

物理チャレンジ 2015
実験問題
2015 年 8 月 19 日 (水)

諸注意・実験器具確認	13 : 40	～	13 : 50
実験問題にチャレンジ	13 : 50	～	18 : 30
実験器具後片付け	18 : 30	～	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、封筒（解答用紙、下書き用紙が入っている）、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せよ。
3. チャレンジ開始後、次ページ以降に記載の<直流電源装置・デジタルマルチメーターの使用方法>をおこなった後、課題に取り組むこと。
4. 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場所に記入すること。下書き用紙は回収・採点しないので、解答はすべて解答用紙に記入すること。
5. 持参した筆記用具と、与えられた実験装置、部品、定規、電卓以外は使用してはならない。ただし、電卓は自分の物を使用してもよい。
6. 実験中に部品を壊した場合には、1回だけ新しいものと交換できるので、手をあげて監督者に申し出ること。2回以上同じ部品を壊した場合には、さらに新品と交換できるが、減点となる。ただし、数には限りがあるので、交換できない場合もある。
7. チャレンジ開始後から 17 : 10 まではチャレンジを終了することはできない。
8. チャレンジ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、チャレンジを終了するときには、手をあげて監督者に知らせること。
9. 終了の合図があれば、解答用紙を封筒の中に入れ、机の右側におく。その後、実験器具をもと通りに箱に入れること。また、机上に貼られたチャレンジ番号と氏名が書かれた紙をはがし、箱に入れること。問題冊子と下書き用紙は持ち帰ってよい。

＜直流電源装置，デジタルマルチメーターの使用方法＞

ここでは，課題1および2の両方で使用する直流電源装置およびデジタルマルチメーターの使用方法について練習する。これらの機器の使用に慣れていない場合には，必ず最初に本練習を行うこと。

まず，机の上に直流電源装置1台及びデジタルマルチメーター2台が置かれていることを確認し，次に箱を開けて箱の中の袋①を取り出し，中の部品を机の上に並べ，表1の①の部品があることを確認する。

表1 箱の外に出ている機器および袋①の中の部品

	品名	数量	サイズ，説明等	図
外	直流電源装置	1	A&D 製，定格 30V, 1.5A AD-8723D	図 1-1
外	デジタルマルチメーター	2	マザーツール製 MT-4510	図 1-2
①	豆電球ホルダ	1		図 1-3
①	豆電球	1	定格 12V, 0.11A 課題1でも使用する。	
①	ケーブル A	2	バナナナーみのむし	

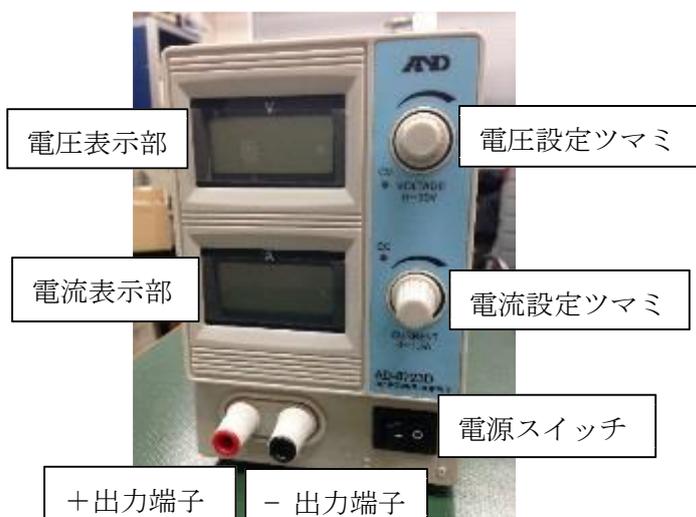


図 1-1 直流電源装置



図 1-2 デジタルマルチメーター



図 1-3 (a) 豆電球ホルダと (b) ホルダに豆電球を取り付けた写真

1) 直流電源装置の使用方法

- ① 直流電源装置の箱を開けて、装置本体（図 1-1）と、装置を 100 V のコンセントに接続するための黒色のケーブルを取り出す。赤と黒のバナナ端子のケーブルについては今回使用しないので箱の中に残しておく。
- ② 直流電源装置の電源スイッチがオフになっていることを確認する。
電源スイッチの丸（○）と棒（—）は、それぞれ 0 (OFF) と 1 (ON) を意味する。
- ③ 黒色のケーブルの一端を直流電源装置本体後部に取り付け、もう一端をコンセントに接続する。黒色のケーブルのコンセント側先端の緑の線は本来アースに接続するが、本実験においては設備の関係で接続できないため使用しない。
※電源のプラグがコンセントにしっかりささっていることを確認する。また、コンセントへのケーブルの抜き差しはコードを引っ張らず、プラグを持って行うこと。
- ④ 直流電源装置の出力端子と豆電球との配線も、電源を切った状態で行う。
- ⑤ ここで使用する豆電球は定格 12 V, 0.11 A のものである。豆電球の金属部に刻印があるので正しいことを確認する。刻印された値が極端に違う場合には監督者に連絡すること。
- ⑥ 豆電球ホルダに豆電球を取り付ける。図 1-3(b) に示されているように、豆電球をホルダの穴に奥までねじ込むことで使用できる。図で両側に突き出た 2 つの端子間に電流を流す。
- ⑦ 直流電源装置と豆電球ホルダを図 1-4 の回路図のようにケーブル A を用いて接続する。
- ⑧ 配線に間違いが無いことを確認した後、電源をオンにする。※電源をオンにする前に、電圧設定つまみと電流設定つまみが全て左いっぱいに戻されていることを確認する。
- ⑨ 電圧表示部を見ながら出力電圧を設定する。なお、電流設定つまみが左いっぱいに戻された状態では、CC（電流制御モード）ランプが赤く点灯し、電圧設定つまみを右に回しても電圧表示は変わらない。**電流設定つまみを右いっぱいに戻し**、赤色の CC ランプが消え、緑色の CV（電圧制御モード）ランプが点いた状態で電圧を設定する。この状態では電圧を設定すると抵抗に応じた電流が流れる。
- ⑩ ここで使用する豆電球は課題 1 と共通で定格 12 V, 0.11 A のものである。課題 2 では定格 3.8 V, 0.3 A の豆電球を使用する。どちらにおいても定格を超えた電圧をかけないように注意すること。
- ⑪ 電圧設定つまみをゆっくり右に回して電圧を 6 V 程度に設定し、豆電球が光ることを確認する。
- ⑫ 電圧設定つまみを右に回した場合に電圧があまり上がらず大きな電流が流れて再び赤い CC ランプが点灯した場合、短絡などにより電流が電源装置の定格まで流れている可能性がある。一旦実験をやめて、豆電球の種類や回路をチェックすること。

