

# 2024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：2023年8月29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。設問Ⅲまでである場合は、問題冒頭の指示に従うこと。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。

(白紙)

## 問題 1

下記の I, II の両方について解答せよ．なお，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. 図 1-1 のような，二つの三角形板が溶接されて作られた  $30\text{ mm} \times 30\sqrt{3}\text{ mm}$  の長方形板が， $x$  方向に  $20\text{ MPa}$  の引張応力， $y$  方向に  $10\text{ MPa}$  の圧縮応力を受けている．溶接線の幅は十分に薄く，ヤング率およびポアソン比は二つの三角形板と同一であり，長方形板の応力場は一様とみなせる．長方形板のヤング率を  $192\text{ GPa}$ ，ポアソン比を  $0.2$ ，板厚を  $1\text{ mm}$  とする．

- (1) 溶接線に作用している内力ベクトルを求めよ．
- (2) 溶接線に垂直な方向の垂直応力を求めよ．

次に，図 1-2 のように，同じ長方形板が垂直応力  $\sigma_x$ ， $\sigma_y$ ，せん断応力  $\sigma_{xy}$  を受けているケースを考える．

- (3) 図 1-2 のように，ひずみゲージ  $a, b, c$  を，それぞれ  $x$  方向， $y$  方向，溶接線に平行に配置した．それぞれのひずみゲージで得られたひずみは， $\varepsilon_a = 1100 \times 10^{-6}$ ， $\varepsilon_b = 200 \times 10^{-6}$ ， $\varepsilon_c = 200 \times 10^{-6}$ であった．応力  $\sigma_x$ ， $\sigma_y$ ， $\sigma_{xy}$  の値を求めよ．

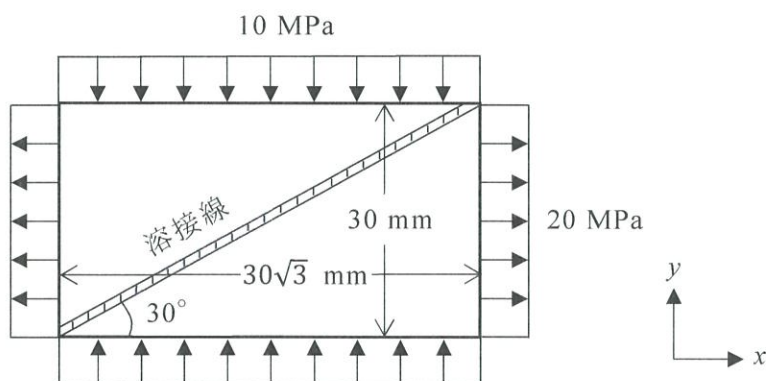


図 1-1

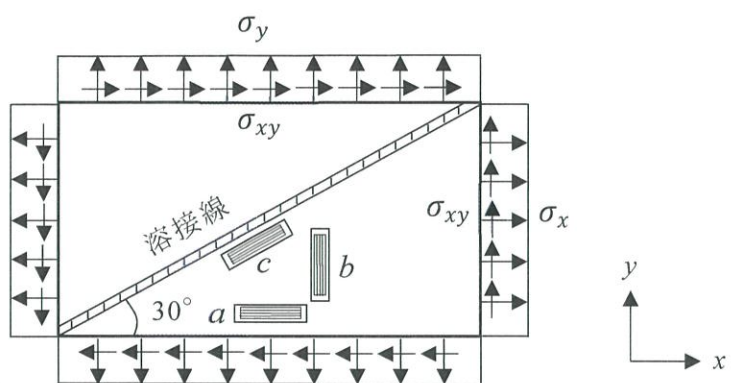


图 1-2

II. 長さ  $L$  で一様な円柱状の棒に関する以下の設問に答えよ．棒の横断面は直径  $d$  の円で、直径  $d$  は長さ  $L$  に比して十分に小さい ( $d \ll L$ )．棒の質量密度を  $\rho$  とし、重力加速度の大きさを  $g$  とする．応力の正負に関しては引張応力を正值とせよ．

(1) 図 1-3 に示すように、棒を水平な床に鉛直に置いた．棒の上端 A から距離  $x$  にある横断面に働く垂直応力を求めよ．

(2) 図 1-4 に示すように、原点  $O$  が棒の横断面円の中心と一致するように直交座標系  $(y, z)$  を設定する． $y$  軸に関する断面二次モーメントが  $\pi d^4/64$  となることを導出せよ．

(3) 図 1-5 に示すように、棒の下端 B で水平な床にピン結合し、上端 A を滑らかな鉛直壁で支えた．水平な床と棒のなす角度は  $\theta$  ( $\theta > 0$ ) である．上端 A に鉛直壁から働く支持反力は水平方向となる．その支持反力の大きさを求めよ．

