物理チャレンジ 2024
実験問題

チャレンジ番号	氏　　　　名

解答例の中の数値は一例として記載したものであり、実験条件によって異なる場合がある。

解答用紙 1

課題 1

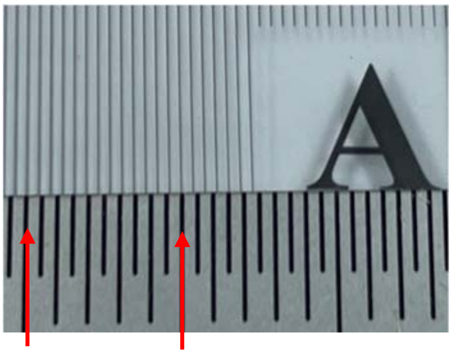
問 1-1a　定規によるスライド A の平行線の間隔の測定　　(6 点)

測定手順

平行線と定規の 0.5 mm の目盛りが一致するところを虫メガネで探して読み取った。
目盛りが 5.0 mm のところで **13 本目の平行線**が一致したので,

平行線の間隔は　$d = \frac{5.0\ \mathrm{mm}}{13} = 0.385\ \mathrm{mm}$　である。

参考例



5 本目や 10 本目などを 0.1 mm の精度で読み取る方法でもよい。
垂直に見ることが重要であり，精度は 0.02 mm ぐらいになる。

平行線の間隔 d	**0.385** mm

問 1-1b　スクリーンまでの距離と回転台の角度　　(4 点)

スクリーンまでの距離 L	**1.03** m
回転台の角度 α_0	**3**°

測定精度は，L が 0.01 m,
α_0が 1° ぐらいでよい。

問 1-1c　スライド A 1 枚による回折　　(10 点)

測定値と計算結果

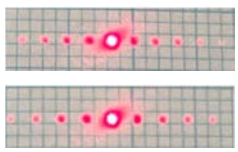
ϕ /°	α /°	N	x_N /mm	x_S /mm	d_ϕ /mm	d /mm
0	3	6	10.4	1.733	0.386	0.386
30	33	6	11.9	1.983	0.338	0.390

平行線の間隔 d の平均値	**0.388** mm

参考例

0°

30°



問題文より，$d_\phi = L\lambda/x_S$，$d = d_\phi/\cos\phi$
問 1-1a とほぼ同じ結果になる。

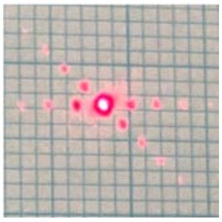
点

物理チャレンジ 2024
実験問題

チャレンジ番号	氏　　名

解答用紙 2

参考例



問 1-2a スライド A 2 枚を 45°に重ねたときの回折　（4 点）

輝点列の角度の確認	○

角度が同じであることを確認できればよい。

問 1-2b スライド A 2 枚を平行に重ねて回転したときの回折　（10 点）

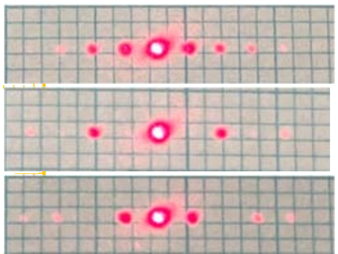
測定値と計算結果

α /°	ϕ /°	$\tan\phi$	N
−3	−6	−0.105	0
10	7	0.123	−1
22.5	19.5	0.354	−2
−15	−18	−0.325	1
−26	−29	−0.554	2

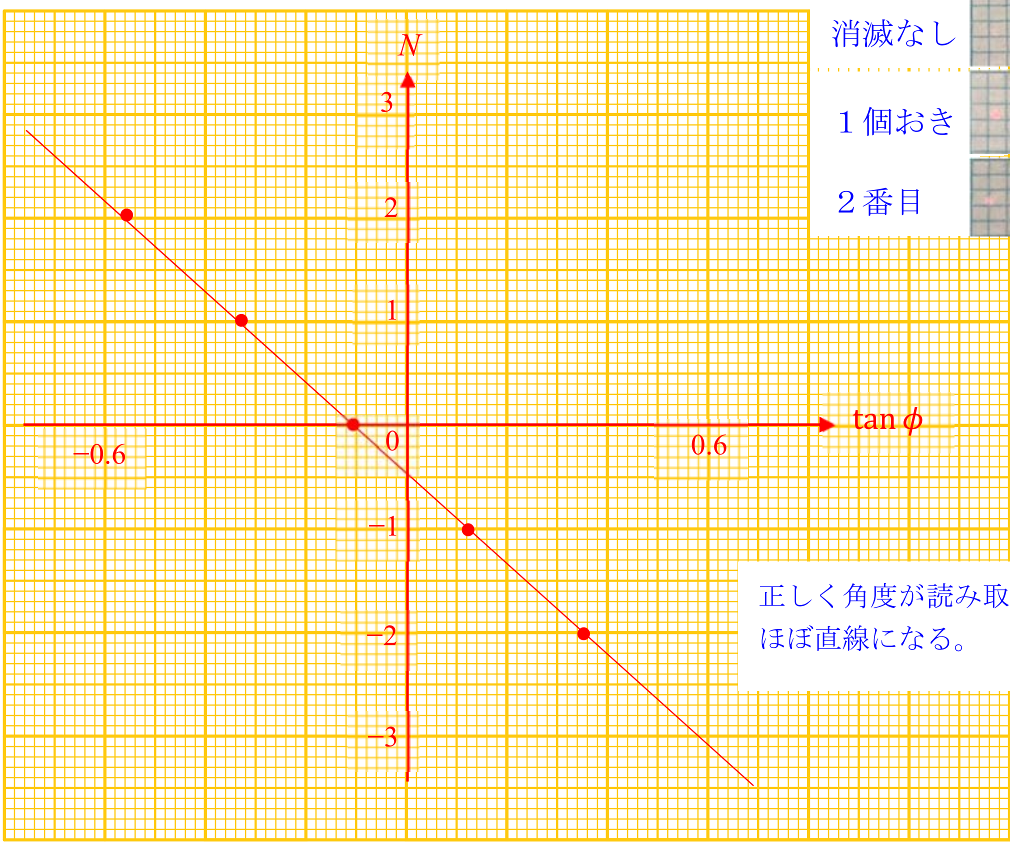
輝点が消える様子を慎重に観察して角度を読み取る。
消滅する角度の読み飛ばしがあると，グラフの直線性が悪くなる。

