

2021年5月20日

実験試験は5時間で、合計20点である。

オンライン試験用ソフトウェア

- オンライン実験には、WIN10と8GbのRAMを搭載したPCが必要です。
- オンライン実験用のソフトウェアは、2021年5月17日に2021APHOのウェブサイトにアップロードされます。リンクはチームリーダーにメールで送られます。関連するZIPファイルを監督者のコンピュータにダウンロードして下さい。
- パソコンには解凍プログラムがインストールされている必要があります。ZIPファイルの解凍にはパスワードが必要です。パスワードは、試験の5分前に2021APHOのウェブサイトで知らされ、チームリーダーにメールで送られます。ソフトウェアの解凍には1~2分程度かかります。辛抱してお待ち下さい。
- 試験開始時にAPHO.exeを見つけ、アイコンをダブルクリックして実験を開始する。

試験の前に

- 試験監督の指示があるまでは、問題の入った封筒を開けてはいけません。
- 試験の開始と終了は、試験監督によってアナウンスされます。また、1時間ごとに経過時間のアナウンスがあり、試験終了の15分前にもアナウンスがあります。

試験中

- 専用の解答用紙が用意されているので、解答を書き込んで下さい。対応する解答用紙（Aマーク付き）の該当する表、ボックス、グラフに解答を記入して下さい。
すべての問題に、問題ごとに、詳細な作業を行うための白紙の作業用紙（Wマーク）が用意されています。必ず、現在取り組んでいる問題の作業シートを使用して下さい（ヘッダーの問題番号を確認して下さい）。採点されたくないことを書いた部分には、バツを書いて下さい。各ページの表側のみを使用して下さい。
- 答えはできるだけ簡潔に書くようにして下さい。
自分の考えを説明するために、可能な限り、方程式、論理演算子、スケッチを使用して下さい。また、長い文章の使用は避けて下さい。
- 問題文に明記されていない限り、すべての測定において不確かさの見積もりが必要です。また、特別な指示がない限り、適切なデータポイントまたは測定の繰り返しの数を決定する必要があります。数字を記載する際には、適切な有効数字数を考慮して下さい。
- 前の問題を解かなくても、後の問題が解けることがしばしばあります。
- 物理定数のリストは次のページにあります。
- 許可なく席を離れることはできません。援助が必要な場合は、プラカードを掲げて試験監督に知らせて下さい（水が必要ななら「Water」、トイレが必要ななら「Toilet」、作業用シートが足りない場合、コンピュータに問題がある場合は「Question」、その他緊急な場合「Emergency」）。

Experiment



G0-2

Japanese (Japan)

試験終了時

- 試験が終わったら、すぐに書くのを止めて下さい。
- すべての問題について、対応するシートを次の順序で整理して下さい：カバーシート (C)、英文と和文の問題 (Q)、解答用紙 (A)、作業用紙 (W)、もし使用した場合は、追加の用紙 (Z) の順に並べて下さい。
- 1つの問題に関するすべてのシートを、その問題の封筒に入れます。また、この概要説明書 (G) を第1問の封筒に入れて下さい。何も書いていないシートも提出して下さい。試験会場から紙を持ち出すことはできません。
- 筆記用具は机の上に置いておいて下さい。
- 封筒が回収されるまで、静かに自分のテーブルで待っていて下さい。すべての封筒が回収されたらガイドがあなたを試験会場の外へ案内します。

物理定数表の一覧

真空中の光速	c	$=$	$2.998 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
真空の透磁率	μ_0	$=$	$1.257 \times 10^{-6} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$
真空の誘電率	ϵ_0	$=$	$8.854 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$
電気素量	e	$=$	$1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
電子の質量	m_e	$=$	$9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
陽子の質量	m_p	$=$	$1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
中性子の質量	m_n	$=$	$1.675 \times 10^{-27} \text{ kg}$
万有引力定数	G	$=$	$6.674 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$
重力加速度	g	$=$	$9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
プランク定数	h	$=$	$6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
アヴォガドロ数	N_A	$=$	$6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
気体定数	R	$=$	$8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
ボルツマン定数	k_B	$=$	$1.381 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
ステファン・ボルツマン定数	σ	$=$	$5.670 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

カンチレバーの弾性 (10 points)

この問題を始める前に、別の封筒に入っている概要説明書 (General Instructions) を確認せよ。

I. Introduction

カンチレバー梁 (片持ち梁) は、一般的な機械構造の1つである (図1参照)。カンチレバー梁は、構造設計において、せん断曲げに抵抗するための主要な構造として利用されるだけでなく、ナノエンジニアリングの分野でもよく見られる。ナノカンチレバー梁の弾性応答を解析し、応力とひずみの関係を明らかにすることは、応用物理学において重要である。しかし、ナノ材料の機械的特性を直接測定することは非常に困難である。それは、マクロスケールでの一軸引張試験とは異なり、インデンテーション試験からしか得られないためである。原子間力顕微鏡やナノインデンテーションを用いて力を加えたナノカンチレバー梁の曲げ変形を観察し、そのヤング率を推定することは、マイクロスケールで材料の機械的特性を測定するための最も重要なツールの一つとなっている。

(A)



(B)