(4) 図 1-5 に示す棒の上端 A から距離  $x = x_0$  における横断面に働く曲げモーメントを求めよ．

(5) 図 1-5 に示す棒の上端 A から距離  $x = x_0$  における横断面内で最大の垂直応力を求めよ．

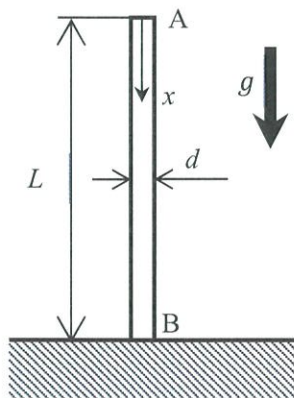


図 1-3

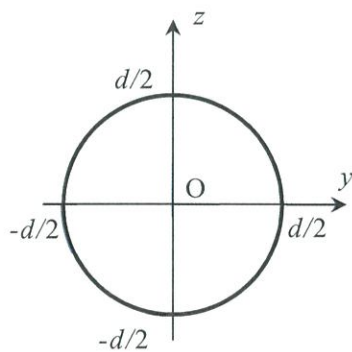


図 1-4

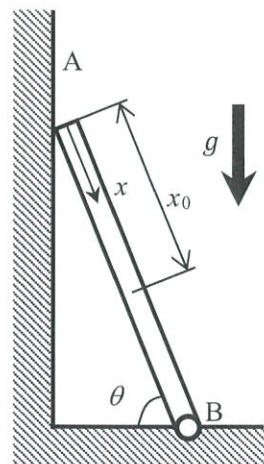


図 1-5

## 問題 2

下記のⅠ，Ⅱの両方について解答せよ．なお，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. 図2-1に示すような，動くことのない机にばね定数 $k$ のばね，減衰係数 $c$ の粘性減衰器を介して，質量 $m$ が取り付けられている1自由度系がある．振幅 $A$ ，角振動数 $\omega$ を有する正弦波状の外力 $F$ が質量 $m$ に対して垂直方向（ $x$ 軸方向）に作用しているときの定常状態の応答を考える．なお， $x$ 軸方向の質量 $m$ の変位を $x$ で表し，重力の影響は考慮しない．

- (1) 不減衰固有角振動数を $p$ ，減衰比を $\zeta$ で表すとき，1自由度系の運動方程式は式(2-1)のように記述できることを示せ．

$$\ddot{x} + 2p\zeta\dot{x} + p^2x = \frac{1}{m}F \quad (2-1)$$

以下の設問では， $p$ と $\zeta$ を用いて解答してよい．

- (2) 変位 $x$ の振幅を求めよ．

- (3) 1自由度系から机に作用する力 $T$ は，式(2-2)のように得られる．外力 $F$ に対する力 $T$ の伝達率（振幅比）を求めよ．

$$T = c\dot{x} + kx \quad (2-2)$$

- (4) ある角振動数 $\omega$ のときに， $\zeta$ がどのような値であっても設問(3)で求めた伝達率は同じ値であった．そのような角振動数 $\omega$ を求めよ．

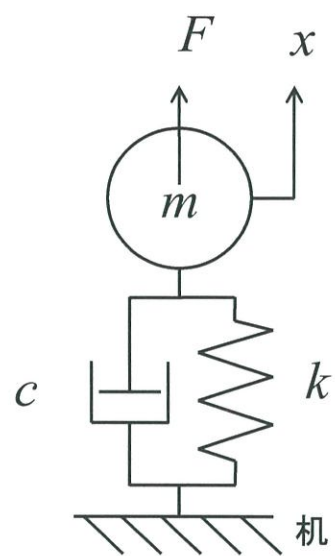


图 2-1



II. PID 制御器のパラメータ調整を考える．以下の設問に答えよ．

はじめに，伝達関数  $G_O(s) = \frac{1}{2s+1}$  を考える．

- (1) ゲイン  $|G_O(j\omega)|$  と位相  $\angle G_O(j\omega)$  を求めよ．
- (2) 位相  $\angle G_O(j\omega)$  が  $-45$  度となるときの角周波数  $\omega$  を求めよ．また， $G_O(s)$  のゲイン線図を折れ線で近似して描け．

次に， $G(s) = \frac{1}{(2s+1)^4}$  の制御対象に対して，図 2-2 のフィードバック制御系を考える．ここで， $R(s)$ ， $E(s)$ ， $Y(s)$  はそれぞれ，目標値  $r(t)$ ，偏差  $e(t)$ ，制御量  $y(t)$  のラプラス変換を表す．また， $H(s)$  はコントローラの伝達関数を表す．

