

平成29年度機械工学専攻
大学院修士課程入学試験問題

「機械工学」(第2部)

試験日時：平成28年8月30日(火) 13:00～16:00

注意事項

1. 試験開始の合図があるまで、この問題冊子を開かないこと。
2. 問題は問題1から問題3までである。全問に解答すること。
3. 問題の落丁、乱丁、あるいは印刷不鮮明な箇所があれば申し出ること。
4. 答案用紙は6枚配付される。枚数を確認し、過不足があれば申し出ること。
5. 問題ごとに2枚の答案用紙を用いて解答すること。設問Ⅰ、Ⅱに分かれている問題は、設問ごとに1枚の答案用紙を用いて解答すること。解答を表面で書ききれない時は、裏面にわたってもよい。なお、それでも解答するスペースが不足する場合は答案用紙を与えるので申し出ること。
6. 答案用紙の指定された箇所に、自分の受験番号、その答案用紙で解答する問題番号を記入すること。記入もれの場合は採点されないことがある。なお、科目名欄には「機械工学(第2部)」と記入すること。答案用紙の右端にある「 / of」については、答案用紙を追加しない場合は空欄のままでよい。但し答案用紙を追加した場合は、問題ごとの枚数を記載する。
7. 解答に関係のない記号や符号を記入した答案は無効となることがある。
8. 答案用紙は、解答ができなかった分も含め、全てを提出すること。
9. 下書き用紙は3枚配付される。左上に自分の受験番号を記入すること。
10. 下書き用紙は、使用しなかった分も含め、3枚全部を提出すること。
11. 問題冊子は持ち帰ってよい。

FY2017 Department of Mechanical Engineering

Master Course Program Entrance Examination

“Mechanical Engineering” (Part 2)

2016/8/30 (Tuesday) 13:00~16:00

Instructions

1. Do not open the exam booklet until you are instructed to begin.
2. Answer all Questions in Problems 1, 2, and 3.
3. If you find some incomplete printing or collating, report them to the proctor.
4. Make sure that you have all 6 answer sheets. Let the proctor know otherwise.
5. Use 2 answer sheets for each Problem. If there are Questions I and II in a Problem, use one answer sheet for one Question. If the space on the front side of the answer sheet is not enough, you may also use the backside. If the space is still not enough, ask the proctor for an additional answer sheet.
6. On each answer sheet, write your candidate number and the Problem number in the designated boxes. If you fail to do so, the answer sheet may not be graded. Write “Mechanical Engineering (Part 2)” in “Subject”. Leave “(/of)” blank unless you use an additional answer sheet for the Problem.
7. Answer sheets with symbols and signs that are not related the answers may be judged invalid.
8. Hand in all the answer sheets even if you have not used them.
9. You are provided with 3 worksheets. Write your registration number on the upper left corner of each worksheet.
10. Hand in all 3 worksheets even if you have not used them.
11. You may take home the exam booklet.

(

(

問題 1

下記の I, II の両方について解答せよ. I の解答に答案用紙 1 枚を, II の解答に答案用紙 1 枚をそれぞれ用いること.

I. 固体の基板の上に固体の薄膜を成膜する際, その内部に応力が生じて基板と薄膜が変形することを考える. 基板と薄膜は等方弾性体であり, 平面応力条件が適用できるほど十分に薄い. また, x と y 軸方向の垂直応力 σ_x , σ_y 及び垂直ひずみ ε_x , ε_y には, 等二軸状態 ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ 及び $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon$) が成り立つ. 基板の長さは L , 幅は W であり, 基板と薄膜のヤング率, ポアソン比, 厚さをそれぞれ $E_s, \nu_s, t_s, E_f, \nu_f, t_f$ とする.

(1) 図 1-1 に示すように, 垂直応力 σ_x, σ_y の下にある基板において, 等二軸状態が成り立つ時, 応力 σ とひずみ ε の関係を求めよ.

(2) 外部からの応力が負荷されていない基板に薄膜を成膜する. 成膜により, 薄膜の内部には等二軸の圧縮応力が生じて基板と薄膜は図 1-2 に示すように変形し, その曲率半径は R , 中心角は θ となった. その時の応力分布と曲げモーメントを図 1-3 に示す. ただし, t_f は t_s に比べて無視できるほど小さいため, 中立面は基板の中央の位置にあり, 薄膜中の応力 σ_f は, 膜厚方向に一定と仮定する.

1. 中立面から z_1 だけ離れた面における基板のひずみ ε_1 を, 曲率半径 R と距離 z_1 を用いて表せ.

2. 中立面に対して, 薄膜の応力 σ_f により生じる単位幅あたりの曲げモーメント M_f と, 図 1-3 に示すように分布する基板の応力 σ_s により生じる単位幅あたりの曲げモーメント M_s を考える. M_f と M_s を $E_s, \nu_s, t_s, E_f, \nu_f, t_f, W, R, \sigma_f$ の中で必要なものを用いて表せ.

3. 平衡状態では M_f と M_s は等しいことを用いて薄膜の応力 σ_f を求めよ.