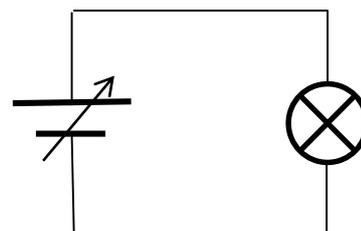


図 1-4 練習用回路

- ⑬ 逆に全く電流が流れない場合や豆電球が光らない場合にも回路に問題があるかケーブルが断線している、豆電球のフィラメントが切れている等の可能性がある。その場合にも一旦実験をやめて、回路の確認や豆電球やケーブルの断線がないか確認し、断線が疑われる場合には監督者を呼ぶこと。
- ⑭ 豆電球が光った場合には正しく接続されているため、そのままにして次のデジタルマルチメーターの使用法の練習へと進む。

※直流電源装置を使用する時、金属がむき出しの部分等に触ると、感電してビリッと感ずることがあるので、十分注意して実験すること。

2) デジタルマルチメーターの使用法

- ① デジタルマルチメーターと赤及び黒の測定子付きケーブル（プローブ）をケースから取り出す。
- ② 回転式のスイッチ（ロータリースイッチ）を回すことにより、電圧、電流、抵抗など様々な測定を行うことができる。
- ③ ここでは、電圧測定の練習を行う。



図 1-5 直流電圧測定時の端子接続及びロータリースイッチの位置

図 1-5 を参考にしてプローブを取り付ける。黒い側（COMMON）は全ての測定に共通した負の側の共通端子，赤い側は電圧や抵抗等を測定する場合の正の側の端子である。

※プローブにはキャップが付いているものもある。プローブ先端は鋭く尖っているのだけがをしないように取り扱いには注意すること。

- ④ ロータリースイッチを回して DC 直流 V に合せると電源が入る。
- ⑤ 正負のプローブを豆電球ホルダの両端の端子にそれぞれ接触させて電圧を測定し、直流電源装置に表示された電圧とほぼ一致していることを確認する。デジタルマルチメーターの方が高い精度で測定することができる。
- ⑥ 電源を入れてから約 15～30 分後に自動的に電源が切れる機能（オートパワーオフ）があるので、計測途中で電源が切れた場合には、SEL ボタンを 1 回押すと電源が再び入る。
- ⑦ 課題 1 では同じ型のデジタルマルチメーターを直流電圧計としてだけでなく直流電流計としても使用する。電圧測定時と電流測定時ではロータリースイッチだけでなくケーブルを接続する端子が異なるため、間違えないように注意すること。
- ⑧ 課題 2 においては電圧測定のみ行う。
- ⑨ 課題 1 及び 2 に取り掛かる前に一旦直流電源装置の電源を切る。その際には電圧設定つまみ及び電流設定つまみを左いっぱいに戻した後に電源スイッチを○側に倒す。

***注意** 物理量の値は、単位とする大きさを表す記号と、その何倍であるかを表す数値の積として表記される。今回の物理チャレンジの実験課題では、国際単位 (SI) 推奨の記法に従い、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、欄や座標軸には、 X/U と記し、そこに現れる数値が単位 U で表した物理量 X の数値であることを明示する。例えば、 I/A は電流 I を A 単位で表したときの数値を表す。

課題 1 電気抵抗率の温度変化と熱放射

<課題 1 で使用する部品>

表 2 課題 1 で使用する部品・器具等の一覧 (使用方法のところで使用した部品も含む)

袋	品名	数量	サイズ, 説明等	図
外	直流電源装置	1	A&D 製, 定格 30V, 1.5A AD-8723D	図 1-1
外	デジタルマルチメーター	2	マザーツール製 MT-4510	図 1-2
①	豆電球ホルダ	1		図 1-3
①	豆電球	1	定格 12V, 0.11A	
①	ケーブル A	2	バナナーみのむし	
②	ケーブル A の追加分	3	バナナーみのむし	-
②	ケーブル B	2	バナナーバナナ	
②	温度計	1	室温の測定に使用する。	図 1-6

箱の中の袋②を取り出し、中の部品を机の上に並べ、表 2 の②の部品があることを確認する。温度計は箱から取り出して使用する。

課題 1 ではデジタルマルチメーターの一方を直流電圧計として、他方を直流電流計として用いる。練習時に使用していたプローブは取り外し、ケーブル A または B を用いて直流電源装置および豆電球ホルダと接続する。

直流電流計として使用する際には図 1-7 のようにケーブルを接続し、ロータリースイッチを「電流 mA」の位置まで回して電源を入れる。電流値は「 $\mu A/mA$ 」端子側から「コモン COM」側に電流が流れる時に正で表示される。

図 1-7 電流(mA)測定時のデジタルマルチメーターの設定



図 1-6 温度計



<課題 1 はここから始まります>

細長い導体の両端に電圧を加えると、電流が流れる。流れる電流 I [A] は、加えた電圧 V [V] に比例し、関係式

$$V = RI \quad (1.1)$$

がなりたつ。これをオームの法則といい、比例係数 R [Ω] をこの導体の電気抵抗あるいは単に抵抗という。

ところが、見かけ上、オームの法則がなりたたない場合がある。

課題 1 - 1 豆電球の電流・電圧特性の測定

直流電源装置、デジタルマルチメーター（2台）など、必要な機材を用いて豆電球（定格 12 V, 0.11 A）の電流・電圧特性を測定する。

注意：直流電源装置本体の表示は目安である。測定はデジタルマルチメーターを用いて行うこと。

- 問 1 測定のため組み上げた回路の配線図を解答用紙の指定箇所に記せ。
- 問 2 この段階での室温を摂氏温度で測定し絶対温度 T_b [K] に換算して記録せよ。
ただし、絶対温度 0 K を -273 °C とする。
- 問 3 1 V から 12 V の範囲で、豆電球に加える電圧をほぼ 1 V 刻みで変え、各電圧での電流を測定しなさい。各測定点において、豆電球に加えた電圧 V [V] と流れた電流 I [A] の値が**落ち着くのを待ち**（1 分程度を目安とする）、読みとった値を解答用紙の表 1 - 1 の該当欄に記録せよ。
- 問 4 この段階での室温 T_a [K] を再び測定し、記録せよ。
- 問 5 T_b [K] と T_a [K] の平均をとり、実験中の室温 T_s [K] として記録せよ。得られた T_s [K] の値を解答用紙 p.2 の該当欄に転記せよ。
- 問 6 結果を電流－電圧グラフ（ I - V グラフ）に表せ。
- 問 7 各測定点での豆電球の電気抵抗 R [Ω] を計算し、表 1 - 1 の該当欄に記せ。