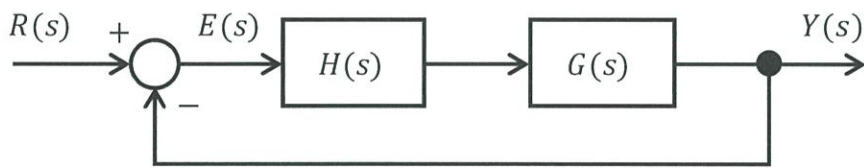


図 2-2

- (3) コントローラが P 制御器の場合を考える．フィードバック制御系が安定限界となるゲイン（限界感度） $K_u$  と，そのときの振動周期（限界周期） $T_u$  を求めよ．
- (4) 設問(3)で求めた  $K_u$  と  $T_u$  を用いて表 2-1 にしたがって PID パラメータを調整する．コントローラが P 制御器の場合における単位ステップ入力 of 目標値  $R(s)$  に対する定常偏差を求めよ．同様に，コントローラが PID 制御器の場合における定常偏差を求めよ．

表 2-1

コントローラ	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P 制御器	$0.5K_u$		
PID 制御器	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.125T_u$

$K_p$ ：比例ゲイン， $T_i$ ：積分時間， $T_d$ ：微分時間



### 問題 3

下記の I, II の両方について解答せよ．なお，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. 送りねじは，おねじを加工したねじ軸とめねじを加工したステージで構成される．ねじ軸が回転したときステージが並進運動するように，ステージの回転が拘束されている．送りねじの設計，加工について，以下の設問に解答せよ．

- (1) おねじとめねじの間には，軸方向に適切な隙間が必要である．隙間が，適切な隙間より大きい場合と，小さい場合について，送りねじの動作時に起こりやすい問題を，それぞれ 30 字程度で述べよ．
- (2) ねじ軸の回転によってステージを動かす場合，通常は，図 3-1 のようにねじ軸 1 本と直動ガイドを組み合わせて用いる．もし，図 3-2 のように 2 組のモータとねじ軸を平行に配置した場合に，送りねじの動作時に起こりやすい問題を，理由とともに 30 字程度で述べよ．
- (3) 金属のねじ軸を加工する方法を 2 つ挙げよ．また，各方法の利点を理由とともにそれぞれ 20 字程度で述べよ．

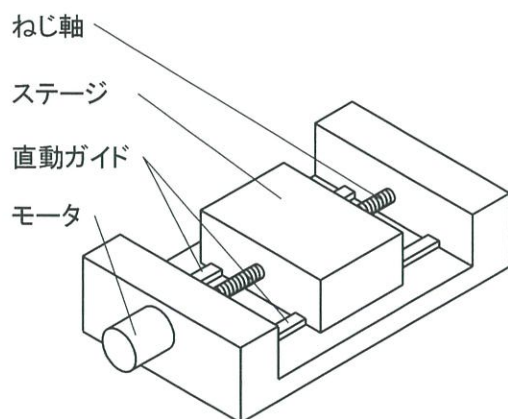


図 3-1

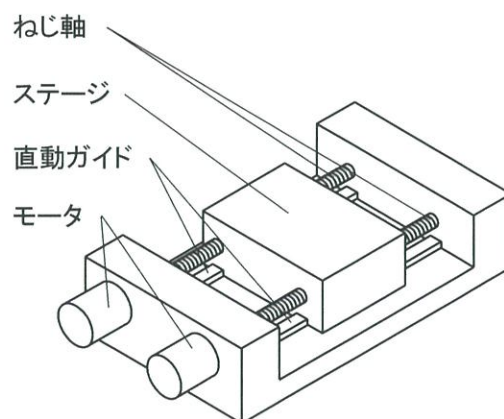


図 3-2

- II. 図 3-3 に示すように，ステージを鉛直方向に上昇させる送りねじを考える．送りねじは，おねじを加工したねじ軸とめねじを加工したステージで構成される．ねじ軸が回転したときステージが並進運動するように，ステージの回転が拘束されている．モータがねじ軸を等速回転させることでステージが等速で上昇する．ねじ軸の有効直径を  $d$ ，リードを  $L$ ，ねじ面の動摩擦係数を  $\mu$  としたとき，リード角  $\beta$  ( $0 < \beta < \frac{\pi}{4}$ )，および摩擦角  $\rho$  ( $\rho > 0$ ) は，それぞれ， $\tan \beta = L/\pi d$ ，および  $\tan \rho = \mu$  で与えられる．ステージの質量を  $m$ ，重力加速度の大きさを  $g$  としたとき，ステージを上昇させるために必要なトルク  $T$  は以下の式で表せる．