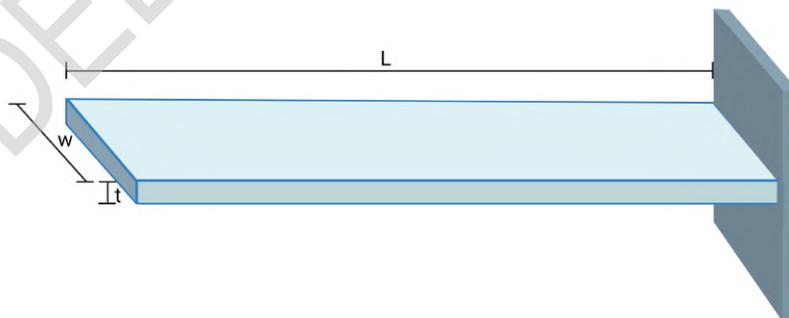
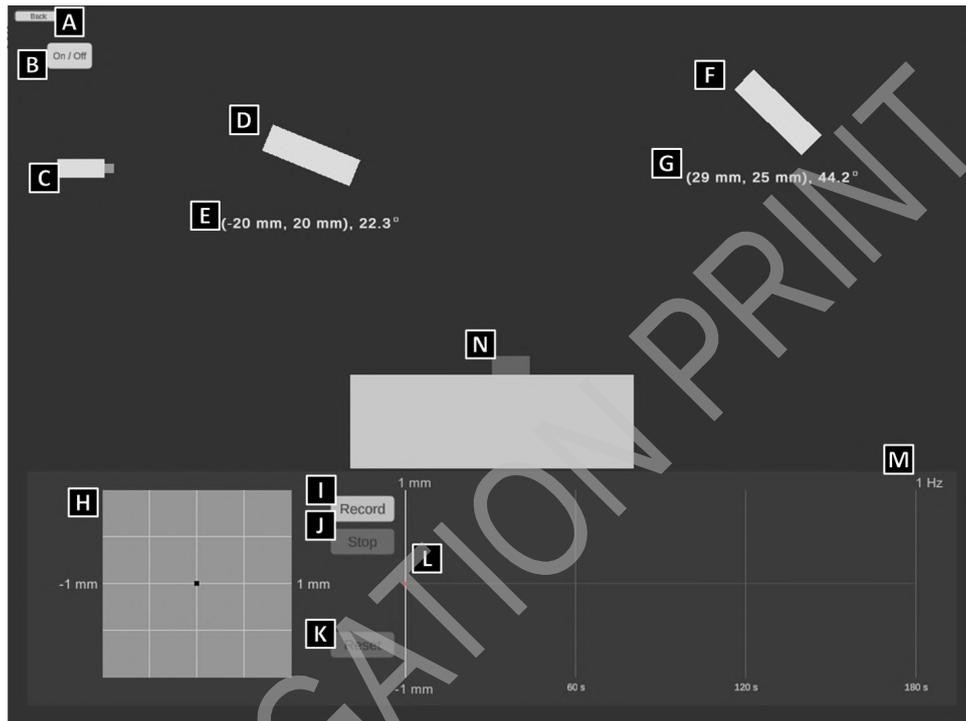


図1 (A) ナノカンチレバー梁の SEM 像 (B) ナノカンチレバー梁の図。長さ L 、幅 w 、厚さ t である。

II. 機器の紹介

1A



共通

- A. 前のページに戻る
- B. レーザースイッチ
- C. レーザー射出機 (エミッター)
- D. 反射板 (リフレクター) : このデバイスの横にある矢印をクリックして正確にコントロールするか、マウスの左ボタンで直接ドラッグして移動させることができる。
- E. リフレクターの位置 : 位置は 1×10^{-3} mの精度、角度は 0.1° の精度である。
- F. 位置検出機、PSD
- G. 位置検出機の位置 : 位置の座標は 1×10^{-3} mの精度、角度は 0.1° の精度である。
- H. PSD 記録システム : このデバイスの横にある矢印をクリックして正確にコントロールするか、直接マウスの左ボタンで水平方向に移動するようにドラッグすることができる。このシステムの領域は、縦方向・水平方向に $\pm 1 \times 10^{-3}$ mの範囲。
- I. PSD レコーダー : 録画開始ボタン
- J. PSD レコーダー : 録画停止ボタン
- K. PSD レコーダー : リセット録画ボタン
- L. PSD の記録履歴 : 測定値は 0.0001×10^{-3} mの精度を持ち、最長で 180 秒の記録が可能。チャート上でマウスの左ボタンを押すか、キーボードの矢印キーをクリックすると、データを照会することができる。

Experiment

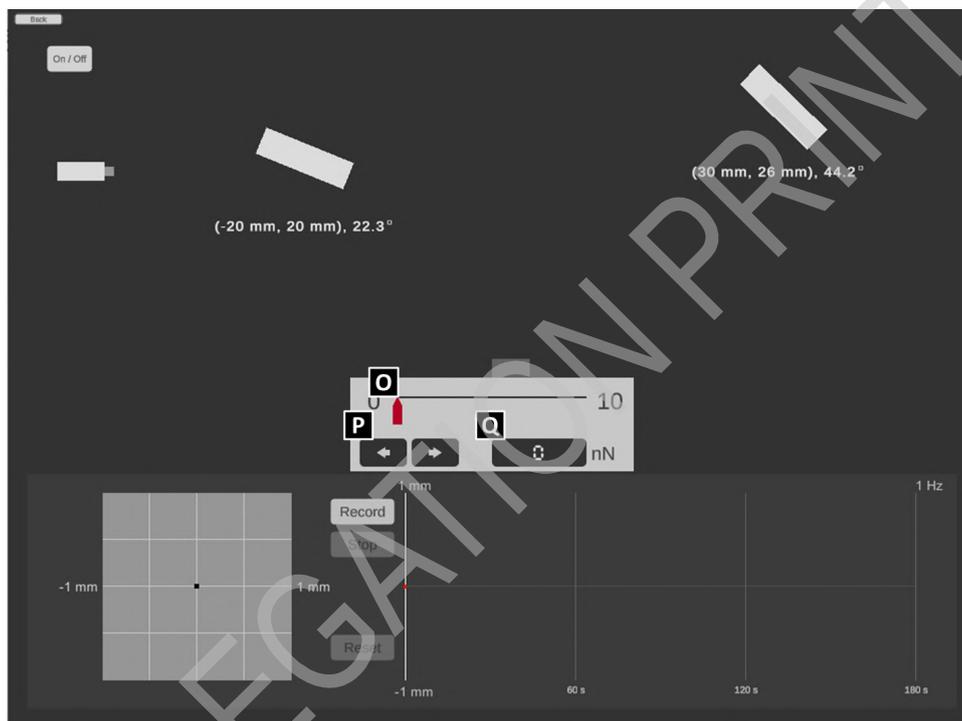


Q1-3

Japanese (Japan)

