が最も暗くなる位置に固定しなさい。アクリル棒を透過した光を光検出器で受けてデジタルマルチメータで出力電圧を測定し、押しネジの移動距離すなわち $x = \pm a$ における変位の大きさ U の関数として記録し、グラフにプロットしなさい。さらに、そのグラフから変化の周期を求めなさい。測定が終わったら押しネジを $U = 0$ の状態まで緩めておくこと。

【注意 1】 デジタルマルチメータの使い方は p.22 の図 2-7 と対応する本文 (p.21) を参照のこと。

【注意 2】 対称性を保つために左右の押しネジを同じ角度だけ回すこと。押しネジは 1 回転で 1 mm 進む。ハンドルの角度を目安にして 1/4 回転まで読み取ることができる。

【注意 3】ネジを回していくとアクリル棒がフレームに当たるのでそれ以上回さないように注意すること。**アクリル棒が破損する危険性がある。**

【注意 4】室内照明の光が光検出器に入らないように、遮光箱 (p.23) を適当な位置に置くこと。LED をオフにしてみると、余計な光がどれくらい来ているかわかる。実験者の立ち位置で変化することもある。

【注意 5】アクリル棒は高分子化合物でできていて、外力に対する分子の再配列に少し時間がかかる(弾性余効という)ので、ネジ位置を設定後、信号が安定してから数値を読み取ると精度が上がる。(安定するまでの時間はネジの回転方向、回転角などの条件に依存して 5~30 秒程度。)

問 3-2b

出力電圧が極大値になる押しネジの位置 2 か所について、そのときの U の値 U_1 および U_2 を求めなさい。さらに、式(3-2)を使って、それぞれの場合における支点の近傍での棒の曲率半径 R の値 R_1 および R_2 を求めなさい。

問 3-2c

中心線を基準にした図 3-2(b)の座標系で、上に凸にたわんだ棒の内部の上半分 ($y > 0$) は x 方向に引き伸ばされ ($s > 0$)、下半分 ($y < 0$) は x 方向に押し縮められている ($s < 0$)、中心線上 ($y = 0$) では伸縮されない ($s = 0$)。幾何学的考察により、棒の曲率半径が r である部分の内部の歪みの大きさ s を y と r で表しなさい。さらに、この式を用いて、第 1 極大と第 2 極大における歪みの大きさを求めなさい。

問 3-2d

以上の結果から、式(3-5)の係数 C の絶対値 $C_{\text{abs}} = |C|$ を求めなさい。ただし、青色 LED の波長は 470 nm (4.7×10^{-7} m) である。

【ヒント】極大になるのは、 N が半整数のときなので、極大から隣の極大までの間に、 N が 1 だけ変化しているはずである。ただし、増加したか減少したかは知ることはできない。

【課題 3-3：アクリル棒内部の歪みの分布】

屈折率差の変化、すなわち歪みが棒の中の各位置でどうなっているかは、縞の形状を解析することで知ることができる。たとえば、連続した暗い部分(または明るい部分)は同じ大きさの歪みをもっている、すなわち等歪面^{わい}を表している。縞の間隔が狭いところは歪みの変化率が大きい。本課題では、曲がったアクリル棒の中に生じる歪みの分布 $s(x, y)$ を実験的に求める。

実験の準備

スクリーンから光検出器を取り外し、スクリーンにアクリル棒の支点から片方の押しネジまでが映るように LED の向きやスクリーンの位置を調整し、スクリーンをあらためて縞模様を観察しやすい位置に設定して、両面テープでしっかりと固定しなさい。このとき、倍率が場所によって変わることを避けるために、アクリル棒とスクリーンが平行になるように注意すること。スクリーン枠にトレーシング方眼紙をテープで貼り付けなさい。

【ヒント】LED からアクリル棒までの距離は 15 cm 程度が良いであろう。スクリーンは、像の見える範囲、倍率、像の鮮明度などを考慮して実験しやすい位置に設置すること。