$$T = \frac{mgd}{2} \tan(\beta + \rho)$$

このとき，以下の設問に解答せよ．ただし，設問(1)～(4)におけるねじ山形状は，角ねじとする．

- (1) 送りねじの効率  $\eta$  は， $mgL/2\pi T$  で表される． $2\pi T$  と  $mgL$  の意味を，送りねじの効率の観点から，それぞれ 20 字程度で説明せよ．
- (2) ねじ面の摩擦が送りねじの効率に与える影響を，30 字程度で説明せよ．
- (3)  $\eta$  を最大にする  $\beta$  を， $\rho$  のみを用いて示せ．
- (4)  $\eta$  の最大値を  $\tan \beta$  の関数として示せ．
- (5) 角ねじの方が，三角ねじよりも効率がよい．その理由を，ねじ山の角度の観点から 80 字程度で説明せよ．

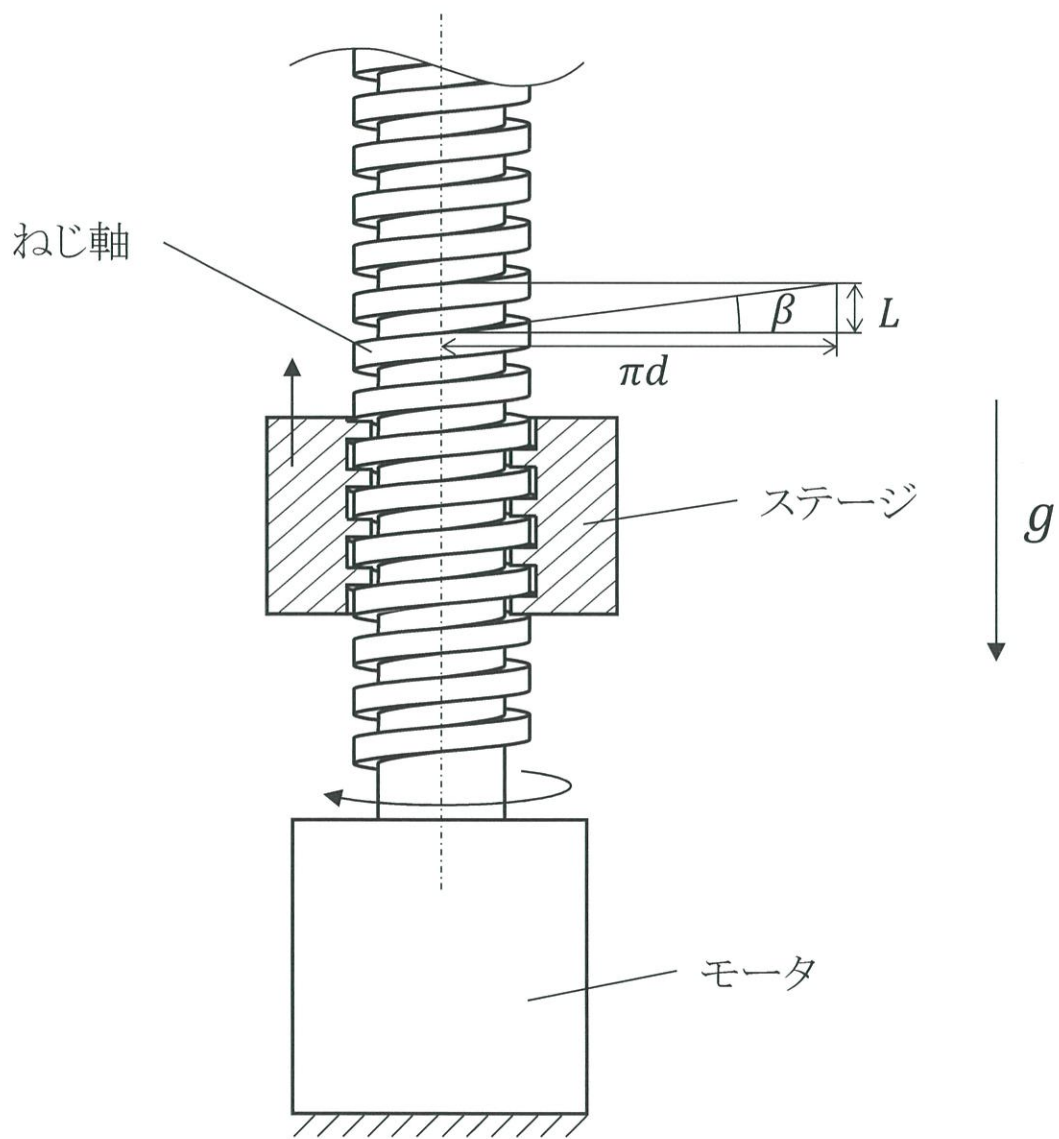


図 3-3

(白紙)

FY2024 Department of Mechanical Engineering

Master Course Program Entrance Examination

“Mechanical Engineering” (Part 2)

2023/8/29 (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 there are Questions I, II and III in a Problem, follow the instruction at the top of the Problem. 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 examinee number (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 or signs that are not related to 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 examinee number (candidate 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.