- M. PSD 記録周期：1Hz
- N. 片持ち梁の保持器：キャリアの左上隅の座標は (0, 0) であり、片持ち梁は左上端に設置されている。

1B



- O. 点荷重のコントローラー：赤いカーソルをドラッグして水平方向に移動することで力をコントロールできる。
- P. 点荷重のマイクロコントローラー：マウスの左ボタンで矢印ボタンをクリックすることで、力を正確にコントロールすることができる。
- Q. 点荷重の表示：精度は最大で 0.01×10^{-9} N。

Experiment

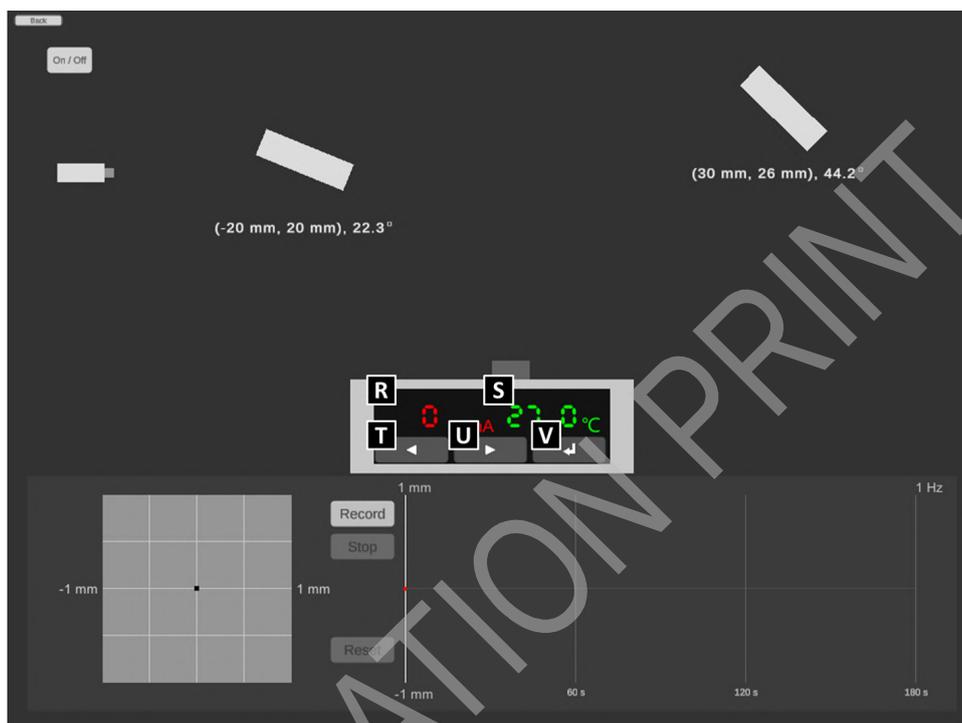


Asian Physics Olympiad
2021 TAIPEI

Q1-4

Japanese (Japan)

1C



- R. ヒーターの電流を最高 $1 \times 10^{-3} \text{A}$ 精度で表示する。
- S. ヒーターの温度は、最大 0.1°C の精度で表示する。
- T. ヒーターの電流を減らすためのボタン：一度のクリックあたり $2 \times 10^{-3} \text{A}$ 。
- U. ヒーターの電流を増やすためのボタン：一度のクリックあたり $2 \times 10^{-3} \text{A}$ 。
- V. 電流の変化を設定するボタン：サンプルを加熱したり冷却したりする時間は、現実と同じように必要であり、任意に温度をリセットすることはできない。従って、サンプルを過剰な電流（過電流）で加熱し過ぎると冷却に必要な時間が増大するので注意せよ。

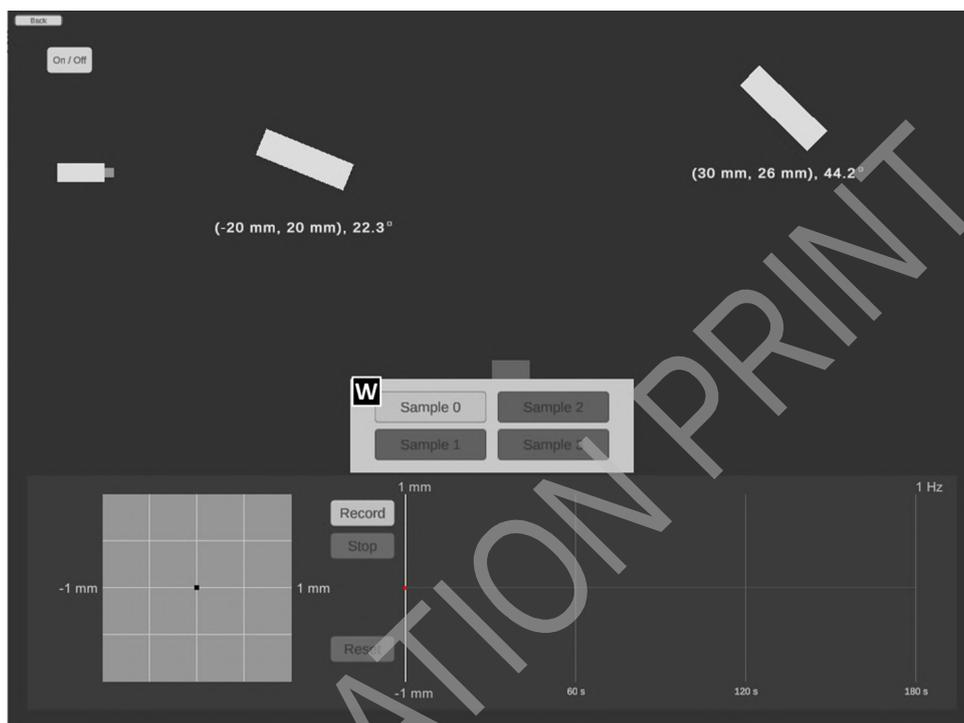
Experiment



Q1-5

Japanese (Japan)

1D



- W. サンプルスイッチ：マウスの左ボタンで直接クリックしてテストサンプルを切り替える。

III. Experiment

注：データと答は必ず指数表記と SI 単位で表すこと。長さの単位はメートルを用いること。

パート A. 光路の調整

ナノカンチレバー梁のたわみを光学顕微鏡で直接計測することは容易ではない。そこで、レーザーの直進性と反射性を利用して、位置検出センサー（PSD）で反射を測定することにする。本実験で使われるナノカンチレバーの長さ L は約 $100 \times 10^{-6} \text{m}$ である。プログラム 1A を使用し、質問 A.1~A.3 に答えよ。