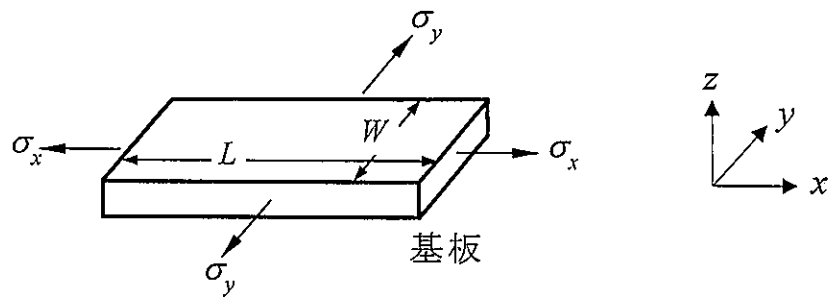


图 1-1

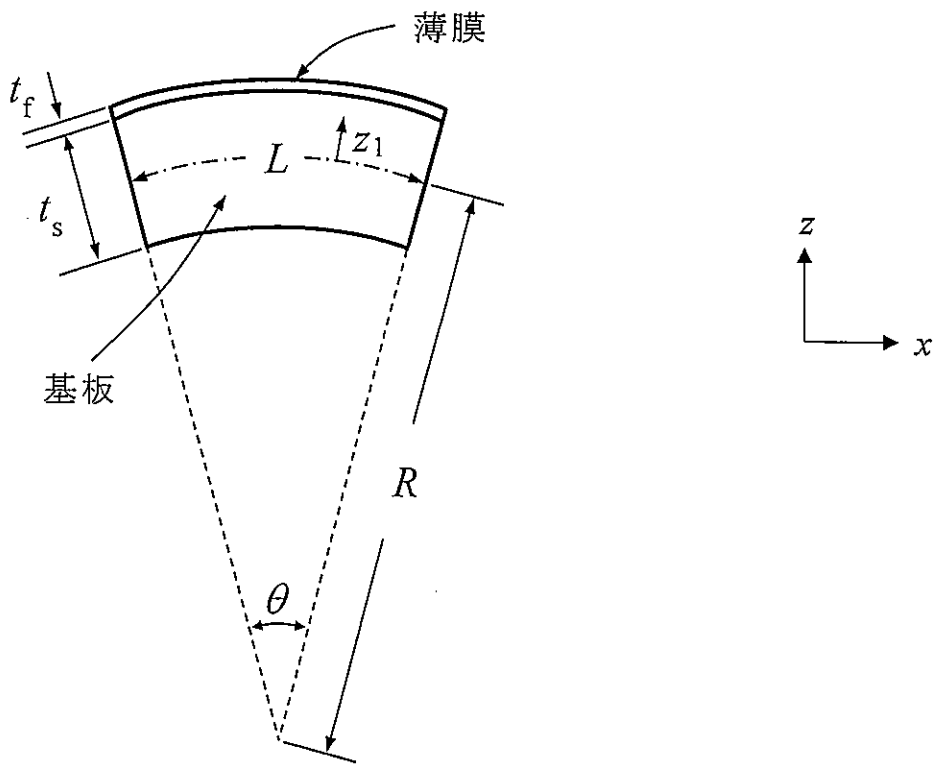


图 1-2

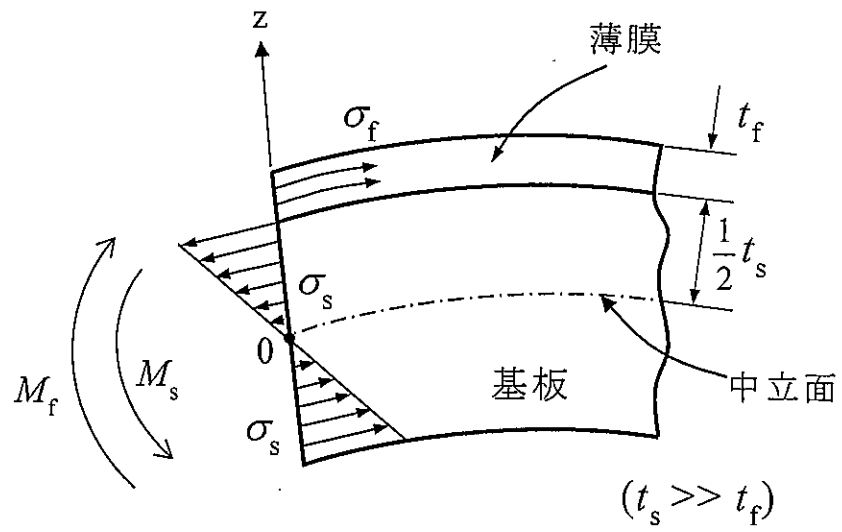


图 1-3

II. 図 1-4 のような, 8 分割され, 接着された薄肉円筒 (内半径 r , 厚さ h , 長さ L) の構造物を考える. 構造物の上下はふたで接着され, 密閉されている. 材料は, 引張り強さ σ_b , ヤング率 E , ポアソン比 ν の脆性材料である. 接着層は十分に薄く, 接着層の引張り強度を σ_{tensile} , せん断強度を σ_{shear} とする. ふたの部分は十分な補強がされており, ふた周辺では壊れないものとする.

- (1) 図 1-5 のように構造物に引張り力 F を負荷する. 構造物の破壊が生じる条件を求めよ.
- (2) 構造物内に内圧 P がかかる場合を考える. 構造物の破壊が生じる条件を求めよ.
- (3) 図 1-6 のように構造物をねじりモーメント T でねじる場合を考える. 構造物の破壊が生じる条件を求めよ.
- (4) ここで, $r=100$ mm, $h=5$ mm, $L=200$ mm, $E=20$ GPa, $\nu=0.3$ とし, $\sigma_b=2\sigma_{\text{tensile}}=2\sigma_{\text{shear}}=200$ MPa とする. 設問(1)~(3)の場合において, 構造物がどのように壊れるのかをそれぞれ説明せよ. 必要に応じて, 図を描け.