(Blank)



## Problem 1

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

I. As shown in Figure 1-1, a rectangular plate of dimensions  $30 \text{ mm} \times 30\sqrt{3} \text{ mm}$  is formed by welding two triangular plates. The rectangular plate is subjected to a tensile stress of 20 MPa in the  $x$ -direction and a compressive stress of 10 MPa in the  $y$ -direction. Since the width of the weld line is sufficiently thin and also the weld line has the same Young's modulus and Poisson ratio with those of the two triangular plates, the stress field of the rectangular plate is assumed to be uniform. The Young's modulus, the Poisson ratio, and the thickness of the rectangular plate are 192 GPa, 0.2, and 1 mm, respectively.

- (1) Obtain the inner force vector acting on the weld line.
- (2) Obtain the normal stress acting perpendicular to the weld line.

In the following, consider the case where the same rectangular plate is subjected to the normal stresses  $\sigma_x$  and  $\sigma_y$  and the shear stress  $\sigma_{xy}$ , as shown in Figure 1-2.

- (3) As shown in Figure 1-2, three strain gauges  $a$ ,  $b$  and  $c$  are arranged parallel to the  $x$ -direction,  $y$ -direction and weld line, respectively. The following strains were obtained:  $\varepsilon_a = 1100 \times 10^{-6}$ ,  $\varepsilon_b = 200 \times 10^{-6}$ , and  $\varepsilon_c = 200 \times 10^{-6}$ , respectively. Obtain the values for the stresses  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ , and  $\sigma_{xy}$ .

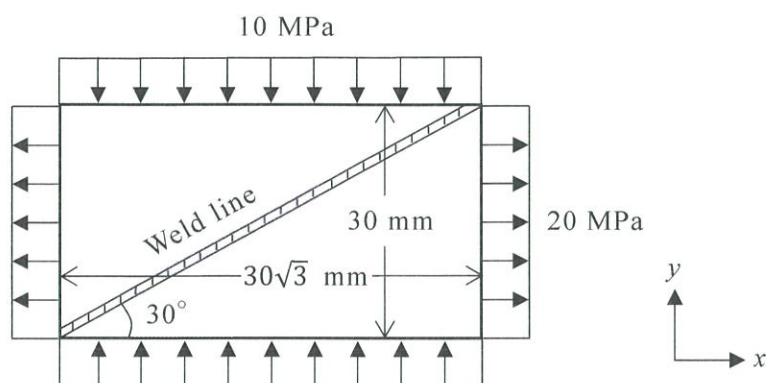


Figure 1-1

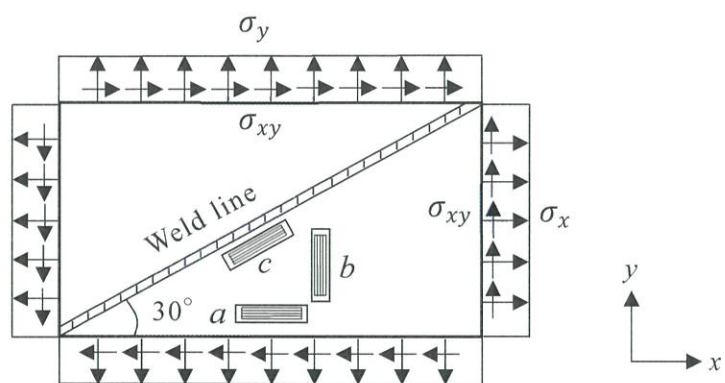


Figure 1-2

II. Answer the following questions concerning a uniform cylindrical solid bar of length  $L$ . The cross-section of the bar is circular with a diameter  $d$ , and the  $d$  is much smaller than the length  $L$  ( $d \ll L$ ). The mass density of the bar and the magnitude of gravitational acceleration are denoted by  $\rho$  and  $g$ , respectively. Regarding the sign of the stress, a tensile stress is given by a positive value.