- | | | |
|-----|---|-------|
| A.1 | レーザースポットがカンチレバー梁の反射領域の真ん中に当たるように光路を設計せよ。レーザースポットが PSD 表示画面の原点付近に安定して現れることを確認し、各部分の相対的な位置関係（座標と角度）を解答用紙に記入せよ。 | 0.6pt |
| A.2 | 装置の電源を入れるとカンチレバー梁が乱れるため、安定した状態になるまで時間がかかることがある。装置の電源を入れた後、プログラムの右下に PSD 上の光点の位置と時間の図が表示される。"Record" ボタンを押した後、外乱の下で、PSD 上の交点の位置 d を 3 秒ごとに記録せよ。少なくとも 40 点記録した後 "Stop" ボタンを押してデータ取り込みを停止せよ。 | 0.8pt |
| A.3 | A.2 で得られたデータのうち、安定した区間を利用して、実験環境の変動下でのこのカンチレバー梁の測定の基準値を求めよ。（ \bar{d} は d の平均値） | 1.0pt |

注：測定の便宜上、カンチレバーは環境擾乱の影響下で安定状態に達していると仮定している。つまり、光学部品の振動は測定値に影響を与えない。

注：データと答えは必ず指数表記と SI 単位で表すこと。また、長さの単位はメートルを用いること。

注：パート B では、データ解析における標準偏差の算出は必要ない。

パート B. カンチレバー梁の変形とヤング率の算出

カンチレバー梁の材料のヤング率は、原子間力顕微鏡やナノインデンテーション試験機を用いてカンチレバー梁の自由端に外力を加えることで求めることができる。その時の変形量を測定することで、ヤング率の大きさが得られる。ナノカンチレバーに力を加えたとき、その変形量が材料の弾性限界を超えなければ、力と自由端の変形量の相関関係は次のように定式化できる。

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI} \quad (1)$$

ここで F は端点にかかる力、 E はヤング率、 I はカンチレバー梁部分の断面二次モーメント、 L はカンチレバー梁の長さ、そして δ は曲げ変形の大きさである。断面二次モーメント I は、曲げ変形を受ける物体の断面の大きさが曲げ変形に与える影響を反映した物理量である。断面二次モーメントの値は、単純な積分によって算出することができる。図 2 に示すように、カンチレバー梁があり、その断面高さが t 、幅が w であるとき、その断面二次モーメントは次のように積分で計算できる。

$$I = \int_A y^2 dA = \frac{1}{12}wt^3 \quad (2)$$

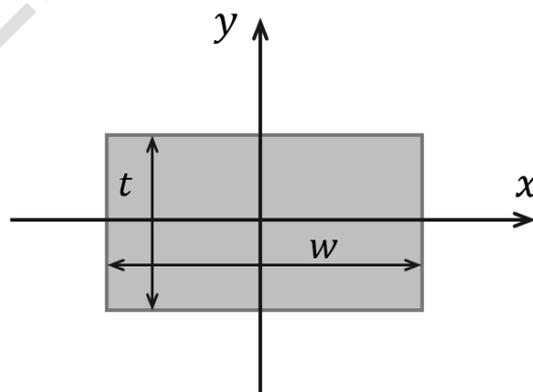


図 2 カンチレバー梁断面の模式図。

この実験で使われるカンチレバーの L は $100 \times 10^{-6}\text{m}$ 、 w は $35 \times 10^{-6}\text{m}$ 、 t は $0.20 \times 10^{-6}\text{m}$ である。基板材料にはシリコンが使用され、その標準的なヤング率 E は $280 \times 10^9\text{Pa}$ である。

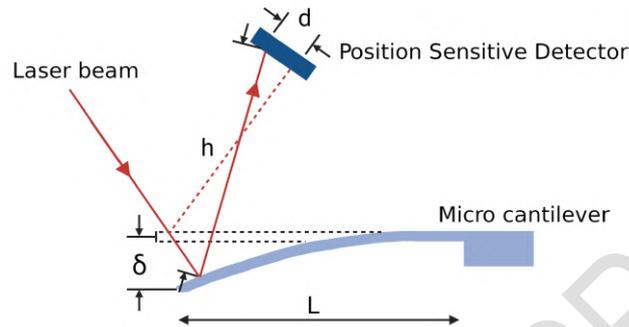


図 3. 光テコの配置を示す図。

プログラム 1B を使用し、質問 **B.1**~**B.3** に答えよ。

B.1 外力が 0 N の時の光路を設定せよ。1.0pt
 カンチレバーの反射領域の中央にレーザースポットが当たるようにして、PSD 表示画面の中央付近にレーザースポットが安定して現れることを確認せよ。このデータを表に記録して、測定基準値 d_0 を求めよ。この時の PSD 上のレーザースポットの位置を変位量 $\Delta d = 0$ とする。続いて、カンチレバーに大きさの異なる 5 つの外力を加え、実験結果を解答用紙の表に記入せよ。

B.2 表を埋めよ。曲げ変形の大きさ δ を y 軸、PSD 上のレーザースポットの位置の平均 Δd を x 軸としてグラフを描け。1.0pt

B.3 図 3 に示されているように、光テコの関係式 $\delta = C_1 \overline{\Delta d}$ から C_1 の値を算出せよ。0.4pt

注：測定の便宜上、カンチレバーは環境擾乱の影響下で安定状態に達していると仮定している。つまり、光学部品の振動は測定値に影響を与えない。

注：データと答えは必ず指数表記と SI 単位で表すこと。また、長さの単位はメートルを用いること。

注：パート C では、データ分析における標準偏差の算出は必要ない。

パート C. 二重層カンチレバー梁

二重層カンチレバー梁は、ナノエンジニアリングアプリケーション（IC プリント基板やナノブレーキなど）によく使われる構造体である。この構造体は、加熱されると異なる速度で膨張する異なる材料の 2 つの層で構成されている。