問 3-3a

1. 測定の準備

像の倍率 A を求めるために、光源からアクリル棒までの距離 L_1 と光源からスクリーンまでの距離 L_2 を記録しなさい (およその値でよい)。押しネジを回して支点付近に 4 本以上の明るい縞が見える程度で止めなさい。LED 側の回転式偏光板を背景が明るくなる角度に設定し、アクリル棒の外形を確認しなさい。次に、回転式偏光板を背景が暗くなる角度に設定して、縞の位置を読み取るために中央の支点と押しネジの位置の間の棒上に 4~6 か所程度の測定位置 x_j ($j = 1, 2, 3, \dots$) を設定し、トレーシング方眼紙上の対応する位置 X_j に縦線を描きなさい。ただし、支点の位置を $X = 0$ とすること。

2. 測定

トレーシング方眼紙上に描いた縦線と、明線および暗線の交点に (明線か暗線かの区別がつくようにして) 印をつけなさい。トレーシング方眼紙をスクリーンから外し、まず、縞間隔の y 依存性を調べるために、縞間隔がはっきり異なる 2 か所の X_j を選び、印をつけた交点 $(X_j, Y_j(N))$ の位置を読み取り、表に記入しなさい。ただし、中心線上の暗線の位置を $Y = 0$ とすること。

ここで、縞番号 N を式(3-4)において $n_x > n_y$ と便宜的に仮定し、以下のように定義する。すなわち、中心線に対応する暗線を $N = 0$ とし、それより上を $N = 1/2, 1, 3/2, 2, \dots$ 、下を $N = -1/2, -1, -3/2, -2, \dots$ とする ($n_x < n_y$ の場合は N の符号が反転する)。半整数は明線、整数は暗線に対応する。

【ヒント】縞位置の読み取りには、0.5 mm 目盛りの定規と必要ならば虫めがねを使用する。

【補足】中心線から縞までの距離 $|Y_j(N)|$ の値は、本来は、中心線に垂直に測定すべきであるが、中心線の傾きは小さいので、鉛直線に沿って測定しても、誤差は十分小さい。

3. グラフによる解析

縞番号 N を横軸に、 $Y_j(N)$ を縦軸にとり、1つのグラフに、測定位置 X_j ごとに記号を変えてプロットしなさい。このグラフから、棒上の各測定位置で、歪み s と y はどのような関係にあるといえるか、結論に至る考え方とともに答えなさい。

問 3-3b

次に、縞間隔の X 方向依存性を解析する。絶対値の等しい縞番号に属する上下対称の位置関係にある縞（明線と明線，暗線と暗線）の間隔 D をトレーシング方眼紙からあらためて読み取り，表に記入しなさい（ D と X は拡大像における値）。 $1/D$ を X の関数として 1 枚のグラフに，縞の対の番号 $|N|$ ごとに記号を変えてプロットしなさい。

中心線上では伸縮歪がないことと，縞の間隔の逆数 $1/D$ が歪みの変化率に比例することに注目して，このグラフから，歪み s は x のどのような関数になっているといえるか，結論に至る考え方とともに答えなさい。

【ヒント】 中心軸から一定の距離のところでの歪みの振舞いを考えてみるとよい。

【課題 3-4：支点を板にした場合】

押しネジを緩めて半円柱形の支点を取り外し，黒アクリル板（長さ 50 mm）を図 3-9 の写真のようにアルミフレームの中央に設置し，ネジでアクリル棒の両端を押して，縞模様を観察しなさい（アクリル棒や偏光板などは課題 3-3 と同様の配置でよい）。

問 3-4

黒アクリル板の上にある部分の 3~4 点を含む数点で，上下対称の位置関係にある明線と明線または暗線と暗線の間隔を記録し，表に記入しなさい。縞間隔の x 依存性は課題 3-3 の場合とどのように違うか。また，そうなった理由を定性的に述べなさい。