- (1) As shown in Figure 1-3, the bar is placed on the horizontal floor vertically. Obtain the normal stress on the cross-section at the distance  $x$  from the upper end A.
- (2) As shown in Figure 1-4, the Cartesian coordinate system  $(y, z)$  is defined so that its origin O corresponds to the center of the circular cross-section of the bar. Prove that the area moment of inertia with respect to the  $y$ -axis is  $\pi d^4/64$ .
- (3) As shown in Figure 1-5, the bar is pinned on the horizontal floor at the bottom end B and supported by the smooth vertical wall at the upper end A. The bar is inclined at the angle  $\theta$  ( $\theta > 0$ ) with respect to the horizontal floor. A reaction force at the upper end A from the vertical wall is generated in the horizontal direction. Obtain the magnitude of this reaction force.
- (4) Obtain the bending moment on the cross-section of the bar at the distance  $x = x_0$  from the upper end A, as shown in Figure 1-5.
- (5) Obtain the maximum normal stress on the cross-section of the bar at the distance  $x = x_0$  from the upper end A, as shown in Figure 1-5.

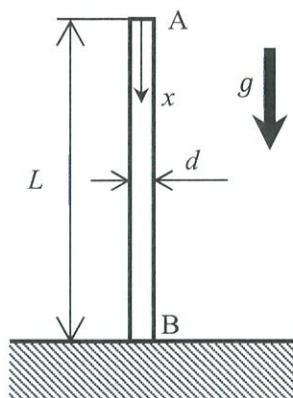


Figure 1-3

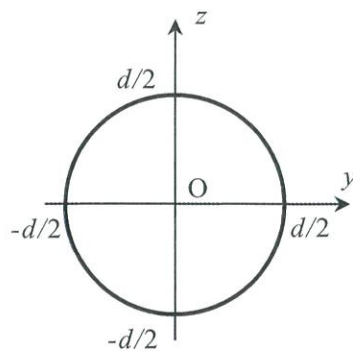


Figure 1-4

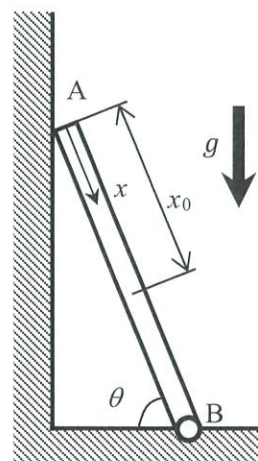


Figure 1-5

## Problem 2

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

I. Consider the single degree-of-freedom system consisting of the mass  $m$ , the spring having a spring constant  $k$ , the viscous damper having the damping coefficient  $c$ , and the immobile table, as shown in Figure 2-1. The mass  $m$  is connected to the immobile table via the spring and the viscous damper. Consider the steady state response of the system when the sinusoidal external force  $F$ , whose amplitude is  $A$  and angular frequency is  $\omega$ , is applied on the mass  $m$  in the vertical direction (the direction of the  $x$ -axis). The displacement of the mass along the  $x$ -axis is represented by  $x$ . The effect of gravity is not considered.

- (1) When the undamped natural angular frequency is  $p$  and the damping ratio is  $\zeta$ , show that the equation of motion of the single degree-of-freedom system can be written as Equation (2-1).

$$\ddot{x} + 2p\zeta\dot{x} + p^2x = \frac{1}{m}F \quad (2-1)$$

You can use  $p$  and  $\zeta$  to answer the following questions.

- (2) Obtain the amplitude of the displacement  $x$ .
- (3) The force  $T$  exerted by the single degree-of-freedom system on the table is expressed by Equation (2-2):

$$T = c\dot{x} + kx \quad (2-2)$$

Obtain the transmissibility (amplitude ratio) of the force  $T$  to the external force  $F$ .

- (4) At a certain angular frequency  $\omega$ , the transmissibility obtained in Question (3) possesses the same value for all values of  $\zeta$ . Find such an angular frequency  $\omega$ .

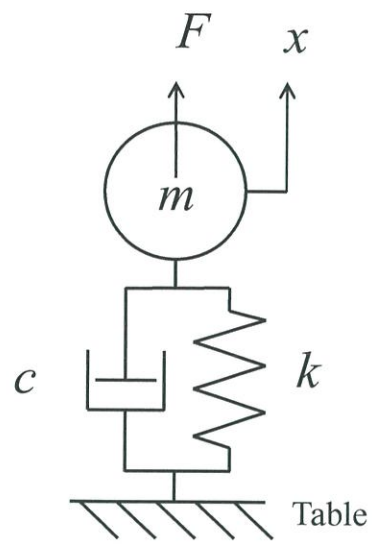


Figure 2-1



II. Consider the parameter tuning of PID controller. Answer the following questions.

Firstly, consider a transfer function  $G_O(s) = \frac{1}{2s+1}$ .

- (1) Find the gain  $|G_O(j\omega)|$  and the phase  $\angle G_O(j\omega)$ .
- (2) Calculate the angular frequency  $\omega$  when the phase  $\angle G_O(j\omega)$  is equal to  $-45$  degrees. Also, draw the gain plot of  $G_O(s)$  using asymptotes.