ティモシェンコの梁理論では、曲げ剛性の違いが考慮されている。図 4 は、2 つの層からなる複層カンチレバー梁で、厚さは t_1 と t_2 、熱膨張係数は α_1 と α_2 、ヤング率は E_1 と E_2 である。

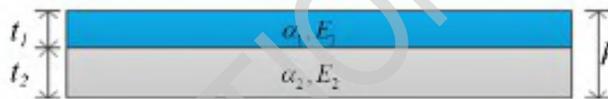


図 4. カンチレバーとして使用する二重層材料の模式図。

梁理論によれば、この 2 つの層のひずみは次のように書かれる。

$$\gamma_1 = \alpha_1 \Delta T + \frac{P_1}{w t_1 E_1} + \frac{t_1}{2r} \quad (3)$$

$$\gamma_2 = \alpha_2 \Delta T + \frac{P_2}{w t_2 E_2} + \frac{t_2}{2r} \quad (4)$$

ここで、 P_i は正味の力、 ΔT は温度差、 w は幅、 r は曲率半径である。図 4 に示すように、正味の力がバランスする必要がある。合成モーメント M と正味の力 P_i の関係は次のように書ける。

$$M = \sum_i P_i \frac{h}{2} \quad (5)$$

合成モーメント M は曲げ剛性 $E_i I_i$ と曲率半径 r の関数として次のように書ける。

$$M = \sum_i \frac{E_i I_i}{r} \quad (6)$$

E_i はヤング率で I_i は断面二次モーメント。境界条件では、ひずみが連続していることが必要であり、 $\gamma_1 = \gamma_2$ である。この境界条件により、以下の式が得られる。

$$\kappa = \frac{1}{r} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)(T - 300)}{\frac{2}{hw} \left(\frac{t_1 E_1 + t_2 E_2}{t_1 E_1 t_2 E_2} \right) (E_1 I_1 + E_2 I_2) + 0.5h} \quad (7)$$

$$\delta = \kappa L^2 \quad (8)$$

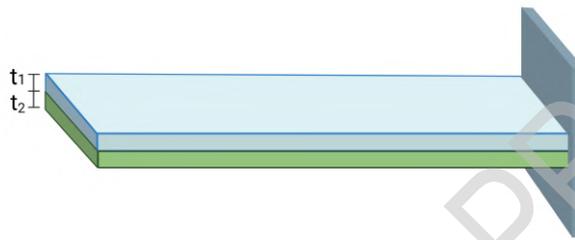


図5：2層構造の梁（上層は金属X、下層はシリコン）。

二重層梁の構造を図5に示す。この実験のパラメータは以下の通りである。 L は 100×10^{-6} m、 w は 35×10^{-6} m、 t_2 は 0.2×10^{-6} m、 t_1 は 0.04×10^{-6} m、熱膨張係数 α_1, α_2 は $14.2 \times 10^{-6}/\text{K}, 0.8 \times 10^{-6}/\text{K}$ 、断面二次モーメント I_1, I_2 は 1.867×10^{-28} m⁴, 2.333×10^{-26} m⁴。下層はシリコンベースで、シリコンのヤング率 E は 280×10^9 Pa。プログラム1Cを使用し、質問C.1~C.3に答えること。

- | | | |
|------------|--|-------|
| C.1 | 光路を含んだ簡単な実験図を設定せよ。レーザー光が反射領域の中央付近を示すようにする。室温のデータを記録し、測定基準 d_0 を求めて、 $\Delta d = 0$ の基準とする。その後、温度を上げていき、二重層梁が安定するまで待ってからデータを記録せよ。少なくとも5つの異なる温度で実験し、解答用紙の表にデータを記録せよ。 | 1.0pt |
| C.2 | 表に値を記入せよ。曲げ変形の大きさ δ を y 軸とし、温度 T を x -軸とするグラフをプロットせよ。データ解析により、傾きを求めよ。B.3の δ と Δd の相関関係を利用してよい。 | 1.0pt |
| C.3 | C.2のデータを使用して、上層部の材料のヤング率を計算せよ。 | 0.6pt |

注：測定の便宜上、カンチレバーは環境擾乱の影響下で安定状態に達していると仮定している。つまり、光学部品の振動は測定値に影響を与えない。

注：データと答えは必ず指数表記と SI 単位で表すこと。また、長さの単位はメートルを用いること。

注：パート D では、データ分析における標準偏差の算出は必要ない。

パート D. カンチレバー梁の分子吸収による曲げのテスト

合成型カンチレバー梁は、ナノ駆動装置としてだけでなく、ナノスケールセンサーとしても利用できる。例えば、図 6 は、2 層構造のカンチレバー梁の表面にマイクロ流路を設け、その上にタンパク質層をコーティングしたナノタンパク質センサーである。カンチレバーに別のバイオタンパク質を吸着させると、分子間のファンデルワールス相互作用により、タンパク質の固有の特性に応じた表面応力が発生し、その結果、梁の曲がりを検出することができる。

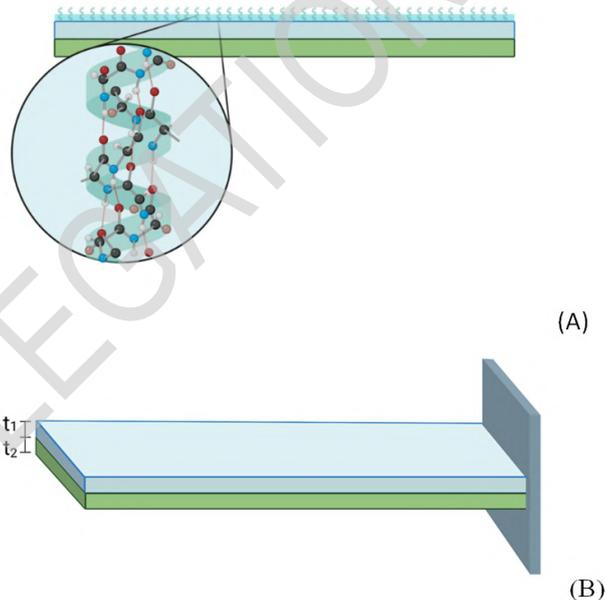


図 6. A) ナノセンサーに用いられる 2 層構造のカンチレバー梁。上層はタンパク質層でコーティングされている。B) カンチレバー構造の模式図（大きさは正確ではない）。上の層は金属 X、下の層はシリコンでできている。