表 A タングステン抵抗率の温度依存性

表にない数値に対応する数値を内挿して求めるのに便利のように、隣り合う2点を結ぶ線分の勾配とその逆数を第3欄・第4欄に示してある。

$x = T/\text{K}$	$y = \rho/(\mu\Omega \cdot \text{cm})$	$\Delta y/\Delta x$	$\Delta x/\Delta y$
273	4.82		
		0.02300	43.48
293	5.28		
		0.02286	43.75
300	5.44		
		0.02390	41.84
400	7.83		
		0.02520	39.68
500	10.35		
		0.02650	37.74
600	13.00		
		0.02760	36.23
700	15.76		
		0.02850	35.09
800	18.61		
		0.02920	34.25
900	21.53		
		0.02980	33.56
1,000	24.51		
		0.03060	32.68
1,100	27.57		
		0.02970	33.67
1,200	30.54		
		0.03300	30.30
1,300	33.84		
		0.03220	31.06
1,400	37.06		
		0.03270	30.58
1,500	40.33		
		0.03320	30.12
1,600	43.65		
		0.03360	29.76
1,700	47.01		
		0.03400	29.41
1,800	50.41		
		0.03440	29.07
1,900	53.85		
		0.03480	28.74
2,000	57.33		
		0.03540	28.25
2,200	64.41		
		0.03610	27.70
2,400	71.63		
		0.03685	27.14
2,600	79.00		
		0.03755	26.63
2,800	86.51		
		0.03835	26.08
3,000	94.18		
		0.03910	25.58
3,200	102.0		
		0.04000	25.00
3,400	110.0		
		0.04150	24.10
3,600	118.3		

(X/U は物理量 X を単位 U で表したときの数値を表す)

課題 1-1 の測定で、豆電球の抵抗が加える電圧によって変化したのは、オームの法則がなりたたなかったからではなく、導体の抵抗が温度によって変わったからである。

一様な材質からなる導線の抵抗 $R[\Omega]$ は、その長さ $l[\text{m}]$ に比例し、断面積 $S[\text{m}^2]$ に反比例し、次の関係式がなりたつ。

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1.2)$$

比例係数 $\rho[\Omega\cdot\text{m}]$ は抵抗率と呼ばれ、材質と温度で定まる。

豆電球のフィラメントの主要な材質と考えられるタングステンでは、抵抗率は、室温 (~300 K) から融点近く (3600 K) までの間に、20 倍以上も変化することが知られている。表 A は、ある文献によるタングステンの抵抗率 $\rho[\Omega\cdot\text{m}]$ の温度変化についての測定値である。課題 1-1 のそれぞれの抵抗値 $R[\Omega]$ から抵抗率 $\rho[\Omega\cdot\text{m}]$ を求めると、この表を用いて、フィラメントの温度を求めることができる。そのためには、フィラメントの形状 (長さ と断面積) を表す因子 (式 (1.2) における $\frac{l}{S}$) の値が必要となる。この因子が温度に依存しないと仮定すると、室温付近のフィラメント温度で測定した豆電球の抵抗値と室温の測定値から表 A を用いて $\frac{l}{S}$ を求めることができる。

課題 1-2 室温における豆電球の抵抗の測定

課題 1-1 で測定した抵抗は、ジュール熱のため、温度が上昇した状態での値であり、温度が不明なので抵抗率 $\rho[\Omega\cdot\text{m}]$ を求めることができない。そこで、この課題では、ジュール熱の発生による温度上昇が小さい範囲でその影響を見極め、温度上昇が無視できる状態での値、すなわち、室温での抵抗 $R_0[\Omega]$ を測定する。また、そのときの室温 $T_0[\text{K}]$ も測定し、室温 $T_0[\text{K}]$ におけるタングステンの抵抗率 $\rho_0[\Omega\cdot\text{m}]$ の値を算出する。

問 1 室温を測定し、測定前の室温 $T_{0b}[\text{K}]$ として記録せよ。

問 2 できるだけ低い電圧・電流領域の数点で豆電球の電流・電圧特性を測定し、表 1-2 に書き込め。

※低電圧領域では電圧設定つまみによる電圧設定が非常に困難である。また、電圧や電流の値が安定するのに時間がかかるので課題 1-1 の時よりも長い時間待つ必要がある。

問 3 抵抗の変化をグラフに描き、グラフから室温での抵抗 $R_0[\Omega]$ を求めよ。表 1-2 の空白の欄は自由に使って良い。

問4 室温を測定し，測定後の室温 T_{0a} [K]として記録せよ。

問5 T_{0b} [K]と T_{0a} [K]の平均値をとり，室温 T_0 [K]として記録せよ。

問6 表 A の文献値を用いて，室温 T_0 [K] におけるタングステンの抵抗率 ρ_0 [$\Omega\cdot\text{m}$] の値を $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ の単位で求めよ。解答用紙には，結果だけでなく，算出の過程も記せ。

問7 温度に依存しない因子 $\frac{l}{S}$ の値を求めよ。また，得られた $\frac{l}{S}$ の値を解答用紙 p.2 の該当欄に転記せよ。

課題1－2で温度に依存しない因子 $\frac{l}{S}$ の値が得られた。これにより各測定点におけるフィラメントの抵抗 R [Ω] からタングステンの抵抗率 ρ [$\Omega\cdot\text{m}$] を算出することができる。さらに，表 A を用いると，各測定点におけるフィラメントの温度 T [K] を算出することができる。

また，各測定点における消費電力 P [W] は，フィラメントで単位時間に消費された電気エネルギーであり，ジュール熱に変換される。

課題1－3 各測定点におけるフィラメント温度と消費電力の算出

問1 課題1－1で測定した電圧，電流の各測定点におけるタングステンの抵抗率 ρ [$\Omega\cdot\text{m}$] を算出し，解答用紙の表1－1の所定の欄に $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ の単位で記入せよ。

問2 表 A を利用して，各測定点におけるフィラメントの温度 T [K] を算出し，解答用紙の表1－1の所定の欄に記入せよ。

問3 各測定点における消費電力 P [W] を算出し，解答用紙の表1－1の所定の欄に記入せよ。

ここで，フィラメントにおけるエネルギーの収支を考える。フィラメントに加える電圧を変えると，単位時間に発生するジュール熱も変わるためフィラメントの温度が変化し，抵抗や流れる電流も変化するが，しばらく待つと，変化は止まる。このとき，発生したジュール熱はすべて，外部に放出され，フィラメントに蓄えられている「熱」（正しくは，内部エネルギーという）は増減せず，温度も一定になる。この状態を定常状態という。

熱（物体の内部エネルギー）の移動は、高温の物体（部分）から低温の物体（部分）へ向かって起こり、その機構（仕方）には伝導、対流、放射（輻射）の3つがある。豆電球と外部（外界）の間では、ソケットや導線を通じて伝導により、電球内に気体があれば対流により、および光（電磁波）を出す放射により、熱が移動すると考えられる。ここでは、伝導と対流による熱の移動は小さいと仮定し、フィラメントの温度と、放射によって移動するエネルギーの関係を調べる。