輝点消滅の参考例

消滅なし
1 個おき
2 番目



グラフ



正しく角度が読み取れていれば，
ほぼ直線になる。

点

チャレンジ番号	氏　　　名

解答用紙 3

問 1-2c スライド A 2 枚の間の距離とずれ　(6 点)

計算過程

$N = -\frac{a}{d}\tan\phi + \frac{b}{d} - \frac{1}{2}$　より、グラフは直線となる。

グラフより直線の**傾き**は $\frac{-3.08-2.18}{0.6-(-0.6)} = -4.38$, **切片**は -0.46 である。

a = −傾き×d

b = (切片+1/2) ×d

であるから,

$d = 0.386$ mm を用いると

$a = 4.38 \times 0.388$ mm $= 1.699$ mm ~ 1.70 mm

$b = (-0.46 + 1/2) \times 0.388$ mm $= 0.016$ mm ~ 0.02 mm　となる。

スライド間の距離 a は,スライドの厚さなので 1.5 – 2.0 mm となる。
平行線のずれ b は,0 – d の間になる。N の割り当ての間違いや測定ミスがあるとこの範囲から外れる場合がある。

スライド間の距離 a	**1.70** mm
平行線のずれ b	**0.02** mm

点

物理チャレンジ 2024
実験問題

チャレンジ番号	氏　　　名

解答用紙 4

問 1-2d　2 番目の輝点が消滅する条件　　　　　　　　　　　　（10 点）

測定値と計算結果

α /°	ϕ /°	r	N	$\lvert r-N\rvert$
7	4	−0.255	0	0.255
13	10	−0.721	−1	0.279
19	16	−1.205	−1	0.205
0.5	−2.5	0.243	0	0.243
−6	−9	0.745	1	0.255

輝点が消える様子を慎重に観察して角度を読み取る。消滅する角度の読み飛ばしがあっても，N を適切に割り当てることができれば支障はない。

理由

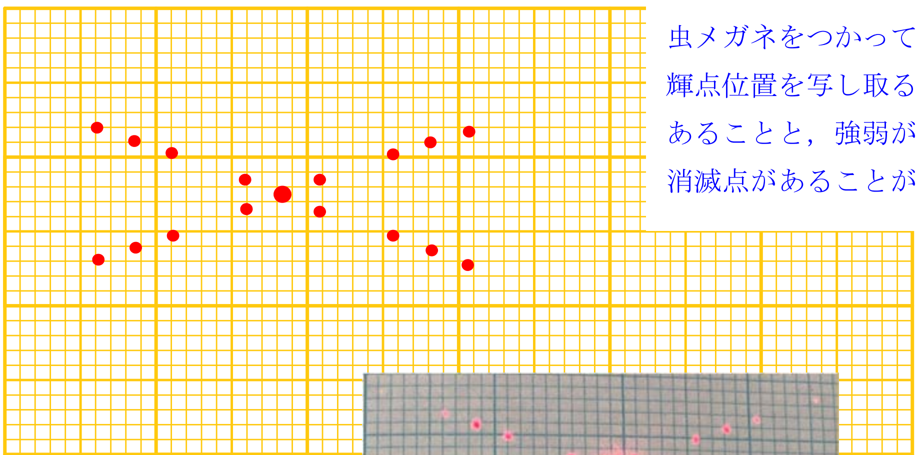
$p>2$ なので $|r-N| = 1/p < 0.5$ となるように **N を割り当てる**。
$|r-N|$ を計算して**平均**をとると 0.247 である。
その**逆数**は 4.05 であり，**最も近い整数は 4** なので **p = 4** である。

2 番目の輝点の消滅はわかりにくいので，個々の角度から求めた $|r-N|$ のばらつきは大きくなる。平均をとれば，p = 4 が最も確からしい整数であることがわかる。

整数値 p	**4**

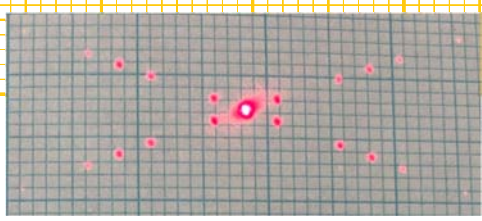
問 1-3a　スライド B による回折　　　　　　　　　　　　（6 点）

輝点の様子



虫メガネをつかって，スクリーンの方眼紙上の輝点位置を写し取る。交差する二つの輝点列があることと，強弱がわかるように描く。特に，消滅点があることがわかるようにする。

参考例



点

物理チャレンジ 2024
実験問題

チャレンジ番号	氏　　　名

解答用紙 5

問 1-3b スライド B の構造決定 （14 点）

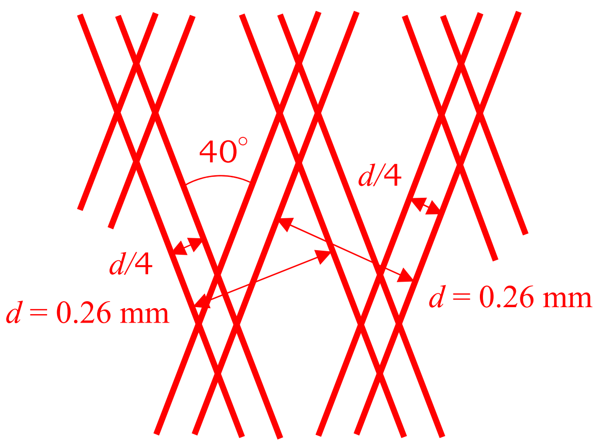
理由

分度器で測定すると二つの**輝点列の角度は 40°**なので，40°で交わる二組の平行線がある。
2 番目の輝点が消えているので，問 1-2d と同様に周期の 1/4 の位置に別の線がある。
中央から±5 番目の点を利用して**輝点の間隔**を読み取ると**両方とも**
x_S = 26.1 mm/10 = 2.61 mm であるから，二つの周期的平行線の間隔は同じで
$d = L\lambda/x_S$ = 1030 mm × 6.5 × 10^{-4} mm/2.61 mm = 0.257 mm ~ 0.26 mm である。