Next, consider the feedback control system shown in Figure 2-2 for a plant  $G(s) = \frac{1}{(2s+1)^4}$ , where  $R(s)$ ,  $E(s)$  and  $Y(s)$  represent the Laplace transforms of the reference input  $r(t)$ , the control error  $e(t)$  and the controlled variable  $y(t)$ , respectively. The transfer function of the controller is noted  $H(s)$ .

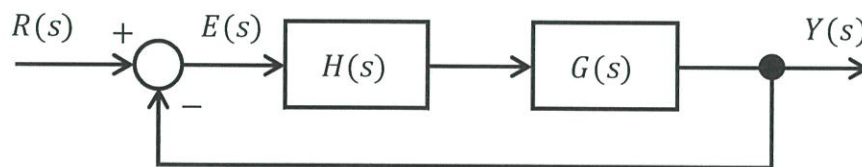


Figure 2-2

- (3) Consider the case where the controller is a P controller. Find the gain (ultimate gain)  $K_u$  attained by the feedback control system at its stability limit and the period of the oscillation (ultimate period)  $T_u$  at the stability limit.
- (4) The PID parameters are tuned according to Table 2-1 using  $K_u$  and  $T_u$  obtained in Question (3). Calculate the steady-state error to the reference input  $R(s)$  having a unit step input in the case where the controller is a P controller. In the same way, calculate the steady-state error in the case where the controller is a PID controller.

Table 2-1

Controller	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P controller	$0.5K_u$		
PID controller	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.125T_u$

$K_p$ : proportional gain,  $T_i$ : integral time,  $T_d$ : derivative time

### Problem 3

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

I. A feed screw consists of a screw shaft with an external thread and a stage with an internal thread. The rotation of the stage is constrained so that the stage moves translationally when the screw shaft rotates. Answer the following questions regarding the design and manufacturing of feed screws.

- (1) A feed screw must have an appropriate clearance in the axial direction between the external thread and the internal thread. Describe the problems likely to occur during the feed screw operation in the following two cases: the clearance is larger and the clearance is smaller than the appropriate clearance, in approximately 20 words, respectively.
- (2) To move the stage of a feed screw, a screw shaft is usually used in combination with linear motion guides, as shown in Figure 3-1. When two pairs of motors and screw shafts are arranged in parallel as shown in Figure 3-2, describe the problems likely to occur during the feed screw operation with reasons, in approximately 20 words.
- (3) Describe two methods of manufacturing metal screw shafts. Explain the advantages of each method with reason, in approximately 15 words, respectively.

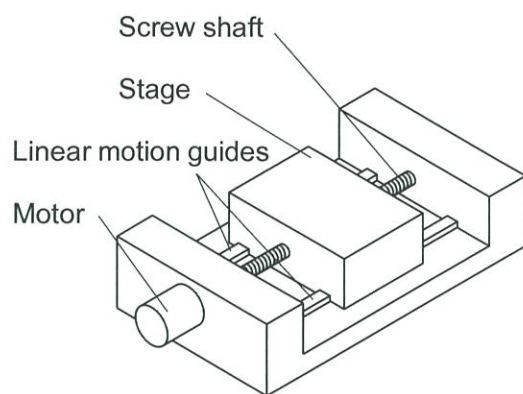


Figure 3-1

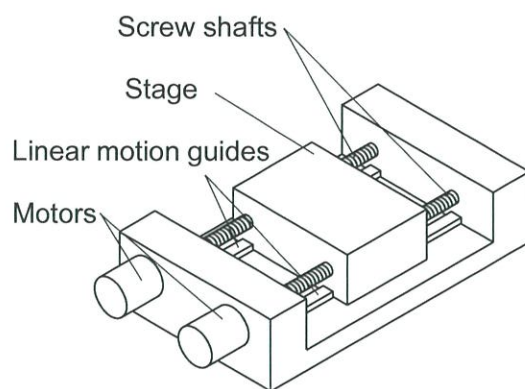


Figure 3-2

II. Consider the feed screw lifting a stage in the vertical direction as shown in Figure 3-3. The feed screw consists of the screw shaft with an external thread and the stage with an internal thread. The rotation of the stage is constrained so that the stage moves translationally when the screw shaft rotates. The motor rotates the screw shaft at a constant speed so that the stage is lifted vertically at a constant speed. When the effective diameter of the feed screw is  $d$ , the lead is  $L$ , and the dynamic friction coefficient of the thread surface is  $\mu$ , the lead angle  $\beta$  ( $0 < \beta < \pi/4$ ) and friction angle  $\rho$  ( $\rho > 0$ ) are expressed as  $\tan \beta = L/\pi d$  and  $\tan \rho = \mu$ , respectively. The torque  $T$  required to lift the stage is given by the following equation:

$$T = \frac{mgd}{2} \tan(\beta + \rho) ,$$

where  $m$  is the mass of the stage, and  $g$  is the magnitude of gravitational acceleration. Answer the following questions. The feed screw in Questions (1)~(4) has a square thread profile.