物体の温度と物体が放射するエネルギーに関しては、シュテファン=ボルツマンの法則がなりたつ。すなわち、温度 T [K] の物体が、その単位表面積あたり、単位時間に放射する電磁波のエネルギー Q [W/m²] は次の式で表される。

$$Q = \sigma T^4 \quad (1.3)$$

比例係数 $\sigma = 5.670 \times 10^{-8}$ W/(m²·K⁴) は、シュテファン=ボルツマン定数と呼ばれる。ただし、式(1.3) が成り立つのは、厳密には、「黒体」と呼ばれる、入射するすべての波長の電磁波を完全に吸収すると考えられる理想的物体の場合だけだが、黒体でない場合には、近似的に、

$$Q = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1.4)$$

と表される。 ε は放射率と呼ばれる無次元の量で、その値の範囲は $0 < \varepsilon < 1$ である。

式(1.3) あるいは式(1.4) からわかるように、物体は、高温でなくてもその温度の4乗に比例して放射によってエネルギーを放出する。温度 T [K] のフィラメントを取り巻く外界はすべて温度 T_s [K] の物体でできていると仮定すると、フィラメントは T^4 に比例してエネルギーを放出すると同時に、外界が T_s^4 に比例して放出するエネルギーを受け取る。したがって、フィラメントが単位時間に失う正味のエネルギー P_{rad} [W] は、次のように表される。

$$P_{\text{rad}} = aT^4 - bT_s^4 \quad (1.5)$$

比例係数 a [W/K⁴], b [W/K⁴] は、フィラメントと外界の物質やその幾何学的配置によって定まるが、フィラメントの温度 T [K] が外界の温度 T_s [K] に等しい場合には、熱平衡状態となり、エネルギーの移動 P_{rad} [W] は 0 とならなければならないので、 $a = b$ であることが分かる。

したがって、伝導と対流による熱の移動が無視できれば、フィラメント温度が T [K]、外界の温度が T_s [K] の定常状態では、フィラメントにおける消費電力 P [W] はフィラメントが放射により単位時間に失うエネルギー P_{rad} [W] と等しくなり、関係式

$$P = a(T^4 - T_s^4) \quad (1.6)$$

が成り立つことが期待される。

式(1.6)の比例係数をシュテファン=ボルツマン定数を用いて、

$$a = \sigma A \quad (1.7)$$

と表すと、 A [m²] は、フィラメントの実際の表面形状の影響や放射率 ε の効果を取り込んだ、実効的な表面積という意味をもつ。

課題 1-4 シュテファン=ボルツマンの法則の検証

課題 1-1 から課題 1-3 で得られた解答用紙の表 1-1 のデータおよび室温の値を用いて、式(1.6) の関係式が成り立っていると言えるかどうかを検証する。ただし、課題 1-1 の測定前・後の室温 T_b [K], T_a [K] の平均値を外界の温度 T_s [K] とする。グラフを描いて、式(1.6) を検証しようとする場合、横軸には、例えば、 T/K , $(T/K)^4$, $(T/K)^4 - (T_s/K)^4$ など、および、その自然対数 (ln) のいずれか、縦軸には、 P/W , $(P/W)^{1/4}$ など、および、その自然対数 (ln) のいずれかをとることが考えられる。

*注意 配布されている電卓では、4乗は $\boxed{x^2}$ キーを2回押すことにより得られ、自然対数は $\boxed{\ln}$ キーを押すことにより、4乗根(4分の1乗)は $\boxed{\text{SHIFT}} \rightarrow \boxed{x^2} \rightarrow \boxed{\text{SHIFT}} \rightarrow \boxed{x^2}$ と押すことにより得られる。

問1 グラフの横軸(x), 縦軸(y)の量としてそれぞれ何を選んだか、その理由とともに記せ。

問2 解答用紙の表 1-1 の右側の2つの欄を、グラフの両軸に選んだ物理量の数値で埋めよ。また、その結果をグラフに表せ。

問3 以上の結果に基づき、シュテファン=ボルツマンの法則についてどのようなことがいえるか。結論を明示するとともに、その根拠を記せ。また、不満足な結果であった場合の理由や改善案についても考察せよ。

問4 シュテファン=ボルツマンの法則がなりたっていると言える場合には、式(1.6) の比例係数 a の値を求め、フィラメントの実効的な表面積 A [m²] を式(1.7) を用いて見積もれ。算出過程も簡潔に記せ。

課題2 膜の厚さの測定

課題2で使用する部品一覧

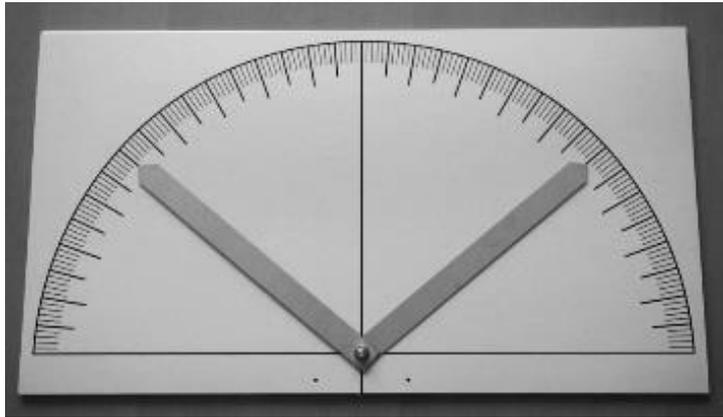
番号	品名	数量	規格, 特徴, 用途等
1	測定盤	1	鉄製の腕が2本付いている
2	LED光源A	1	赤(スリット付)
3	LED光源B	1セット	赤, 緑, 青の3色(側面に色の名前が書かれてある)
4	光検出器	1	ワニグチクリップおよび9V乾電池(角形)用スナップ付き
5	分光器	1	4cm×4cm×10cm, 側面と上面に穴が開いている
6	試料1	1	食品用ラップフィルム(ポリ塩化ビニリデン)が張られている
7	試料2	1	透明な膜が黒い紙に貼られている
8	試料3	1	黄色いフィルムが張られている
9	試料4	1	2cm×2cmのシリコン基板が木片に貼られている
10	9V乾電池(角形)	2	光検出器およびLED光源B用
11	単3乾電池	2	LED光源Aの予備用
12	木片	1	6cm×5cm, 厚さ1.5cm 試料2を貼る
13	セロハンテープ	1	消しゴムに偏光板や黒紙を貼る
14	両面テープ	1	試料2を12の木片に貼る
15	ポリ袋③	1	
16	ポリ袋④	1	