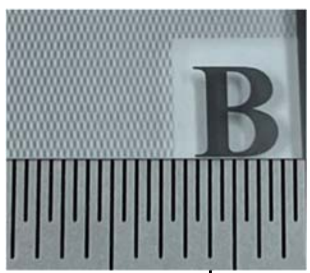
問 1-1，1-2 で確認したことを使って構造を決定する。

概略図であっても，できるだけ正確に描く。
直線は定規を利用して描く。

構造の概略図



実際のスライド
1/4 の線は肉眼では確認できない。



点

物理チャレンジ 2024
実験問題

チャレンジ番号	氏　　　名

解答用紙 6

課題２

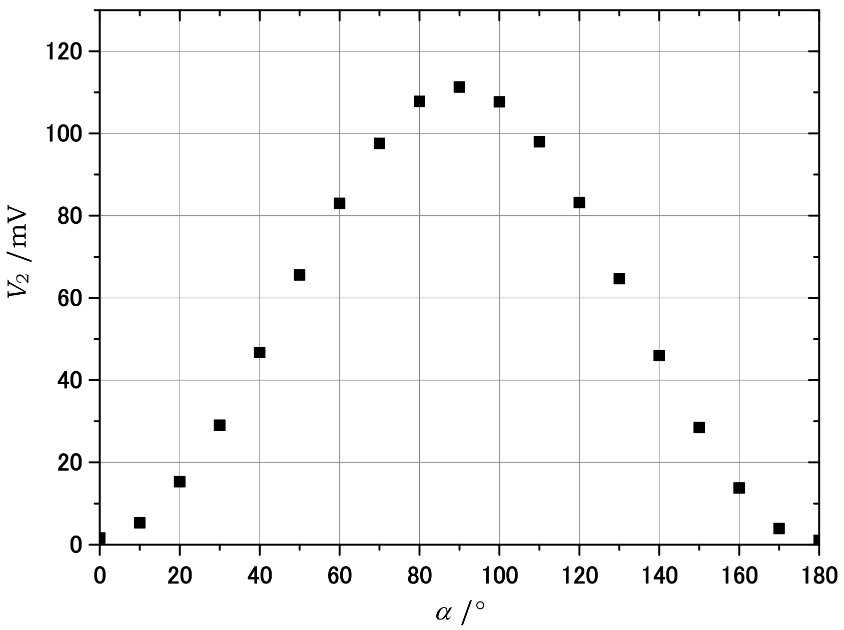
問 2-1a (8 点)

測定結果

α /°	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
V_2 /mV	1.6	5.3	15.3	29.0	46.7	65.6	83.0	97.6	107.8	111.3

α /°	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
V_2 /mV	107.7	98.0	83.2	64.7	46.0	28.5	13.8	3.9	1.0	

出力電圧 V_2 の回転角 α に対する変化



点

チャレンジ番号	氏　　　名

問 2-1b （4点）

出力電圧が最大になる角度と最大出力電圧。V_1 と最大透過率 T_{2max}

出力電圧が最大の角度 α_{2max}	90°
最大の出力電圧 V_{2max}	111.3 mV
偏光板 1 枚の場合の出力電圧 V_1	134.4 mV
最大透過率 T_{2max}	0.83

問 2-1c （6点）

出力電圧が回転角 α に対してどのような周期をもっているか

180°毎に極小値が観測されており，180°の周期を持つ

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　　4 点

$V_2 = V_{2max} \cdot \sin^2\alpha$
の関係がある。

1 枚目の固定式偏光板を透過した光は，水平方向に電場が変動する直線偏光となっている。回転式偏光板が$\alpha = 90°$ の時にその透過軸も水平方向になるためV_{2max}の出力電圧となる。
任意の角度αでは水平方向で振動する電場の回転式偏光板透過軸方向への投影成分は $|\sin\alpha|$ 倍になるため，強度は $\sin^2\alpha$ 倍となるように角度変化する。

点

物理チャレンジ 2024
実験問題

チャレンジ番号	氏　　　名

解答用紙 8

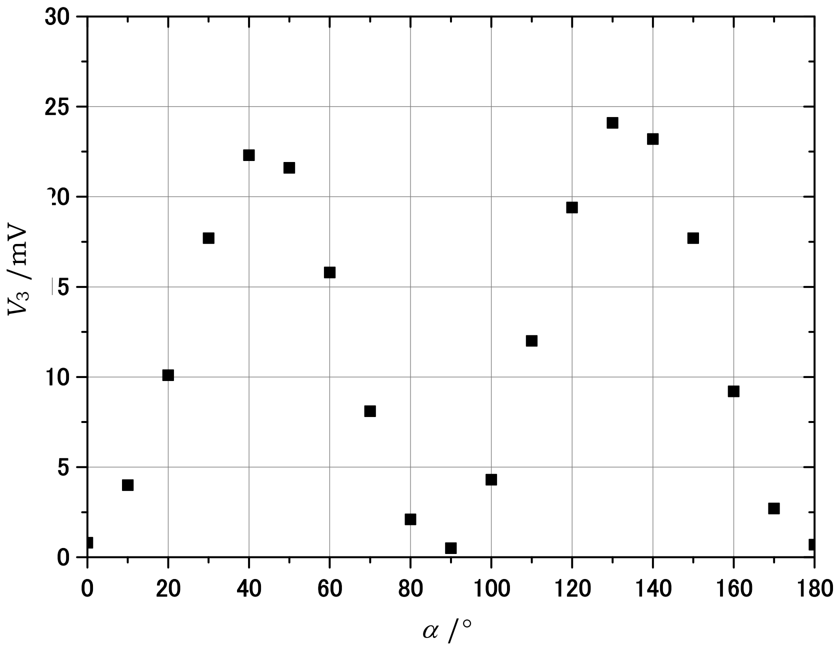
問 2-2a (8 点)