- (1) The feed screw efficiency  $\eta$  is expressed as  $mgL/2\pi T$ . Explain the meaning of the terms  $2\pi T$  and  $mgL$  from the viewpoint of the feed screw efficiency, using approximately 15 words for each term.
- (2) Explain the effect of the thread surface friction on the feed screw efficiency, using approximately 20 words.
- (3) Obtain an expression for  $\beta$  that maximizes  $\eta$  using only  $\rho$ .
- (4) Obtain the maximum value of  $\eta$  as a function of  $\tan \beta$ .
- (5) Explain why a square-thread screw is more efficient than a triangular-thread screw from the viewpoint of the thread angle, using approximately 50 words.

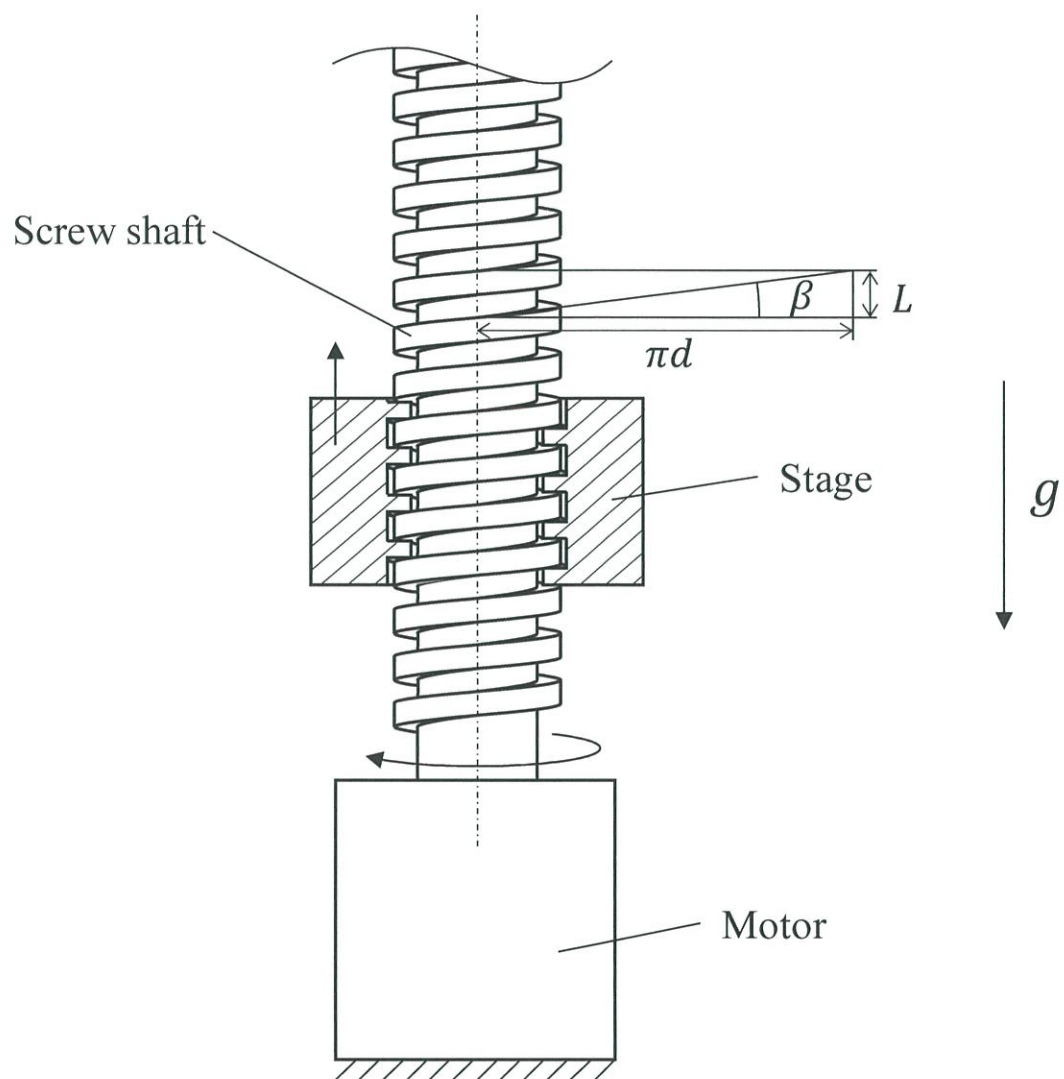


Figure 3-3



(Blank)