ポリ袋③の中身

15-1	偏光板	2	A:偏光方向は長辺方向, B:偏光方向は短辺方向
15-2	黒い厚紙	1	6cm×6cm 試料1, 3の下に敷く
15-3	黒い紙	1	3.5cm×2.5cm 消しゴムに付ける
15-4	消しゴム	2	
15-5	豆電球	1	定格 3.8V,0.3A(課題1のものとは異なる), 豆電球ホルダは課題1と共通
15-6	黒い厚紙	3	2cm×5cm 分光器や試料の傾き調整用(通常は使わない)

ポリ袋④の中身

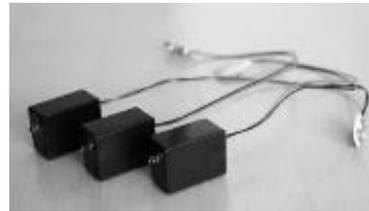
16-1	透明アクリル板	1	保護用の紙をはがして使う
16-2	3mmねじ	2	
16-3	ワッシャー	2	中央に丸い穴の開いた円板
16-4	パイプ(スペーサ)	2	
16-5	ローレットナット	2	手で回せるようにギザギザのついたナット



1 測定盤



2 LED 光源 A



3 LED 光源 B(3色セット)



4 光検出器



5 分光器



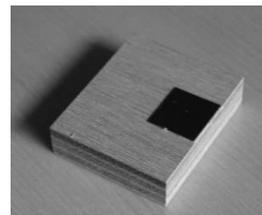
6 試料 1



7 試料 2



8 試料 3



9 試料 4

課題 2-1 では膜に当たる光の入射角と反射光の強度との関係を、直交する 2 つの偏光方向について調べ、膜の屈折率を求める。

課題 2-2 では膜に当たって反射した光のスペクトルを観察して膜の厚さを測定する。その際、課題 2-1 で求めた屈折率を使う。

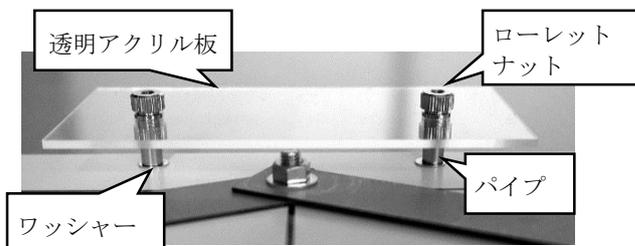
課題 2 - 1 膜の屈折率の測定

〈準備〉

測定盤の 2 つの穴 (図 2-1) に下から 2 本の 3mm ねじを通す。図 2-2(a)(b)を参考にしてワッシャー、パイプ (スペーサ) をはめ、透明アクリル板をねじに通してローレットナットで止める。ねじが測定盤の穴に入りにくい場合は、手で回しながら入れていく。



図 2-1 測定盤の穴



(a) 斜め上から見た写真



(b) 真上から見た写真

図 2-2 透明アクリル板の固定

偏光板 A の偏光方向は長辺方向であり、偏光板 B の偏光方向は短辺方向である。それぞれの偏光板には偏光方向に線が引かれている。消しゴムについている透明カバーを外し、この 2 枚の偏光板 A, B を図 2-3(a)のように、長辺が水平になるように、消しゴムにセロハンテープでとめる。続いて、

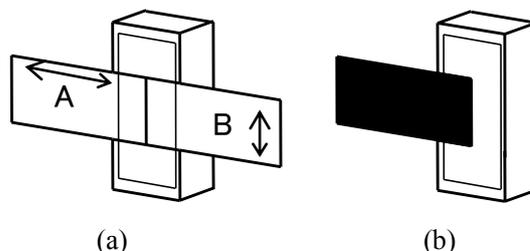


図 2-3 消しゴムに偏光板と黒紙を貼る

別の消しゴムのカバーを外し、3.5cm×2.5cm の黒紙(2cm×5cm の黒厚紙でないことに注意)を

図 2-3(b)のように長辺が水平になるようにセロハンテープでとめる。
光検出器のスナップに 9V 電池を取り付ける。デジタルマルチメータの中央のダイヤルを回して直流電圧測定モードにする。デジタルマルチメータの測定端子と光検出器のミノムシクリップを、赤と赤、黒と黒、というように同じ色どうしで接続する。デジタルマルチメータの使い方は 4 ページを参照すること。

試料 1 は、食品用ラップフィルム(ポリ塩化ビニリデン)が塩化ビニルパイプに輪ゴムで止められている。張られたフィルムにしわが寄っている場合は、フィルムを静かに引っ張って、しわを伸ばす。

課題 2-1-1 偏光板を通過した LED 光源の光の強度測定

〈準備〉で測定板に取り付けたねじやパイプはそのままにし、ローレットナットを回して透明アクリル板だけを一度はずす。図 2-4 を参考にして、光検出器を測定盤の腕の片方に載せ(磁石で付くようになっている)、もう片方の腕に LED 光源 A(同様に磁石で付く)を向かい合わせて載せる。測定盤の角度目盛の中央(基準線)を 0° とし、両方の腕がそれぞれ 90° の位置になるように腕を回転させる。こうすると、光源、腕の回転軸(腕をとめているねじの中心)、光検出器が同一直線上に並ぶ。光源からの光が回転軸の中心を通り光検出器の穴に入るように、光検出器の出力が最大になるように光源、光検出器の位置を微調整する。

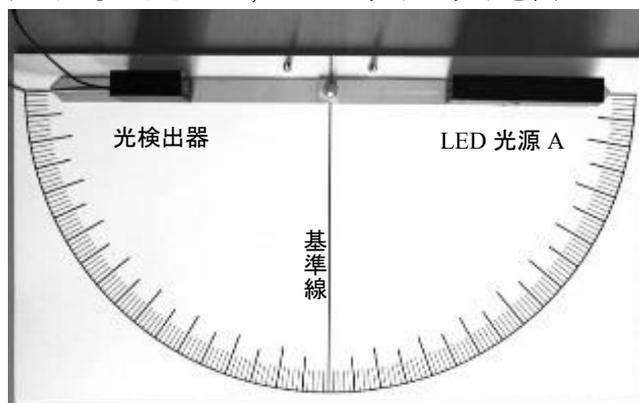


図 2-4 腕を一直線にして、光源と光検出器をセットする

〈実験手順〉

- ① 光源からの光が偏光板を通過して光検出器に入るように、消しゴムに付けた偏光板 A を光検出器の前に置き(図 2-5)、出力を記録する。
- ② 偏光板 A をそのままにし、消しゴムに付けた黒紙を光源の前に置いて光源からの光を遮断し(図 2-6)、出力を記録する。この値がバックグラウンド(光源以外の光や検出器の雑音による出力)となるので、①の値からこの値を引いた値(補正值)を記録する。バックグラウンド測定の際は、偏光板や測定者の姿勢などの条件を変えずに行う。
- ③ 偏光板 B についても、通過した光の強度とバックグラウンドを①②と同様の手順で測定し、記録する。