測定結果

α /°	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
V_3 /mV	0.8	4.0	10.1	17.7	22.3	21.6	15.8	8.1	2.1	0.5

α /°	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
V_3 /mV	4.3	12.0	19.4	24.1	23.2	17.7	9.2	2.7	0.7	

出力電圧 V_3 の回転角 α に対する変化



点

チャレンジ番号	氏　　　　名

問 2-2b （4 点）

出力電圧が極大となる角度と出力電圧

透過光強度が極大の角度 α_{3max}	40°	130°	°
極大の透過光強度 V_{3max}	22.3 mV	24.1 mV	mV

問 2-2c （6 点）

出力電圧が回転角 α に対してどのような周期をもっているか

極大値が 90°回転毎に現れている。極小値が 90°毎に観測されている。
従って，90°の周期を持つ。

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

V_3 は $\sin^2 2\alpha$ に比例する強度変化となる。

最初の水平方向固定式偏光板の透過軸と回転式偏光板の透過軸の成す角度は
$90° - \alpha$ となる。
また，回転式偏光板の透過軸と検出器直前の鉛直方向固定式偏光板の透過軸の成す角度は
α となる。
従って，回転式偏光板透過後の電場の大きさは $\cos(90° - \alpha)$ に比例し，鉛直方向固定式偏光板通過後は，更に $\cos\alpha$ に比例して変化する。
また，光の強度は電場の大きさの 2 乗に比例する。
よって，（光強度に比例する）出力電圧 V_3 は

$$(\cos(90° - \alpha) \times \cos\alpha)^2$$
$$= (\sin\alpha \times \cos\alpha)^2$$
$$= (1/4)(\sin 2\alpha)^2$$

に比例する。したがって，V_3 は関数 $\sin^2 2\alpha$ に比例する強度変化となる。

点

物理チャレンジ 2024
実験問題

チャレンジ番号	氏　　　名

解答用紙 10

問 2-3a　　(6 点)

光検出器の出力電圧 V_4

出力電圧 V_4	30.3 mV

問 2-3b　　(8 点)

どちらの出力電圧が高いか，その理由

V_4 が V_{3max} より大きくなる。

偏光板の透過軸を揃えた場合でも，問 2-1 のように（最大）透過率はT_{2max} = 0.83 である。先ず，この透過率を 1 と仮定して V_4 とV_{3max}の透過率を計算する。

V_4： 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各透過軸の方向は順に 各 30° ずつ回転している。そのため，透過する電場の大きさの割合は $(\cos 30°)^3$ であり，光の透過率は $((\cos 30°)^3)^2 = 27/64$ となり約 0.42 である。
V_3： 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° の時にV_{3max}となっているので$((\cos 45°)^2)^2 = 0.25$ 。

さらに，V_4 では 3 枚，V_3 では 2 枚の偏光板をその透過軸に平行な直線偏光が透過するので，V_1 = 134.4 mV を用いると，
$V_4 = V_1 \times 0.422 \times (0.828)^3 = V_1 \times 0.240 = 32.2$ mV
$V_{3max} = V_1 \times 0.25 \times (0.828)^2 = V_1 \times 0.171 = 23.0$ mV
となり，V_4 がV_{3max}より大きくなる。

点

物理チャレンジ 2024
実験問題

チャレンジ番号	氏　　　　名

解答用紙 11

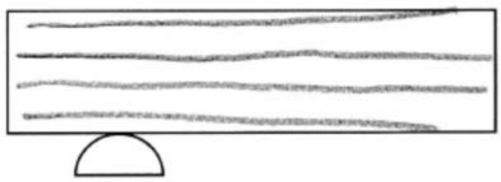
課題 3

問 3-1 （6 点）

縞模様のスケッチ

①背景が明るい時

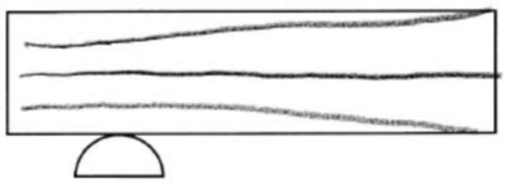
偏光板 2 の角度	**135°**



←中央が明

②背景が暗い時

偏光板 2 の角度	**45°**



←中央が暗

違いとその理由

違い：偏光板 2 を偏光板 1 と同じ 135 度にするとアクリル棒の外側が明るくなり，縞模様は中心線上で明るくなる。偏光板 2 を 45 度にすると，明暗が反転し，中心軸上が暗くなるような縞模様になる。

理由：①の場合に明るく見えていた部分では透過光の偏光方向が元と同じである。従って偏光板 2 を 90 度回せば暗くなる。①で暗く見えていた部分では透過光の偏光が 90 度回っているので，偏光板 2 を 90 度回したときに明るくなる。