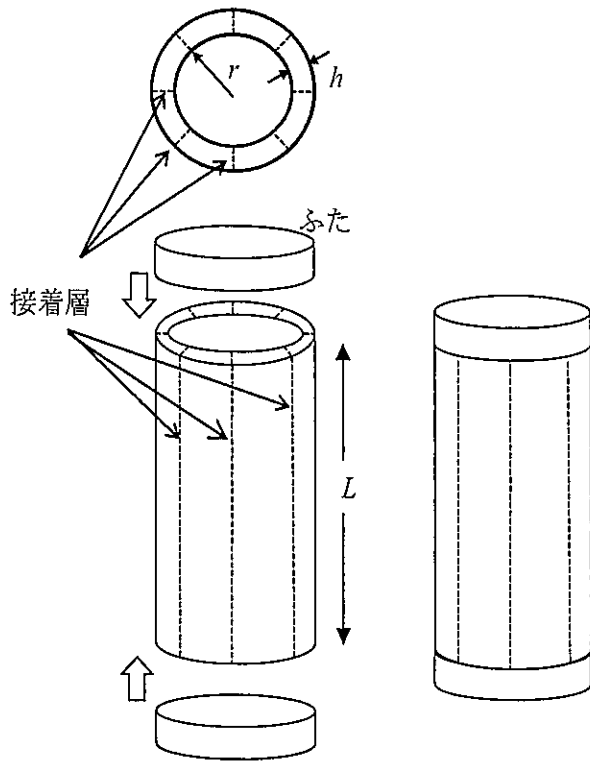


図 1-4

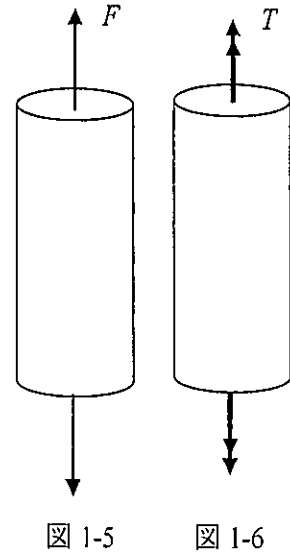


図 1-5

図 1-6

問題 2

図 2-1 に示す，質量 M の台車上の回転軸に接続されている，質量 m と長さ l の質量を無視できる剛体棒からなる倒立振り子を考える．台車は力 f で駆動され，水平方向 (x 方向) に移動する．台車の変位を x ，棒の傾きを θ とすると，質量 m の位置は， $(x + l \sin \theta, l \cos \theta)$ と表せる．なお，鉛直下向き重力加速度を g とし，質量 m と台車 M は質点とする．また，回転軸の摩擦は無視してよい．以下の設問に答えよ．

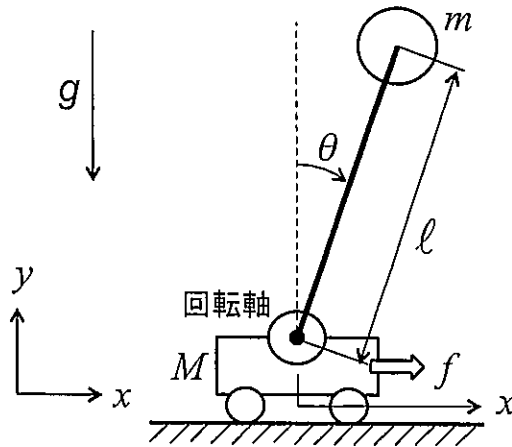


図 2-1

- (1) 系の運動エネルギーと， $\theta=0$ を基準にしたポテンシャルエネルギーを求めよ．
- (2) ラグランジアンを用いて，この系の並進運動と回転運動の運動方程式をそれぞれ導け．

以下の設問(3)~(8)においては， θ および $\dot{\theta}$ は十分に小さいと仮定せよ．

- (3) 設問(2)で得た運動方程式を線形化せよ．
- (4) 入力 f ，出力 θ である伝達関数を求めよ．なお，ラプラス演算子を s とせよ．
- (5) 系が不安定であることを示せ．

- (6) 式(1)に示すフィードバック制御を行う。系を安定化させる定数ゲイン h_1 および h_2 の条件を求めよ。

$$f = h_1 \dot{\theta} + h_2 \theta \quad (1)$$

設問(6)において、安定化された系の運動方程式は正の定係数 a, b, c, d を用いて式(2), (3)のように表される。

$$a\ddot{x} + b\ddot{\theta} = f \quad (2)$$

$$\ddot{x} + c\ddot{\theta} - d\theta = 0 \quad (3)$$

この系に対して、 θ の目標値を u とする式(4)で表される制御を行う。

$$f = h_1 \dot{\theta} + h_2 (\theta - u) \quad (4)$$

- (7) 目標値 u を入力とし、台車の加速度 \ddot{x} を出力とする伝達関数を求めよ。
- (8) 目標値 u が単位ステップ入力の時、十分に時間が経過した後の台車の加速度を求めよ。

問題 3

弦をはじいて鳴らす楽器を製作することを考える．図 3-1 に示すように，土台に固定された片持ちはりに炭素鋼の弦を張る．弦は，突起，および土台によって支持され，片持ちはりに対して平行である．また，楽器の三面図を図 3-2 に示す．片持ちはりは，長さ L ，幅 w ，厚み t とし，片持ちはりの中心軸から弦の中心軸までの距離は h とする．また，土台と突起は剛体とし，重力は無視できるものとする．工学的に妥当な近似や仮定を適宜用いながら，以下の設問に答えよ．