図 2-5 偏光板を通過した光の強度測定



図 2-6 バックグラウンドの測定

問 1 偏光板 A, B について、偏光板を通過した入射光の強度、バックグラウンド、および補正後の入射光強度を表にまとめよ。

課題 2-1-2 膜で反射した光の強度測定

一度はずした透明アクリル板をもとに戻す。

課題 2-1-1 で腕に載せた光源や光検出器の位置をずらさないように気をつけながら、LED 光源が載った腕の先および光検出器が載った腕の先が基準線から 40° を指すように腕を回す。光源からの光が腕の回転軸の中心を通るように、光源の位置を微調整する。次に図 2-7 の底線を通る鉛直面で光が反射するように試料 1 をセットする。まず 6cm 角の黒い厚紙をアクリル板の台

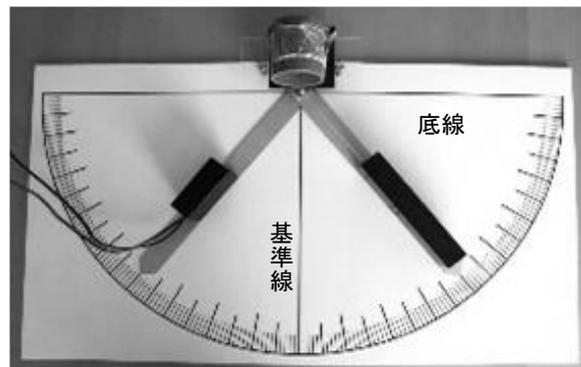


図 2-7 膜で反射した光の強度測定

上に載せ、その上に食品用ラップフィルムが張られた試料 1 を置く。さらに膜面が回転中心からずれないように注意しながら、光検出器の出力が最大になるように試料 1 の位置を微調整する。このとき黒い厚紙ごと動かすのがよい。この状態で膜面への光の入射角と反射角がほぼ等しくなる。

〈実験手順〉

以下の①～④を、入射角を 40° から 70° まで 5° ずつ変化させて測定する。

- ① 光源を載せた腕と検出器を載せた腕を同じ角度に設定し、出力を見ながら最大値を示すように、検出器を載せた腕は固定したまま光源を載せた腕の角度を微調整する。
- ② 消しゴムに付けた偏光板 A を検出器の前に置き (図 2-8)、出力を記録する。
- ③ 続けて消しゴムに付けた黒紙を光源の前に置き (図 2-9)、出力を記録する。この出力がバックグラウンドになるので、②の値からこの値を引いた値を記録する。
- ④ 偏光板 B について、②、③を繰り返す。

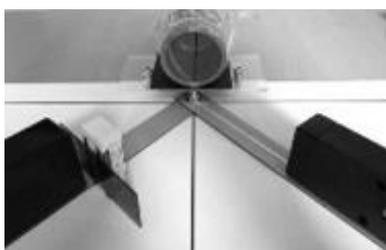


図 2-8 偏光板を通過した反射光強度の測定



図 2-9 バックグラウンドの測定

問 2 偏光板 A, B について、偏光板を通過した反射光強度、バックグラウンド、および補正後の反射光強度を、入射角ごとに表にまとめよ。さらに補正後の反射光強度を、課題 2-1-1 で得られた補正後の入射光強度で割って反射率を求めよ。

問 3 縦軸に反射率、横軸に入射角をとってグラフを作成せよ。極小値をとるのは、A, B どちらの偏光板を通過した光か。

課題 2-1-3 ブリュースター角の測定

光は横波であり、自然光や、電球、LED の光などは、進行方向と垂直で、いろいろな方向に振動する光を含んでいる。偏光板は、その偏光方向と一致する振動方向の光のみを通過させる性質を持っている。

光が異なる媒質の境界面にあたると、一部は反射し、一部は屈折する。境界面に入射する光を、入射面（入射光線と法線とを含む面、図 2-10 では紙面に相当）に平行に振動する成分と、垂直に振動する成分に分けて考える。図 2-10 に示すよ

うに、屈折光線と反射光線とが直角をなすとき、反射光は入射面に垂直に振動する波のみとなる。このときの入射角 θ_B をブリュースター角という。

課題 2-1-2 において、どちらか一方の偏光板を通った光の反射率は、測定角度範囲内で極小値を取る。この角度 θ がブリュースター角となる。ブリュースター角 θ_B と反射する物質の屈折率(厳密には空気に対する相対屈折率) n との間には次のような関係がある。

$$\tan \theta_B = n \quad (2.1)$$

〈実験手順〉（ブリュースター角をより正確に測定して屈折率を求める。）

極小値が表れる方の偏光板を使い、極小値を取る角度付近約 10° の範囲で、入射角を 1° ずつ変えて反射光強度を測定・記録する。実験手順は課題 2-1-2 と同様であるが、より正確な実験を行うため、光源が載った腕を微調整して出力が最大になったときの入射角を読む。この入射角と反射角の和を 2 で割った値を記録し、この角度を入射角、反射角とする。こうすれば、反射面が底線と平行でなくてもそのずれを補正できる。

問 4 実験手順に従って、反射光強度の表を完成させよ。

問 5 縦軸に反射率、横軸に入射角をとってグラフを作成せよ。このグラフから最小値を与える角度を推定し、式(2.1)を使って試料 1 の屈折率を求めよ*1。

*1 電卓を使って \tan の値を求める方法

・表示部の上に DEG が表示されていることを確認する。もし RAD や GRA が表示されている場合には

MODE → **4** を何回か押して DEG を表示させる。

・角度を入力し **tan** を押す。

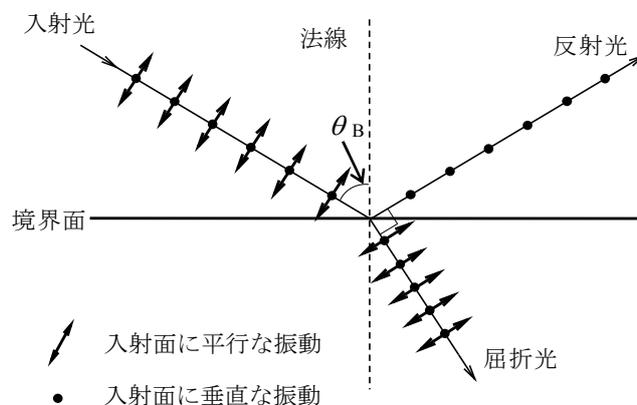


図 2-10 ブリュースター角

課題2-2 膜の厚さの測定

課題2-2-1 反射型分光器による白色光のスペクトル観察

分光器の内部には、図 2-11 に示したように、扇形に切断した DVD(以降 DVD)が斜めに設置されている。この分光器を水平に置いて光を横から入射させると、光は DVD で反射して上部ののぞき窓から出て行く。