中央（中心線の近く）は歪がないので，
その明暗は背景と同じ振舞いをすることに注意。

点

物理チャレンジ 2024
実験問題

チャレンジ番号	氏　　　　名

解答用紙 12

問 3-2a　　（16 点）

測定条件

支点から押しネジまでの距離 a	**80** mm
光源からアクリル棒までの距離 L_1	**155** mm
光源からスクリーンまでの距離 L_2	**273** mm
倍率 A	**1.76**
PD の位置 Y_{PD} （スクリーン上）	**7.5** mm
PD の位置 y_{PD} （アクリル棒上）	**4.3** mm

y_{PD} = 4 ~ 4.5 mm くらいが最適な実験条件である。これが小さすぎると第 2 の極大が出ない。

光検出器の出力電圧（表は多めに用意してある。必要な数だけ使うこと）

ネジ位置 U /mm	出力電圧 V /mV	ネジ位置 U /mm	出力電圧 V /mV
0	**3.9**		
0.25	**14.9**		
0.5	**41.8**		
0.75	**61.3**		
1	**54.3**		
1.25	**32.1**		
1.5	**9.3**		
1.75	**7.0**		
2	**27.4**		
2.25	**45.4**		
2.5	**48.0**		
2.75	**31.9**		
3	**10.8**		

点

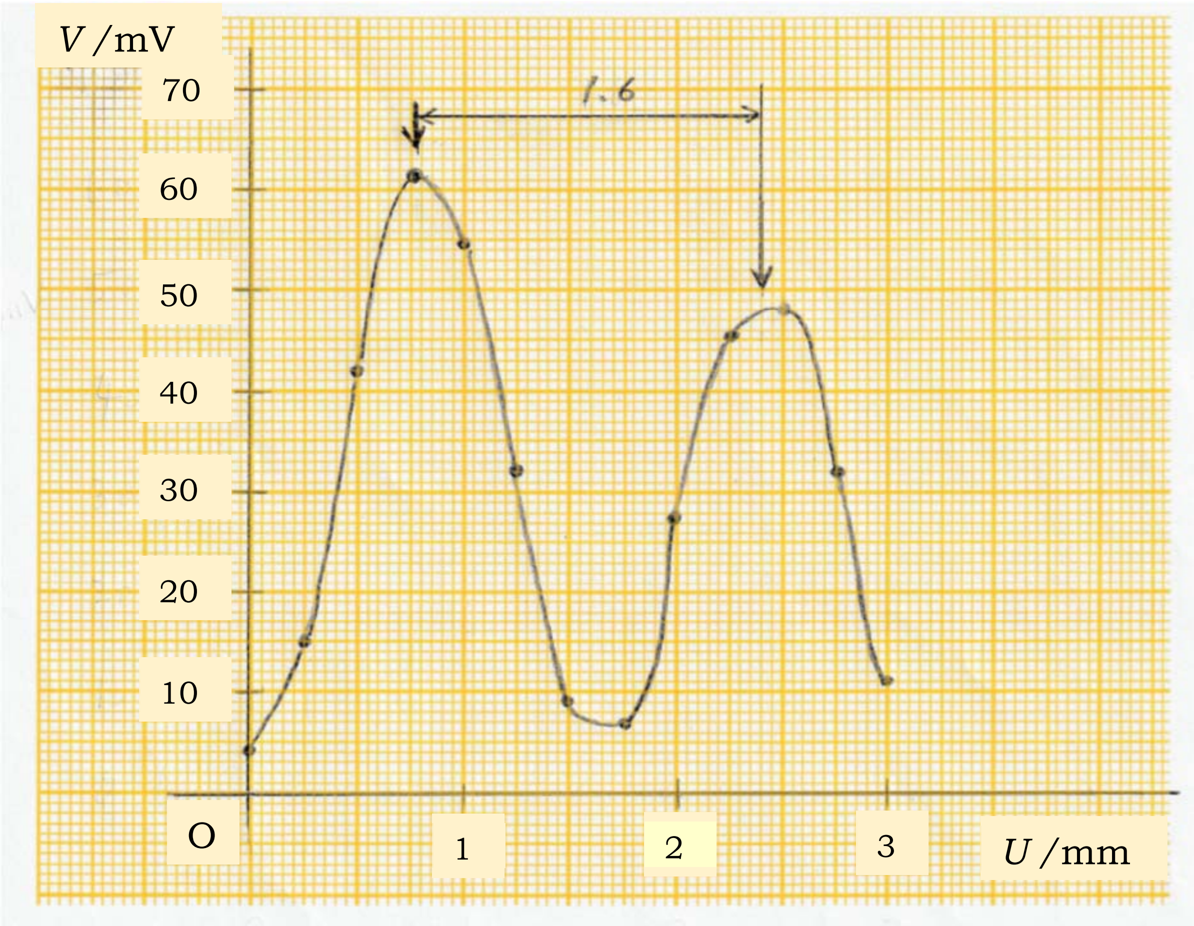
物理チャレンジ 2024
実験問題

チャレンジ番号	氏　　　　　名

解答用紙 13

問 **3-2a** （つづき）

光検出器の出力電圧のグラフ



0.25 mm 刻みで測定すればピークが識別できる程度のデータが得られるはずである。

周期	**1.6** mm

点

物理チャレンジ 2024
実験問題

チャレンジ番号	氏　　　名

解答用紙 14

問 3-2b （6 点）

グラフの極大点における棒の変形

	変位	曲率半径
第 1 極大点	$U_1 =$ **0.8** mm	$R_1 =$ **2.6 × 10³** mm
第 2 極大点	$U_2 =$ **2.4** mm	$R_2 =$ **8.8 × 10²** mm

解説 1 の式(2)に a = 80 mm と上記の U の測定値を代入して

$R_1 = a^2/(3\ U_1) = (80\ \mathrm{mm})^2/(3 \times 0.8\ \mathrm{mm}) = 2.6 \times 10^3\ \mathrm{mm}$

$R_2 = a^2/(3\ U_2) = (80\ \mathrm{mm})^2/(3 \times 2.4\ \mathrm{mm}) = 8.8 \times 10^2\ \mathrm{mm}$