【ヒント】 理由については補足解説「たわんだ棒における力とモーメントのつり合い」が参考になる。

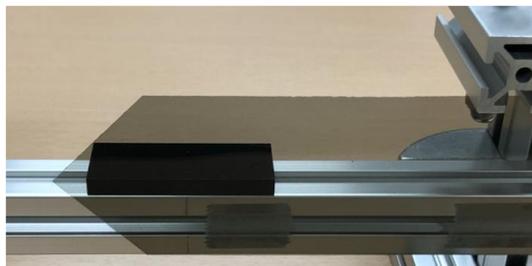


図 3-9 黒アクリル板の取り付け方。

【補足解説：弾性体の力学と光弾性効果】

フックの法則とヤング率

図 3-1 に示したような変形を起こす力を単位面積あたりで表したものが**応力**である。(a)の場合の応力は面に垂直に働いているので、圧力（正または負）といい換えても良い。(b)の場合の応力はせん断応力という。変形が小さいとき、**フックの法則**が成り立ち、変形（伸縮歪み）は応力に比例する。したがって、応力 p は、

$$p = E s \quad (3-6)$$

と書くことができる。 E は物質の硬さを表す定数で、**ヤング率**とよばれている。

たわんだ棒における力とモーメントのつり合い

棒の中央を図 3-10(a)のように支え、支点から等距離 a にある両端近くの点で均等に押し下げて変形させることを考える（棒自体の質量は無視する）。中央に大きさ F_2 の上向きの力が働いているならば、**力のつり合い**から両端には大きさ $F_1 = F_2/2$ の下向きの力が働いていなければならない。棒の太さ t が長さ $2a$ より十分に細いと仮定すると、せん断力（図 3-1(b)を参照）による変形は無視できる。

このとき、棒の内部にどのような応力（図 3-1 を参照）が生じて

いるかを考えてみよう。そのためには(b)のように点 x で棒を左右 2 つのブロックに分けて考えると分かりやすい。灰色で示した右のブロックの力の釣り合いから右部分の左端には F_1 の力が上向きに働いている。 x 点における**曲げのモーメント**は時計回りに

$$M(x) = F_1(a - x) \quad (3-7)$$

である。このままでは右のブロックが回転してしまうので、これ打ち消すモーメントが断面から与えられているはずである。(c)は接合部分を拡大して模式的に示している。上半分は引き延ばされ、下半分は押し縮められているので、(d)に示すようにその反作用として右部ブロックの左端には、大きさ F_B の偶力が働き、反時計回りのモーメントが与えられ、平衡を保っている。実際の力は断面全体に分布しているが、ここでは F_B で代表させている。