今回の実験で使用した2層構造のカンチレバー梁の模式図を図6(B)に示す。長さ L はおよそ $\sim 100 \times 10^{-6}$ m, $w \sim 35 \times 10^{-6}$ m, $t_2 \sim 0.2 \times 10^{-6}$ m, $t_1 \sim 0.04 \times 10^{-6}$ m. 下の層は基板としてシリコンを使用している。シリコンのヤング率は 280×10^9 Pa で、被覆率 (CR) はサンプル0が ~ 0 、サンプル1が $\sim 1\%$ である。コーティングされた分子の厚さやヤング率がカンチレバー梁に与える影響は、その量や CR が小さいため無視することができる。有効な曲げ剛性を $EI^* \approx 1.84 \times 10^{-13}$ N·m² とせよ。プログラム 1D を使用し、質問 **D.1**~**D.4** に答えてよ。

D.1	反射したレーザースポットが反射ゾーンの中心に位置するように、つまり PSD 画面の原点にレーザースポットが安定して現れるように、サンプル0の光路を設定すること。測定した基準値 d_0 をデータシートの表に記録せよ。この点でレーザースポットの変位 Δd はゼロ、すなわち $\Delta d = 0$ である。その後、サンプル1で実験を繰り返せ。解答をデータシートの表に記録せよ。なお、サンプル1は被覆率 CR がすべてのサンプルの中で最も高いことに注意すること。	0.6pt
D.2	曲げ変形の大きさ δ と被覆率 (CR) の関係は、次のように表せると仮定する： $\delta = C_2 \frac{CR}{EI} L^4$ 。D.1 で得られたデータをもとに C_2 を評価せよ。B.3 の δ と Δd の相関関係を利用してもよい。	0.6pt
D.3	ここでは同じ分子だが CR が異なるサンプル2とサンプル3を使う。両サンプルの PSD 画面に示されたスポット変位 Δd を測定せよ。答えをデータシートに記録せよ。	0.8pt
D.4	サンプル2とサンプル3の CR を評価せよ (%で表示)。	0.6pt

光学的手法で試料の空間構造を探る (10 点)