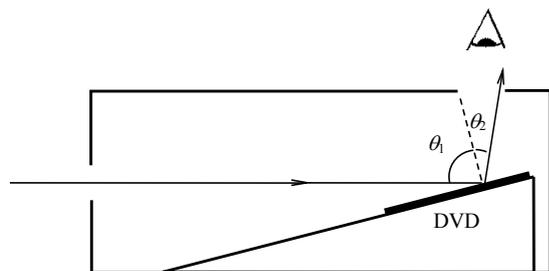


図 2-11 反射型分光器

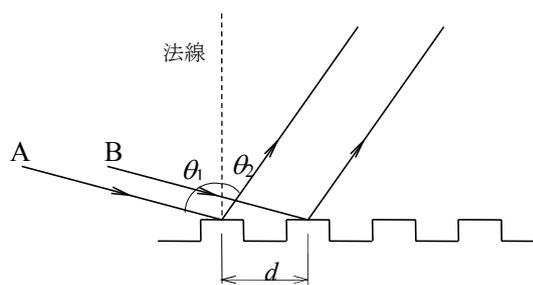


図 2-12 DVD の構造

DVD には図 2-12 に示すように、等間隔に小さな突起がある。突起部にあたって反射した光は、回折によって広い範囲の角度に広がっていく。となりあう突起で反射する 2 つの光線 A と B には経路差があるので、反射光は干渉によって強めあったり弱めあったりする。このことにより、DVD は反射型回折格子として使うことができる。

光の波長を λ 、入射角を θ_1 、回折角を θ_2 、となりあう突起間の距離を d とする。図 2-13 より、光線 A と B の経路差は $d(\sin\theta_1 - \sin\theta_2)$ となるので、2 つの光線 A と B が強め合う条件は、次のように表される。

$$d(\sin\theta_1 - \sin\theta_2) = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (2.2)$$

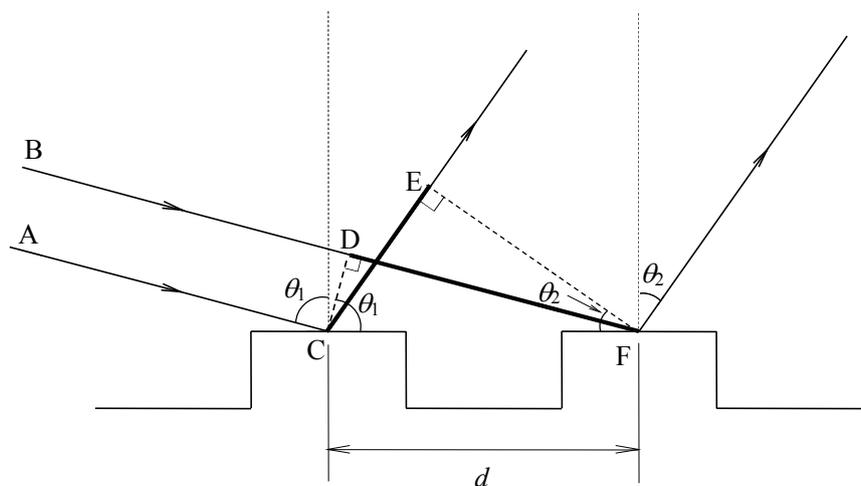


図 2-13 DVD の突起部に当たった光の経路

問 6 $d=0.74\mu\text{m}^{*1}$, $\theta_1=75^\circ$ である。白色光（波長 $420\text{nm}\sim 740\text{nm}^{*1}$ ）を入射させた場合、1次（式（2.2）における $m=1$ ）の明線が見える θ_2 の範囲を求めよ^{*2}。ただし、 θ_2 の符号は図 2-13 の法線の右側を正、左側を負とする。

*1 $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$ $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$

*2 x の値が分かっている $\sin\theta=x$ を満足する θ を求めるには、電卓と使って以下のような操作を行う。

・表示部の上に DEG が表示されていることを確認する。もし RAD や GRA が表示されている場合には

MODE → **4** を何回か押して DEG を表示させる。

・ x → **SHIFT** → **sin** を押す。

〈実験手順〉

課題 1 で使用した豆電球ホルダに、定格 3.8V の豆電球(課題 1 で使用した豆電球とは異なることに注意)をつける。直流電源装置の出力電圧を 3.5V に設定し、ケーブル B (バナナ-ミノムシ) で豆電球に接続する。図 2-14 のように、豆電球と分光器を一直線上に設置し、分光器を上からのぞいて光の連続スペクトルを観察する。分光器をのぞくときには、なるべく目をのぞき窓に近づけるとよい。

部屋の照明による線スペクトルが見えることがあるので、気になる場合は箱のふたをかぶせるなどの工夫をなささい。

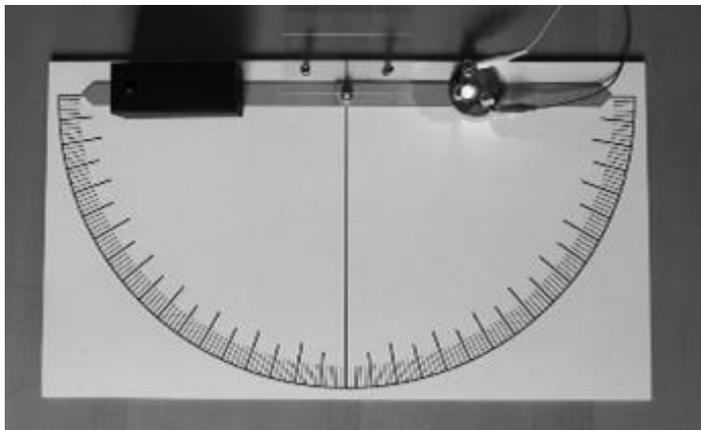


図 2-14 豆電球の白色光スペクトルの観察

問 7 観察されたスペクトルの短波長側の端(紫色)は、光源寄りに見えたか、それとも光源の反対側に見えたか。またそれは問 6 で得られた結果と一致するか。

課題 2-2-2 膜に反射した白色光のスペクトル観察

図 2-15 のように、空気中にある屈折率 n 、厚さ d の薄い膜に、波長 λ の光が入射角 i で入射すると、光の一部は膜の表面で反射し、膜内に入射した光の一部は膜の裏面で反射して膜の外に出てくる。これらの反射光は干渉し、条件によって明るく見えたり、暗く見えたりする。空気中から薄い膜への屈折角を r とすると、反射光が弱め合う条件は、次のように表すことができる。