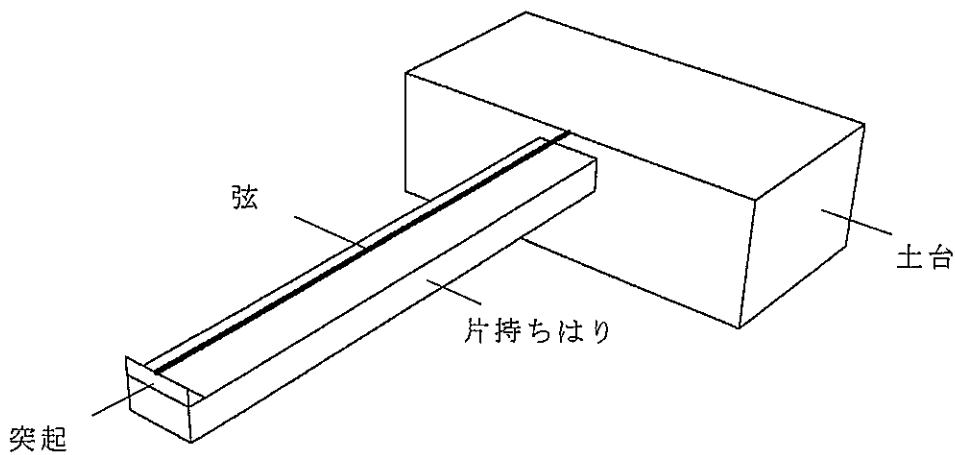


図 3-1

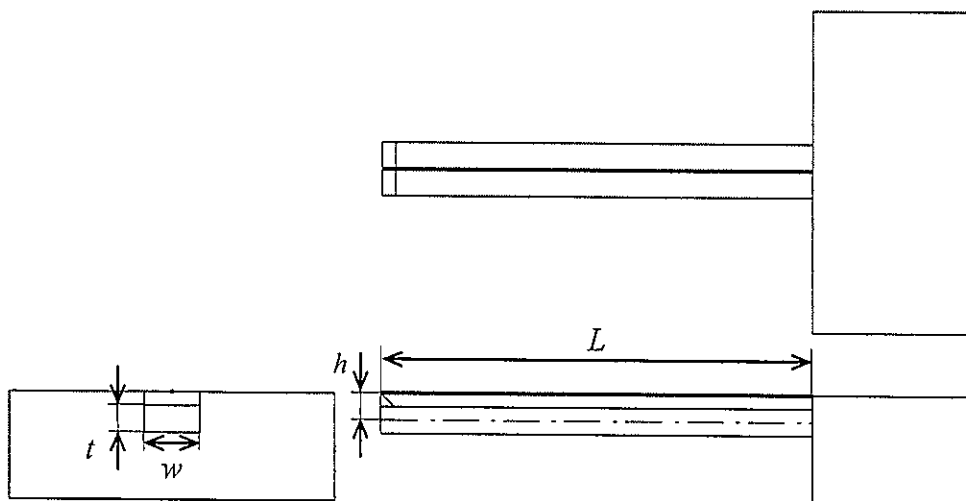


図 3-2

片持ちはりが剛体の場合について考える。

- (1) 弦の1次モードの固有振動数を振動数 f に調律したい。弦の直径が d 、材料の体積密度が ρ のとき、弦の張力 T をいくらに調整すればよいか、 f 、 L 、 d 、 ρ を用いて表せ。ただし、弦を伝わる波の速さ v は、以下の式で与えられる。

$$v = \sqrt{\frac{T}{\rho_0}}$$

ここで、 ρ_0 は弦の線密度である。

次に、 $f=1.1 \times 10^2$ Hz、 $L=7.0 \times 10^2$ mm、 $d=1.0$ mm、 $\rho=8.0$ g/cm³ のときの張力 T を有効数字2桁で求めよ。

- (2) 弦の固有振動数を調律するために、弦を巻き取って張力を調整する機構を、以下の2つの機能を満たすように考案せよ。

- ・固有振動数の精密な調整が可能なこと
- ・張力を維持できること

また、その機構によって機能が満たされる理由を説明せよ。

- (3) 環境温度が 20 °C のときに張力のない状態で長さが 7.0×10^2 mm の弦は、環境温度が 30 °C になったときどれだけ伸びるかを、有効数字2桁で答えよ。ただし、弦の線膨張係数は 1.0×10^{-5} K⁻¹ とする。

- (4) 20 °C の環境で、弦の1次モードの固有振動数を 1.1×10^2 Hz に調律した。環境温度が 30 °C になったとき、固有振動数はいくらになるかを有効数字2桁で答えよ。ただし、弦の直径、体積密度、線膨張係数、ヤング率は、それぞれ 1.0 mm、8.0 g/cm³、 1.0×10^{-5} K⁻¹、 2.0×10^2 GPa とし、環境温度の変化による片持ちはりの膨張、収縮は無く、 $L=7.0 \times 10^2$ mm とする。

次に、片持ちはりが弾性体の場合について考える。環境温度は $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ とする。

- (5) 弦に張力が作用すると、片持ちはりがたわむ。弦の張力が T のときのはりのたわみを y とするとき、片持ちはりの曲げ剛性を、 T 、 h 、 L 、 y で表せ。ただし、 y は L に比べて十分に小さいものとする。
- (6) 設問(5)の曲げ剛性を実現するために、片持ちはりの材料の持つヤング率 E の条件を、 T 、 h 、 L 、 y 、 w 、 t で表せ。
- (7) 設問(1)で求めた張力で弦を張ったとき、図 3-3 のように片持ちはりがたわんだ。このときの、片持ちはりの先端から固定端までの直線距離 AO と、弦の長さ BC との差を、有効数字 2 桁で求めよ。ただし、 $h=10\text{ mm}$ 、 $L=7.0\times 10^2\text{ mm}$ 、 $w=30\text{ mm}$ 、 $t=10\text{ mm}$ 、 $E=60\text{ GPa}$ とする。