問題の解答にはソフトウェア 2A-2E を用いよ

I. 実験のセットアップ

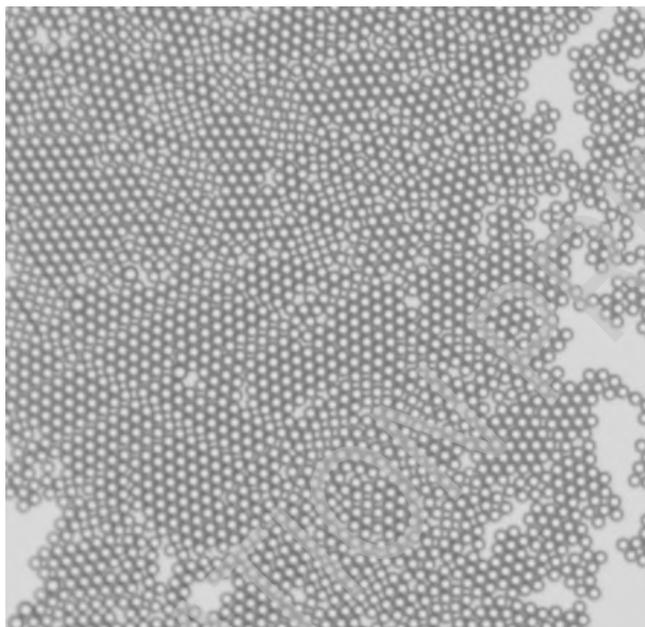


図 1 微小球の配置を示す図

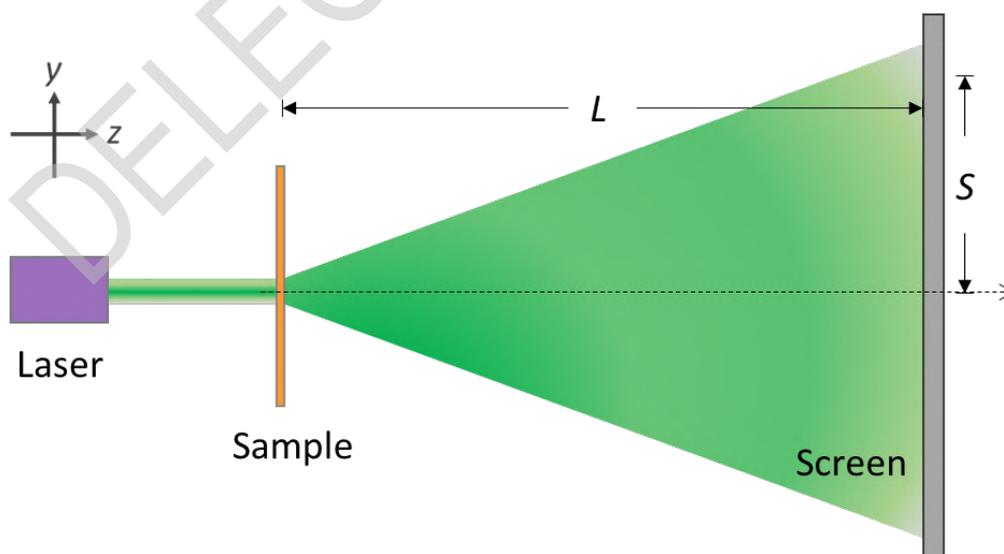


図 2 実験のセットアップ



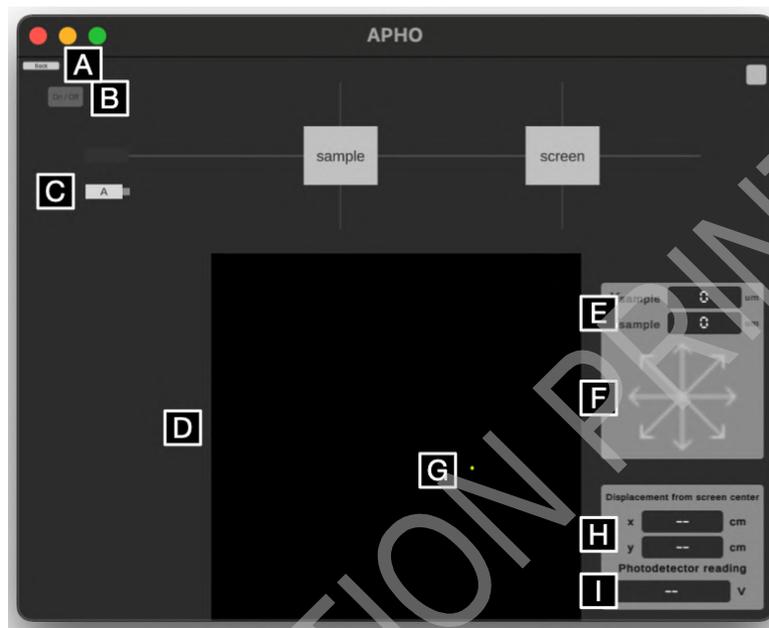
II. イントロダクション

微小球は、生物医学的測定分野で多くの応用がある。微小球を注入するために、構造とパターンが設計されたキャリアを使用することで、関連する光電センシング部品を作ることができる。このオンライン実験は、上述の実験フレームワークをシミュレートし、関連する測定を行い、微小球の直径、構造パターンのサイズを推測し、最終的にサンプルの空間構造を記述することを目的としている。

生物医学的な検出に使われるサンプルがある。この試料は、同じ直径を持つ多数の透明なガラス微小球が2次元の最密充填に配置されている。微小球は互いに接しており、配列方向は完全には一致していない(図1参照)。これらの微小球は、微小球の直径よりも大きなサイズを持ち、ある角度回転している長方形のセルに充填されており、そのセルが多数、直交する格子状に配列されている。この試料のすべての構造を知るために、この実験(図2参照)では、レーザー光源を使って試料に照射し、回折現象を観察している。回折パターンの構造解析から、試料の対称性や構造の大きさを知ることができる。

DELEGATION PRINT

ソフトウェア操作マニュアル



2A

A. 実験のメニューに戻る

実験中にこのボタンを使うと全ての実験の状態やデータが消えることに注意せよ

B. レーザーのオン/オフ

レーザーが光路上にある間、このボタンでレーザーの電源をオン/オフする。レーザーが作動すると、光の軌跡が光路上に表示される。

C. レーザー光源

ドラッグして光路上に乗せたり、取り除いたりすることができる。なお、新しいレーザー光源を光路上に設置する際には「Installing」と表示され、設置が行われていることが示される。

D. 投影スクリーン

レーザーはまず試料に照射され、その後、得られたパターンを光路の右側にあるスクリーンに投影する。パート A の実験では、スクリーンは試料から 50cm のところに固定されている。

E. 試料の座標の表示

光路の中央にある試料の座標 X_{sample} と Y_{sample} を 100 μm 単位で表示している。

F. 試料の座標の調整

クリックすると、試料の座標を 100 μm 単位で調整できる。長押しすると連続して移動する。斜めの矢印は、100 μm 単位で試料を両軸方向に移動させる。

G. 光検出器の座標の調整

投影画面をクリックして、クリックした場所に光検出器を設置する。キーボードの矢印キーで位置を微調整できる。

H. 光検出器の座標の表示

Experiment



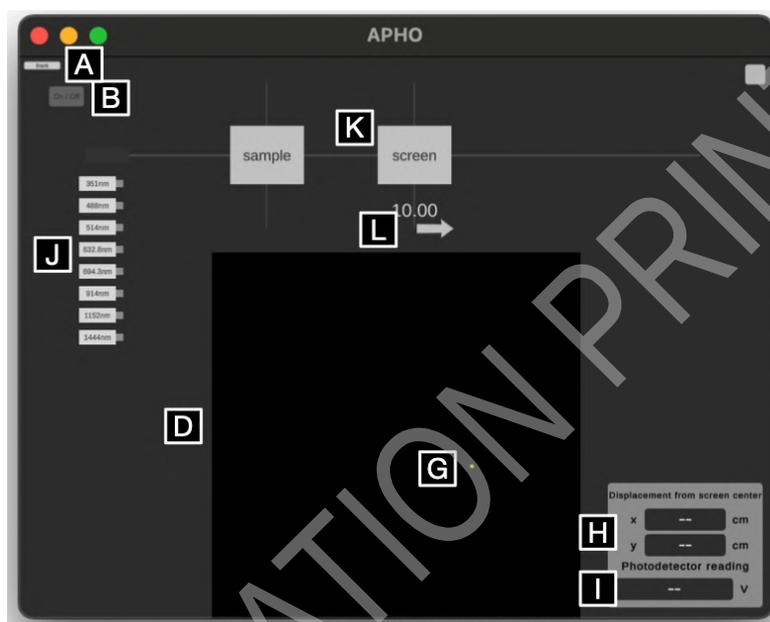
Q2-4

Japanese (Japan)

原点に対する光検出器の位置 (x, y) を 0.01cm 単位で数値化する。

I. 光検出器の電圧の表示

光検出器の電圧測定値を 0.01V 単位で表示する。なお、メーターのレンジ調整はできない。



2B - 2E

J. 多波長のレーザー光源

ドラッグして光路上に乗せたり、取り除いたりすることができる。なお、新しいレーザー光源を光路上に設置する際には「Installing」と表示され、設置が行われていることが示される。

K. 投影スクリーン

レーザーはまず試料に照射され、その後、得られたパターンを光路の右側にあるスクリーンに投影する。パート B からパート E の実験では、スクリーンと試料の距離を調整することができる。

L. 投影面の調節

マウスを使って矢印を水平方向にドラッグする。これにより、試料に対する投影スクリーンの距離を 1.0cm 単位で調整する。調整範囲は $10.0\text{cm} \sim 100.0\text{cm}$ である。