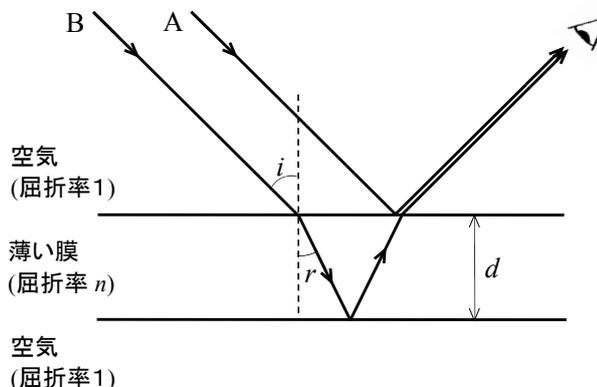


図 2-15 薄い膜による干渉

$$2nd \cos r = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (2.3)$$

また、屈折の法則から、入射角 i と屈折角 r との間には、次のような関係がある。

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} \quad (2.4)$$

〈実験手順〉

図 2-16 を参考にして、豆電球、黒い厚紙、試料 1、分光器を測定盤上にセットする。試料 1 は膜面が腕の回転中心を通る底線上にくるように置く。光源および分光器が載っている腕の角度を 45° に設定し、豆電球の光が分光器に入射するように試料 1 の角度を微調整する。分光器を上からのぞいて、光のスペクトル中に多数の暗線が見えることを確認する。

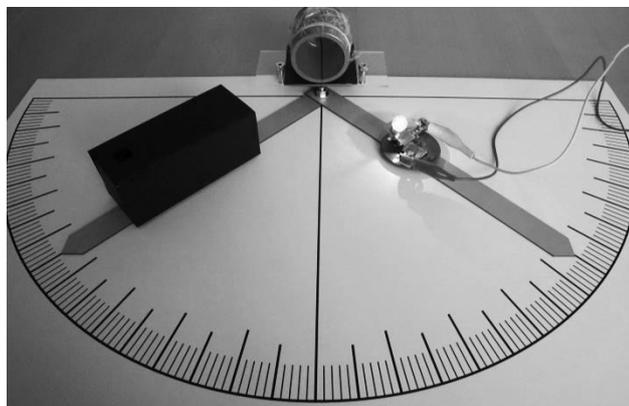


図 2-16 膜に反射した白色光のスペクトル観察

問 8 試料 1 の厚さは可視光の波長よりも 10 倍以上厚い。このことと、式(2.3), (2.4) から、スペクトル中に多数の暗線が見える理由を述べよ。

課題2-2-3 試料1の膜の厚さの測定

〈実験手順〉

LED 光源 B の赤色光源（スリット付の LED 光源 A ではないことに注意）に 9V 電池を取り付ける。図 2-17 を参考にして、光源、黒い厚紙、試料 1、分光器を測定盤上にセットする。光源および分光器が載っている腕の角度を 45° に設定し、LED の光が分光器に入射するように試料 1 の角度を微調整する。分光器を上からのぞいて、赤色のスペクトル中に何本かの暗線が見えることを確認する。

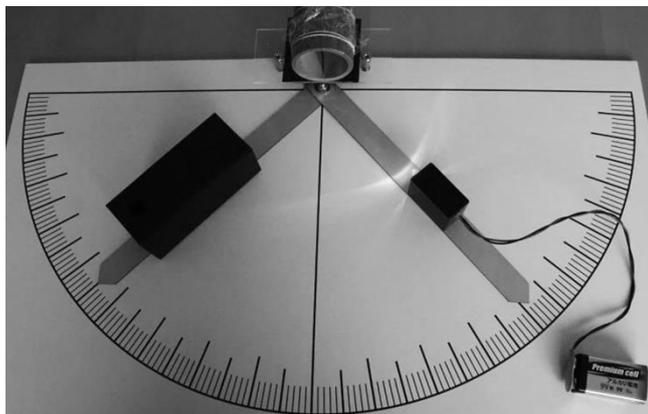


図 2-17 膜に反射した赤色光のスペクトル観察

注意：LED 光源の光はかなり強いので、LED を正面から直接見ないこと。

(2.3) 式より $m = \frac{2nd \cos r}{\lambda}$ であるから、光源の波長域の下限 λ_1 と上限 λ_2 の間で弱め合っ

て暗く見える暗線の数 N は次の不等式を満たす。

$$2nd \cos r \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) - 1 < N < 2nd \cos r \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) + 1 \quad (2.5)$$

また、(2.4)式より

$$n \cos r = \sqrt{n^2 - \sin^2 i} \quad (2.6)$$

である。

問 9 以上の関係より、試料の膜の厚さ d が満たすべき範囲を、試料の屈折率 n 、入射角 i 、光源の波長域 λ_1 と λ_2 、暗線の本数 N を使って示せ。

問 10 問 9 の結果、および課題 2-1-3 問 5 で得られた試料 1 の屈折率、設定した入射角、表 2-1(次ページ)に示された光源の波長域、観察した暗線の本数から、試料 1 の膜の厚さを評価せよ。

課題 2-2-4 試料 2 の膜の厚さの測定

〈実験手順〉

試料 2 の膜は紙枠に張られており、紙枠は黒い厚紙にセロハンテープで貼られている。膜にしわが寄っていたら、紙枠をとめているセロハンテープをはがし、枠の紙を静かに引っ張ってしわを伸ばしてから、再度で貼りつける。厚紙の裏に両面テープを貼り、木片の長辺側の側面に接着する(図 2-18 参照)。



図 2-18 木片に試料 2 を接着

表 2-1 に示されている光源からから適当なものを選び、課題 2-2-3 と同様な方法で、試料 2 で反射した光のスペクトル中に現れる暗線の数を数える。

問 11 試料 2 の膜の厚さを評価せよ。試料 2 の屈折率は表 2-2 に示されている。

表 2-1 光源の波長

光源	波長*1
豆電球	420nm ~ 740nm
LED 光源 B 赤	590nm ~ 660nm
LED 光源 B 緑	480nm ~ 590nm
LED 光源 B 青	440nm ~ 530nm

*1 見える波長の範囲には個人差があるが、計算ではこの値を使用せよ。

表 2-2 膜の屈折率

試料	屈折率*2
試料 2(PET フィルム)	1.66
試料 3(ポリイミドフィルム)	1.60
試料 4(SiO ₂)	1.46

*2 屈折率は波長によって多少変化するが、計算ではこの値を使用せよ。

以上で課題 2 は終了だが、時間があれば次の追加課題に取り組み。

追加課題 試料 3 および試料 4 の厚さを評価せよ。

【測定のヒント】

試料 3：膜は試料 1 と同様、塩ビパイプに張られている。膜にしわが寄っていたら、膜を静かに引っ張って、しわを伸ばす。光源は LED 光源 B の赤を使う。

試料 4：膜はシリコン基板上的酸化シリコンである。光源は豆電球を使う。基板であるシリコンの屈折率は約 4 であり、酸化シリコンの屈折率よりもかなり大きい。