問 3-2c （6 点）

歪みを求める式の導出

　図 3-9 のように曲率中心を中心とする中心角 $\Delta\theta$ の微小角扇形を考える。半径 $r+y'$ の円弧の長さ $l+\Delta l=(r+y')\,\Delta\theta$ と半径 r の円弧の長さ $l=r\,\Delta\theta$ は，たわみがないときはともに同じ長さ l であった。したがって，中心線から上に y の部分の自然長は $l=r\,\Delta\theta$，伸びは $\Delta l=y'\,\Delta\theta$ となり，

歪は式(1)から，　$s=\frac{\Delta l}{l}=\frac{y}{r}$ となる。

この式に測定位置における曲率半径 R と，y 座標 y_{PD} を代入して，　$s=\frac{y_{\mathrm{PD}}}{R}$ 　を得る。

極大位置における歪みの大きさ

	歪み
第 1 極大点	$s_1 =$ **1.61 × 10⁻³**
第 2 極大点	$s_2 =$ **4.84 × 10⁻³**

点

物理チャレンジ 2024
実験問題

チャレンジ番号	氏　　　名

解答用紙 15

問 3-2d (8 点)

係数 C の求め方と C_{abs} の値

透過光強度が極大となるのは，2つの偏光成分が媒質内にもつ周期数の差 N が半整数の場合である。第1極大と第2極大におけるN をN_1, N_2 とし，Δn をΔn_1，Δn_2とすると，第１極大から第２極大まで変化する間に，周期の数の差は $N_2 - N_1 = \pm 1$ だけ変化するので，式(4)により，２つの偏光成分に対する屈折率の差は，$\Delta n_2 - \Delta n_1 = \pm \dfrac{\lambda}{w}$ だけ変化する。

式(5)の Δn を代入すると，$C\,(s_2 - s_1) = \pm \dfrac{\lambda}{w}$

よって，$\boxed{C = \pm \dfrac{\lambda}{w(s_2 - s_1)}}$

$\lambda = 4.7 \times 10^{-7}$ m，　$w = 1.0 \times 10^{-2}$ m，　$s_2 - s_1 = (4.84 - 1.61) \times 10^{-3}$ を代入して，

$C = \pm 0.0146$。　よって，$\boxed{C_{\mathrm{abs}} = |C| = 0.0146}$

C_{abs} の値	**0.0146**

点

物理チャレンジ 2024
実験問題

チャレンジ番号	氏　　　　名

解答用紙 16

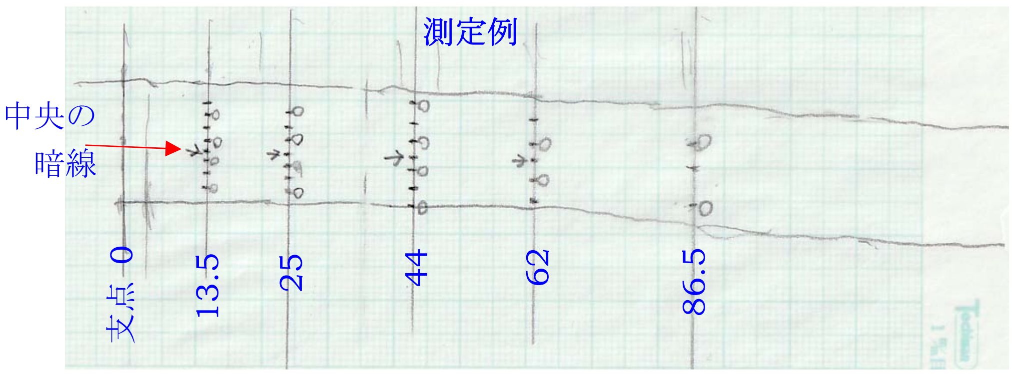
問 3-3a　　　　（16 点）

測定条件

光源からアクリル棒までの距離 L_1	**153** mm
光源からスクリーンまでの距離 L_2	**268** mm
倍率 A	**1.75**

縞の縦位置　$Y_j(N)$
（X_j, $Y_j(N)$はスクリーン上での位置。N の項目を追加してもよい）

測定位置番号	$j =$ **1**	$j =$ **3**
測定位置	$X_j =$ **13.5** mm	$X_j =$ **44** mm
縞番号 N	$Y_j(N)$ /mm	$Y_j(N)$ /mm
2	**7.5**	
3/2	**5.5**	**8.3**
1	**3.5**	**5.0**
1/2	**1.5**	**2.5**
0	**0**	**0**
−1/2	**-1.3**	**-1.8**
-1	**-3.2**	**-4.6**
-3/2	**-5.5**	