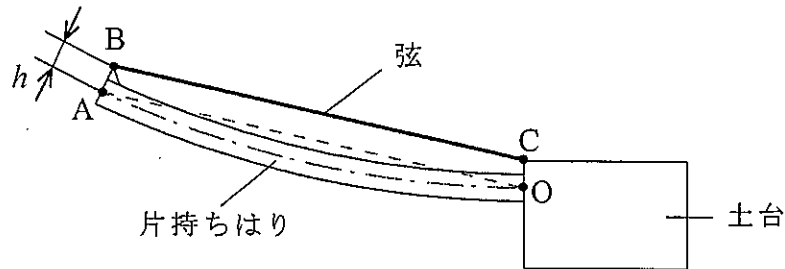


図 3-3

- (8) 弦の張力による片持ちはりのたわみを抑える方法を 1 つ考案し、50 文字以内で記述せよ。
- (9) 弦の振動を電気的な信号に変換することを考える。エレキギターでは、多くの場合、永久磁石の周りに電線を巻きつけたコイルを用いて、誘導電流を発生させることで、弦の振動を電気信号に変換している。弦の振動を電気信号に変換するこれ以外の方法を 1 つ考案し、50 文字以内で記述せよ。
- (10) 炭素鋼の線材は、一般的に引抜き加工で製造される。引抜き加工の長所と短所を 1 つずつあげ、それぞれ 50 文字以内で記せ。

(11) 炭素鋼の引抜き加工に用いるダイスの材料として適当なものを1つあげよ.

(12) 引抜き加工を行うと，表面の残留応力が引張りになることが多い．線材の表面において，引張りの残留応力を緩和したり，圧縮の残留応力を与えたりする方法を1つあげよ.

Problem 1

Answer both of following Questions I and II. Use one answer sheet for Question I and use another answer sheet for Question II.

I. Consider the bending of solid substrate due to the stress produced by deposition of solid thin film on the substrate. The substrate and the thin film are elastically isotropic and they are thin enough that the stress state is considered to be a plane stress condition. Assume that the stress and the strain in the substrate and the thin film are equi-biaxial ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ and $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon$), where σ_x and σ_y are the normal stress and ε_x and ε_y are the normal strain in the x - and y -axis directions. The length and width of the substrate are L and W , respectively. The Young's modulus, Poisson ratio and thickness of the substrate and the thin film are $E_s, \nu_s, t_s, E_f, \nu_f$ and t_f , respectively.

(1) As shown in Figure 1-1, the substrate is subjected to biaxial stress of σ_x and σ_y . Find the relationship between stress σ and strain ε under equi-biaxial conditions.

(2) Thin film is deposited on the substrate without external force before deposition. The substrate and the thin film are deformed as shown in Figure 1-2 due to an equi-biaxial compressive stress in the thin film produced by film deposition, where R is the radius of curvature of the substrate and θ is the subtended angle. Figure 1-3 is a schematic diagram showing the stress distribution and bending moments of the substrate and the thin film. Assume that the film thickness t_f is much less than that of the substrate t_s , so the neutral plane can be taken at the middle of the substrate, and the stress σ_f is uniform across the film thickness.

1. Express the strain of the substrate ε_1 in the plane at a distance of z_1 from the neutral plane in terms of the radius of curvature R and the distance z_1 .

2. Consider the bending moment per unit width M_f produced by the stress of thin film σ_f and the bending moment per unit width M_s produced by the stress of substrate σ_s with respect to the neutral plane. σ_s is distributed in the substrate as shown in Figure 1-3. Express M_f and M_s with the necessary parameters among $E_s, \nu_s, t_s, E_f, \nu_f, t_f, W, R$ and σ_f .

3. Find the stress of the thin film σ_f by using the fact that the bending moment M_f is equal to M_s at equilibrium state.