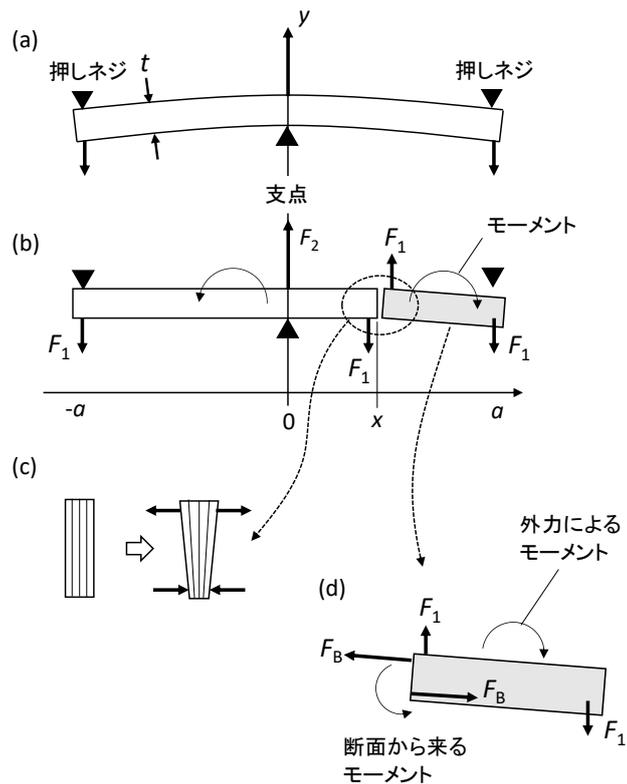


図 3-10 棒のたわみと内部応力，曲げモーメント。

歪みによる屈折率の変化

屈折率 n は真空中の光速 c と媒質（物質）中の光速 v の比

$$n = \frac{c}{v} \quad (3-8)$$

で定義される。真空の誘電率を ϵ_0 、透磁率を μ_0 とすると、

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (3-9)$$

と表される。一方、（磁性をもたない）媒質中の光速は

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu_0}} \quad (3-10)$$

と与えられる。ここで ϵ は、

媒質の誘電率であり、

$$\epsilon = \epsilon_0 + \frac{P}{E} \quad (3-11)$$

と与えられる。 P は外から加

えられた電場 E によって媒質の中に誘起された電氣的な分極である。 P/E は分極し易さの指標となる。媒質の中にある電子の雲が外部からの電場に応答して変形すれば分極が生じる。そうすると $P/E > 0$ 、すなわち $\epsilon > \epsilon_0$ となるので、 v は小さくなり、屈折率 n は大きくなる。光の電場に応答する電子が多く含まれていれば、屈折率は大きくなる。例えば、冷たい空気の方が、屈折率が高いことは、この式から理解できる。

次に、歪みと屈折率の関係を考えてみよう。実際のミクロな現象は非常に複雑なので、ここでは、歪みによって屈折率が変化し得ることだけを定性的に理解してもらう。図 3-11(a) は歪みのない等方的な媒質の場合である。光の電場によって電子の雲が変位して分極を生じるが、電場がどの方向であっても同じ大きさの分極が生じる。

図 3-11(b) は物体の微小部分が横方向に圧縮されている場合である。この場合は電子の雲が最初から極くわずかであるが歪んでいる。そこに光の電場がかかると、右側に示すように電子の雲が変位するが、その変位の仕方は、上下方向と左右方向で等価ではない（分極率が異方性をもつ）。したがって、誘電率や屈折率も異方性をもつと予想される。

弾性光学定数

本課題では、歪みと屈折率変化の関係を求めたが、通常は応力と屈折率変化の関係が用いられ、その係数がデータとして提供されている。ヤング率 E が既知であれば、式(3-6)を使って応力を使った表式に変換できる。

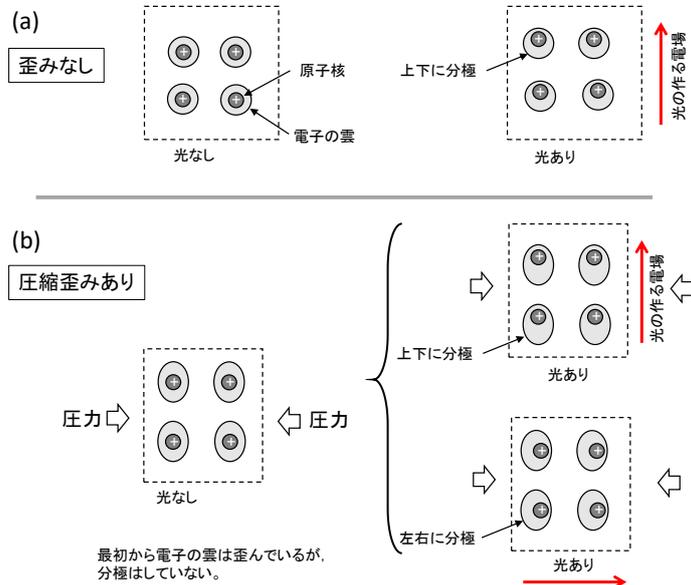


図 3-11 光弾性効果の説明（概念図）。