III. 実験

パート A. 光路と試料の調整 (1.0 点)

レーザーを正しく調整して試料に照射するために、試料として校正用の二重スリットを使用する。レーザーを適切に調整して二重スリットの中心に照射すると、スクリーン上に明確な干渉縞が観察される。二重スリットの元の位置は $(X_{sample}, Y_{sample}) = (0, 0)$ であり、その値はソフトウェアのインターフェースに表示される。試料の z 位置は固定されている。二重スリットの位置を x - y 平面に沿って十分に調整することで、画面に干渉縞を観察することになる。干渉縞の正しい間隔を測定できる二重スリットの最適な位置 (X_{sample}, Y_{sample}) を求めたい。

A.1	二重スリットの最適な位置 (X_{sample}, Y_{sample}) を決めよ。	0.5pt
------------	---	-------

A.2	最適な位置で観測された干渉縞を描き、 ± 1 次と ± 2 次の暗線の位置 (x, y) と、位置 (x, y) と原点の間の距離 S を記録せよ。隣接する 2 つの暗線の間隔 ΔS を求めよ。	0.5pt
------------	---	-------

Part B. 試料構造サイズの探索 (3.0 点)

システム全体の光路が最適に設定されていると仮定すると、レーザーの位置とサンプルの位置は固定されている。ただし、レーザー光の波長 λ とスクリーンの位置 L を変えるだけで、異なる回折パターンをスクリーン上で見ることができる。各微小球の対応する距離 d は、 λ , L , S (位置 (x, y) と原点の間の距離) の関係を使って求めることができる。図 1 の微小球配列の模式図を参照し、可視光領域の 3 種類のレーザー光源を用いて、微小球の直径 a を推定せよ。

B.1	微小球間の距離 d を、 λ , L , S で表した式を示せ。	0.5pt
------------	--	-------

B.2	スクリーン L の適切な位置を選択して、微小球のスクリーン上の回折パターンの座標 (x, y) と、可視領域の選択した 3 つのレーザー光源に対して、測定した距離 S と $\tan^{-1}(\frac{S}{L})$ (単位: ラジアン) を記録せよ。(平均 \bar{S} の値を得るために 1 次のリングの異なる 5 箇所を測定せよ)	1.5pt
------------	---	-------

B.3	B.1 で求めた式を使って、3 つのレーザー光源における各微小球の対応する距離 d 、微小球の直径 a 、平均直径 \bar{a} を推定する。	1.0pt
------------	--	-------

Part C. サンプル構造サイズの探索 (2.5 点)

この問題での試料は、長方形のセルの中に多数の透明ガラス微小球が 2 次的に最密充填で配列され、そのセルが多数、直交する格子点上に配列されている。各セルは、格子に対してある角度だけ回転している。スクリーンに映し出されたパターンに、長方形の格子が規則的に配置されていることによって生じる直交した回折縞を見ることができる。実験には可視光のレーザーを選び、回折パターンから長方形格子の大きさそれぞれに対応する回転角を導き出せ。

C.1 実験に使用するレーザーは可視光のものを選ぶこと。スクリーンと試料の間の距離を $L = 90 \text{ cm}$ に固定し、回折パターンを観察せよ。直交する二つの方向の 4 次から 7 次の輝点の座標 (x, y) を記録し、対応する距離 S を計算し、 $\tan^{-1}(\frac{S}{L})$ の対応する値を求めなさい (単位: ラジアン)。 0.8pt

C.2 前問のデータに基づいて、隣り合う輝点の距離 ΔS_l 、 ΔS_w を計算せよ。また、1 つの長方形の長辺 (l) と短辺 (w) の長さを推定しなさい。 0.7pt

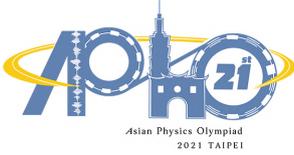
C.3 回転角の推定: 角度を推定するための線を引く。輝点の 4 つの座標 (x, y) を記録しておく。1 つの長方形セルの長辺の、水平軸に対する回転角 ϕ を推定せよ。 1.0pt

Part D. サンプル構造サイズの探索 (2.5 点)

前の問題のような可視領域の入射光では、スクリーン上の交差した明るいパターンの中に、より細かい回折スポットパターンがあり、識別は容易ではない。したがって、試料の鮮明な回折パターンを得るためには、より長波長の光が必要となる。微細な回折スポットパターンを生成するためには、赤外レーザーを試料に照射すること。赤外線は目に見えないので、回折スポットの位置を見つけるには光検出器が必要である。回折スポットパターンから試料の格子構造を決定しなさい。

D.1 スクリーンの位置を 95 cm に設定し、実験用の赤外線レーザーを 1 台選び、光検出器を使ってスクリーン上の微細な回折スポットパターンを識別しなさい。レーザーの波長とスクリーン上の 4×4 の微細な回折輝点のセットの座標を表に記入しなさい。 4×4 のスポットパターンを描き、隣接するスポット間の距離 ΔS_x 、 ΔS_y を図中に記入し、その値を計算しなさい。 1.9pt

D.2 赤外実験の結果から、格子状に並んだセル間の間隔 d_x 、 d_y を決定しなさい。 0.6pt



Part E. サンプル構造サイズの探索 ((1.0 点))

このサンプルは、多数の透明なガラス微小球が 2 次元的に最密充填状態で配列されたもので (図 1), 特定の回転角を持つ長方形のセルが多数、格子状に並んでいる。微小球は互いに接しており、配列方向は完全には一致していない。このサンプルには、微小球の規則的な配列の他に、微小球の直径よりも大きな長方形セルの配列がある。パート C とパート D の質問によると、回折縞を観察して得られた構造の大きさと方向の情報から、このサンプルの構造を特定できる。

- E.1** セルの周期配列の模式図を描きなさい。それを長方形のセルを 3x3 に並べて表し、 1.0pt 問題 **Part C** と **Part D** におけるセルの大きさ (l と w)、セル同士の間隔 (d_x と d_y)、セルの回転角 (ϕ) を記号 (l, w, d_x, d_y, ϕ) で記しなさい。

DELEGATION PRINT