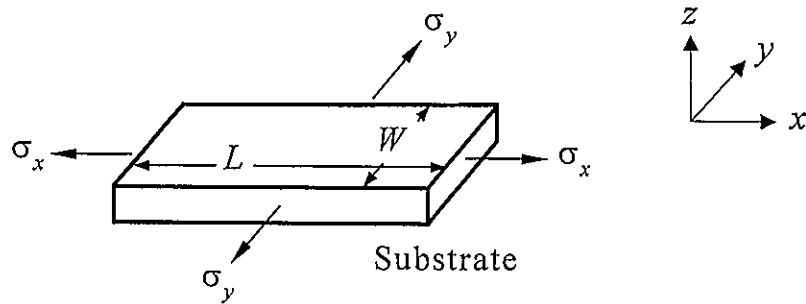


Figure 1-1

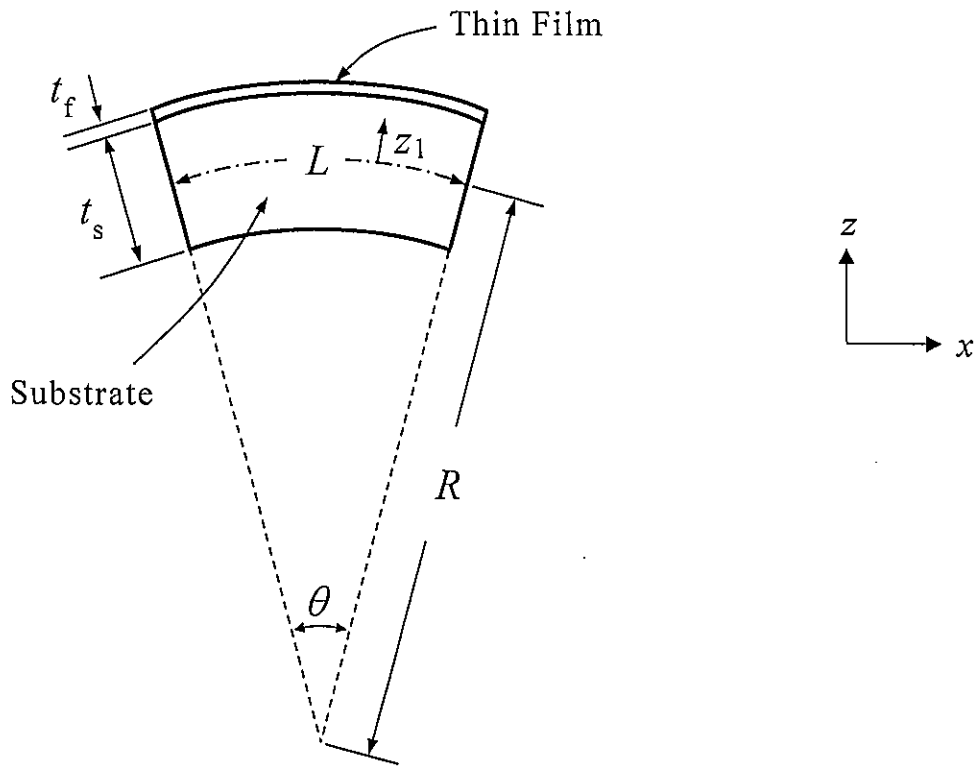


Figure 1-2

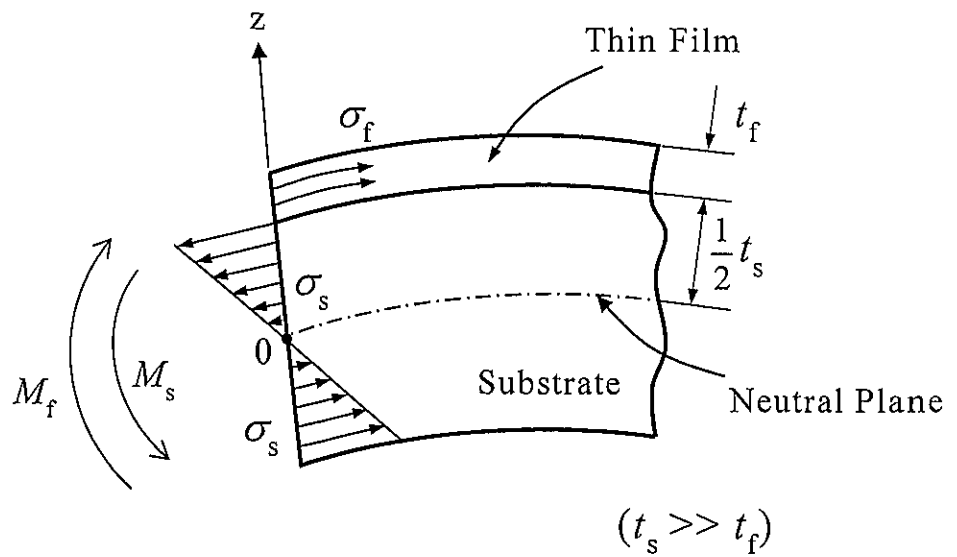


Figure 1-3

II. As shown in Figure 1-4, there is a thin cylinder structure (inner radius r , thickness h , length L), which is divided into 8 parts and is adhered to each other. Since the top and bottom of the cylinder are adhered to the lids, the structure is closed. The structure is fabricated from the brittle material with tensile strength σ_b , Young's modulus E and Poisson ratio ν . The thickness of adhesion layers is sufficiently thin. Tensile strength and shear strength of adhesion layer are σ_{tensile} and σ_{shear} , respectively. Since the region around the lids is fully reinforced, the fracture does not occur around the lids.

- (1) As shown in Figure 1-5, the structure is subject to tensile force F . Show the conditions under which the fracture occurs.
- (2) In the case that the structure is subject to internal pressure P , show the conditions under which the fracture occurs.
- (3) As shown in Figure 1-6, the structure is subject to torsional moment T . Show the conditions under which the fracture occurs.
- (4) Consider that $r=100$ mm, $h=5$ mm, $L=200$ mm, $E=20$ GPa, $\nu=0.3$ and $\sigma_b=2\sigma_{\text{tensile}}=2\sigma_{\text{shear}}=200$ MPa. Explain how the fracture occurs in the case of each Question of (1), (2) and (3), respectively. Draw schematic diagram if necessary.