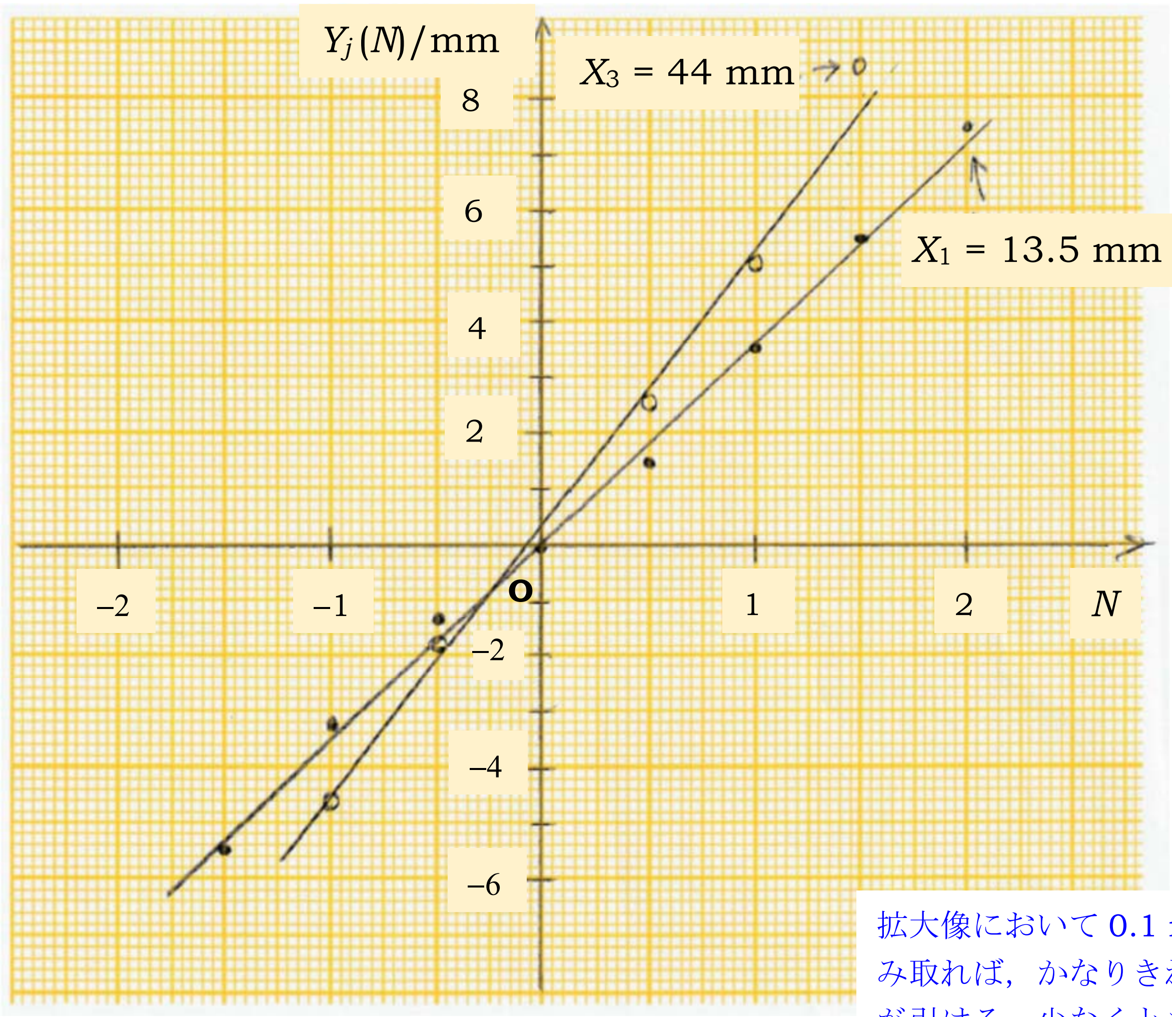
点

物理チャレンジ 2024
実験問題

チャレンジ番号	氏　　名

問 3-3a （つづき）

$Y_j(N)$ 対 N のグラフ



拡大像において 0.1 mm まで読み取れば，かなりきれいな直線が引ける。少なくとも 0.5 mm の精度は必要。

s と y の関係

このグラフから，x 方向の各位置において，明線または暗線の y 方向の位置は N に比例していることが分かる。すなわち縞の間隔は一定である。したがって歪は y 方向に一定の割合で変化しており，s と y は比例関係にあると言える。

点

物理チャレンジ 2024
実験問題

チャレンジ番号	氏　　名

解答用紙 18

問 **3-3b**　　（12 点）

縞の対の間隔 D の表　（拡大像におけるスケール）
（項目は追加してもよい。）

縞番号 ＼ 測定位置	$N = \pm 1/2$		$N = \pm 1$		$N = \pm 3/2$	
	D /mm	$(1/D)$/mm^{-1}	D /mm	$(1/D)$/mm^{-1}	D /mm	$(1/D)$/mm^{-1}
X_1 = **13.5** mm	**3.0**	**0.33**	**6.8**	**0.14**	**11.5**	**0.087**
X_2 = **25** mm	**3.9**	**0.26**	**7.8**	**0.13**	**12.1**	**0.08**
X_3 = 44 mm	**4.3**	**0.23**	**9.6**	**0.10**	**16.0**	**0.06**
X_4 = 62 mm	**5.4**	**0.18**	**12.2**	**0.08**		
X_5 = 86.5 mm	**9**	**0.11**				