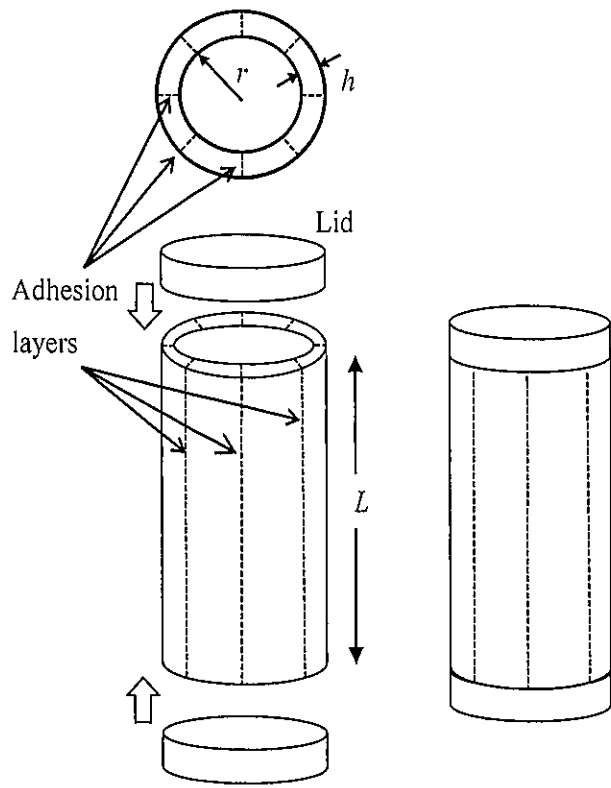


Figure 1-4

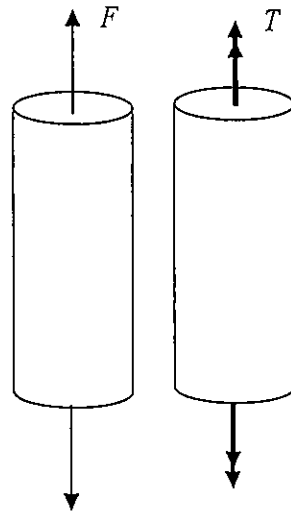


Figure 1-5

Figure 1-6

Problem 2

Consider an inverted pendulum which consists of the mass m and the rigid rod of length ℓ with negligible mass connected to the cart of mass M through the pivot as shown in Figure 2-1. The cart is driven by the force f and moves in the horizontal direction (x direction). The position of the mass m can be described as $(x + \ell \sin \theta, \ell \cos \theta)$ when the displacement of the cart is x and the tilt angle of the rigid rod is θ . Gravity g works vertically downward, and the mass m and the cart M are assumed to be mass points. The friction of the pivot is negligible. Answer the following questions.

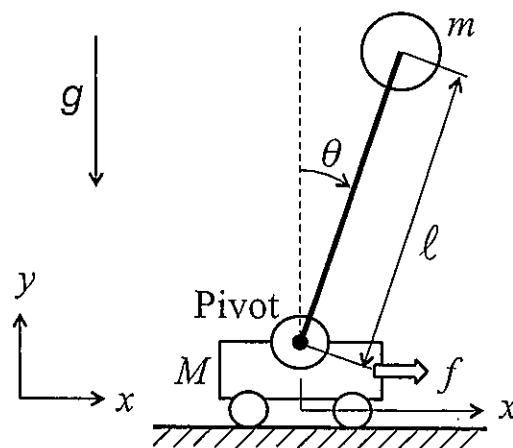


Figure 2-1

- (1) Obtain the kinetic energy and the potential energy of the system against the reference $\theta = 0$.
- (2) Derive the equations of motion for translation and rotation using the Lagrangian.

Assume θ and $\dot{\theta}$ are sufficiently small in Questions (3)-(8).

- (3) Linearize the equations of motion obtained in Question (2).

- (4) Obtain the transfer function when the input is f and the output is θ . Use s to represent the Laplace operator.
- (5) Show the system is unstable.
- (6) Feedback control by using equation (1) is conducted. Obtain the condition of the constant gains h_1 and h_2 to stabilize the system.

$$f = h_1\dot{\theta} + h_2\theta \quad (1)$$

The equations of motion of the stabilized system in Question (6) are written as Equations (2) and (3), using positive constants a , b , c and d .

$$a\ddot{x} + b\ddot{\theta} = f \quad (2)$$

$$\ddot{x} + c\ddot{\theta} - d\theta = 0 \quad (3)$$

Then, the control as shown in Equation (1) is conducted to this system,

$$f = h_1\dot{\theta} + h_2(\theta - u), \quad (4)$$

where u is the target value of θ .

- (7) Obtain the transfer function when the input is the target value u , and the output is the acceleration \ddot{x} of the cart.
- (8) Obtain the acceleration of the cart after the sufficient time passes when the target value u is the unit step function.

Problem 3

Consider making a plucked string instrument. As shown in Figure 3-1, the instrument is strung with a carbon steel string along a cantilever fixed on a base. The string is supported by a ridge and the base, so that it becomes parallel to the cantilever. Figure 3-2 shows three orthographic views of the instrument. Length, width and thickness of the cantilever are L , w and t , respectively, and a distance between central axes of the cantilever and the string is h . The base and the ridge are rigid, and gravity is negligible. Answer the following questions using reasonable approximations and assumptions from an engineering viewpoint.

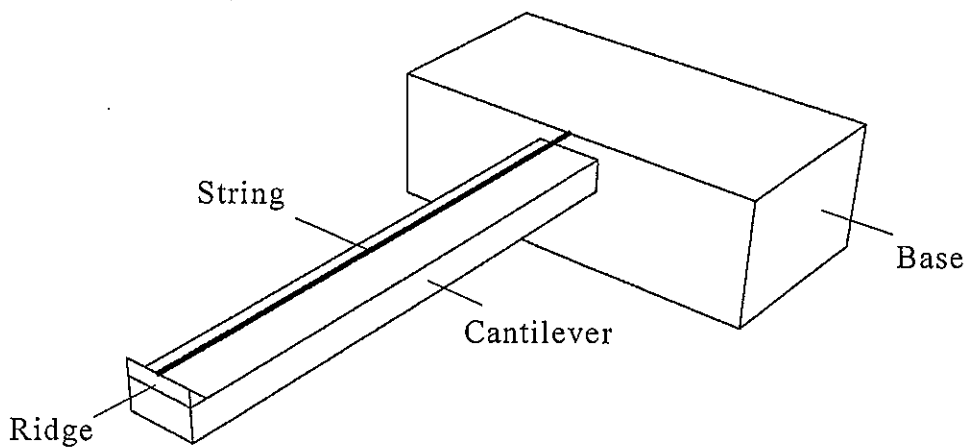


Figure 3-1

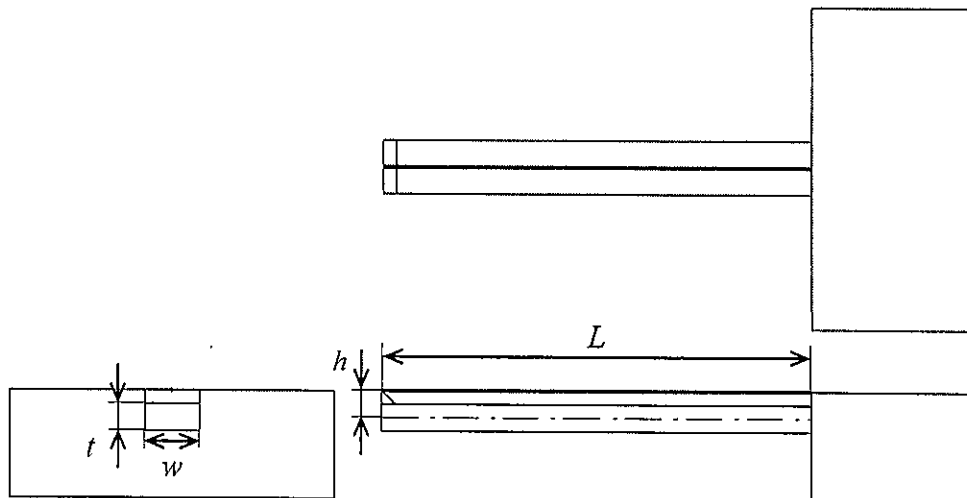


Figure 3-2

Consider a case where the cantilever is a rigid body.

- (1) The natural frequency of the first vibration mode of the string is to be tuned to frequency f . Express a tensile force T of the string using f , L , d and ρ , where d and ρ are a diameter and a volume density of the string, respectively. Here, a velocity v of a wave propagating through the string is given as the following formula:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\rho_0}},$$

where ρ_0 is the line density of the string.

Next, obtain T with two-digit accuracy using $f = 1.1 \times 10^2$ Hz, $L = 7.0 \times 10^2$ mm, $d = 1.0$ mm and $\rho = 8.0$ g/cm³.

- (2) Propose a mechanism of adjusting the tensile force by reeling the string, in order to tune the natural frequency of the string, where the mechanism must satisfy the following two functions:

- To tune the natural frequency precisely
- To keep a tensile force

In addition, explain why the proposed mechanism satisfies these functions.

- (3) A length of the string without a tensile force is 7.0×10^2 mm at an environmental temperature of 20 °C. Obtain an elongation with two-digit accuracy when the environmental temperature increases to 30 °C. Here, use the linear expansion coefficient of the string of 1.0×10^{-5} K⁻¹.

- (4) The natural frequency of the first vibration mode of the string was tuned to 1.1×10^2 Hz at the environmental temperature of 20 °C. Obtain the natural frequency at the environmental temperature of 30 °C with two-digit accuracy. Here, the diameter, the volume density, the linear expansion coefficient and Young's modulus of the string are 1.0 mm, 8.0 g/cm³, 1.0×10^{-5} K⁻¹, 2.0×10^2 GPa, respectively.

Expansion and contraction of the cantilever caused by a change in the environmental temperature are negligible and $L=7.0 \times 10^2$ mm.

Next, consider a case where the cantilever is an elastic body. The environmental temperature is 20 °C.

- (5) Cantilever is bended by applying the tensile force to the string. Obtain a bending stiffness of the cantilever using T , h , L and y , where y is a flexure of the cantilever caused by the tensile force T , and sufficiently small compared with L .
- (6) Express the condition of Young's modulus E to realize the bending stiffness in Question (5), using T , h , L , y , w and t .
- (7) When the tensile force obtained in Question (1) is applied to the string, the cantilever is bended as shown in Figure 3-3. Obtain a difference in length between two straight-lines AO and BC with two-digit accuracy, where A and O are the ends of the cantilever, and B and C are the ends of the string. Here, use $h=10$ mm, $L=7.0 \times 10^2$ mm, $w=30$ mm, $t=10$ mm and $E=60$ GPa.

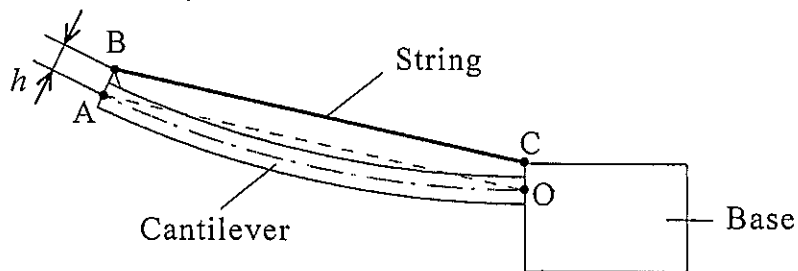


Figure 3-3

- (8) Propose a method for suppressing the flexure of the cantilever caused by the tensile string, and describe it within 30 words.
- (9) Consider the transduction of a vibration of the string to an electrical signal. In most electric guitars, vibrations of a string are transduced to electrical signals by generating an induction current in a coil winding around a permanent magnet. Propose another method for the

transduction of vibration of the string to an electrical signal, and describe it within 30 words.

- (10) A wire rod of carbon steel is generally manufactured using drawing process. Describe one advantage and one disadvantage of the drawing process within 30 words, respectively.
- (11) Give an example of suitable materials for the dies used in the drawing process of carbon steel.
- (12) Tensile residual stress usually exists at a surface layer after drawing process. Describe a method for reducing the tensile residual stress or applying a compressive residual stress to the surface layer of the wire rod.