点

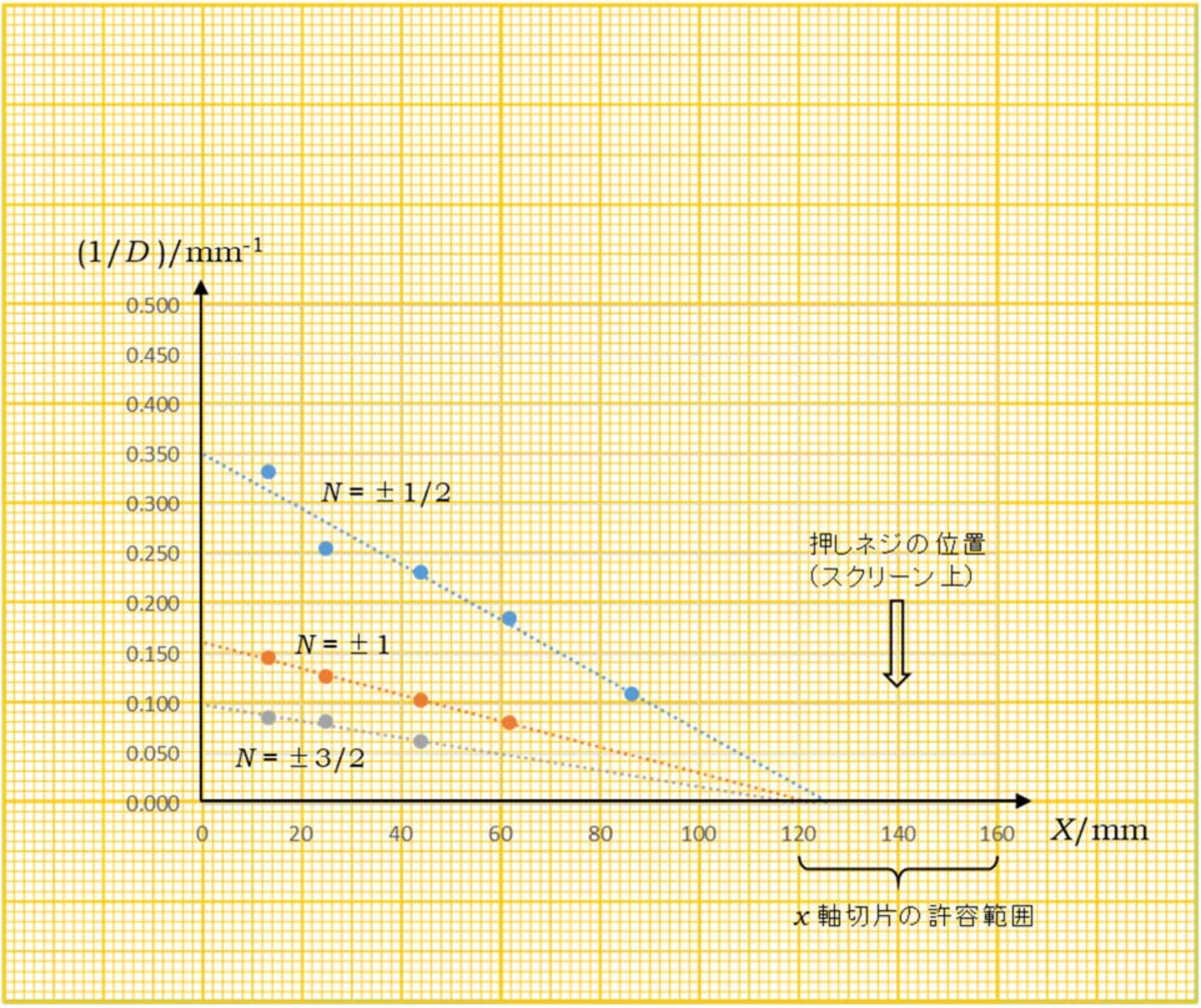
物理チャレンジ 2024
実験問題

チャレンジ番号	氏　　　　名

解答用紙 19

問 3-3b　（つづき）

縞対の間隔 $1/D$ のグラフ（拡大像におけるスケール）



s と x の関係

$1/D$ は X の 1 次関数になっているように見える。これを直線とみなすと，その X 軸切片は，120 ~ 140 mm 付近にあることが分かる。一方，拡大像において押しネジの位置は $X = A\,a = 1.75 \times 80$ mm = 140 mm　（A は倍率）なので，X 軸切片は押しネジの位置の近傍にあると推定される。したがって近似的に

$1/D \propto (a - x)$　と表すことができる。一方，中心軸から一定距離 y だけ離れた場所での歪は縞間隔の逆数 $1/d$ に比例するので，$\boxed{s(x) \propto 1/d \propto 1/D \propto (a - x)}$ の形をしていることが分かる。

x 切片を正確に推定するためには，測定範囲を広く，また，なるべく x の大きいところまで取ることが必要である。誤差は± 20 %程度までは許容する。

点

物理チャレンジ 2024
実験問題

チャレンジ番号	氏　　　　名

解答用紙 20

問 3-4

（10 点）

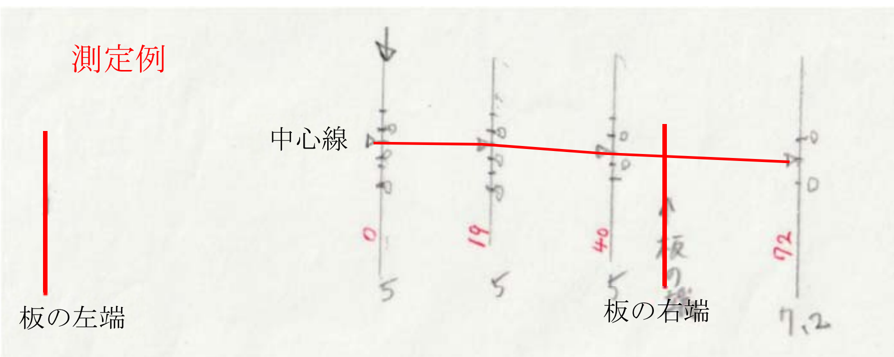
縞番号 ＼ 測定位置	$N = \pm 1/2$
	D /mm
$X_1 =$ **0** mm	**5**
$X_2 =$ **19** mm	**5**
$\boldsymbol{X_3}$ **= 40 mm**	**5**
$\boldsymbol{X_4}$ **= 72 mm**	**7.2**

アクリル棒が上に凸に曲がるので，板の両端が支点の役割を担うところがポイント。
このような 4 点支持の場合は，中央部が一定曲率になることが知られている。

課題 3-3 との違いと理由

縞間隔：表に示すように、3 か所での測定点はほぼ重なり、縞の周期 D はプラスティック板の範囲 $0 < x < b$ でほぼ一定であった。d が押しネジからの距離に反比例していた問 4 の場合とは大きく異なる。この結果は，$1/d(x)$ したがって 曲率半径 $1/r(x)$ がプラスティック板の範囲 $-b < x < b$ で一定であることを意味している。因みにプラスティック板の外側（X = 72 mm)では明らかに縞の間隔は大きくなり，問 3-3b での振舞いと似ている。

理由：アクリル棒を板で支えた場合，その両端が支点となる。それぞれの支点では押しネジと同じ大きさの上向きの力が掛かっている。棒を $x = \pm b$ の間の任意の点で仮想的に切断した状況を考える。左右それぞれのブロックは上下方向の力が釣り合っているので，切断面にせん断力はかかっていない。一方，回転モーメントは，左右のブロックの間で釣り合っていなければならないので，切断箇所をどこに取ったとしても，切断面には同じ大きさの曲げモーメントがなければならない。つまり曲げモーメントは $x = \pm b$ の間で一定であり，従って曲率半径は一定である。



点