2023年度（令和5年度）大学院工学研究科（博士前期課程）

専門試験問題

（電気・機械工学系プログラム　機械工学）

注 意 事 項

1. 試験開始の指示があるまで，この問題冊子を開いてはいけません。
2. 問題は，1ページから7ページまであります。解答用紙は，5枚あります。ページの脱落等に気付いたときは，手をあげて監督者に知らせてください。
3. 下記表の問題を全て解答してください。<u>1題につき解答用紙1枚を使用して</u>解答してください。解答用紙の追加配付はありません。

問題番号	出題科目
19	制御工学
23	力学・材料力学
24	流体力学
25	熱力学
26	生産加工

4. 監督者の指示に従って，問題番号，志望プログラム及び受験番号を5枚の解答用紙の該当欄に必ず記入してください。
5. 計算用紙は，問題冊子の白紙ページを利用してください。
6. 解答用紙の裏にも解答を記入する場合には，表と上下を逆にして記入してください。
7. 机の上には，受験票，黒の鉛筆・シャープペンシル，消しゴム，鉛筆削り及び時計（計時機能だけのもの）以外の物を置くことはできません。
8. コンパス及び定規等は，使用できません。
9. 時計のアラーム（計時機能以外の機能を含む。）は，使用しないでください。
10. スマートフォン，携帯電話，ウェアラブル端末等の音の出る機器を全て机の上に出し，それらの機器のアラームを解除してから，電源を切り，かばん等に入れてください。
11. 試験終了まで退室できません。試験時間中に用がある場合は，手をあげてください。
12. 試験終了後，この問題冊子は持ち帰ってください。

問題 19　制御工学　設問すべてについて解答すること。

Ⅰ　図 1 に示すように，摩擦を無視できる床上で質量M_1の物体 I と質量M_2の物体 II がバネ定数K_2のバネで接続され，さらに物体 I はバネ定数K_1のバネで壁に接続されている。物体 I に加える力を$u(t)$，物体 I の変位を$x_1(t)$，物体 II の変位を$x_2(t)$とするとき，次の（1）～（2）の問いについて答えよ。

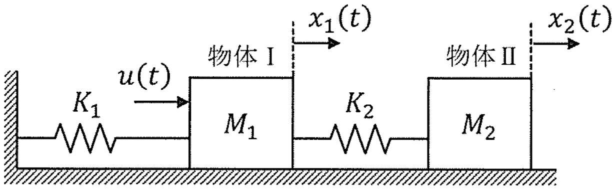


図 1

（1）物体 I と物体 II の運動方程式はそれぞれ次式となる。式中の係数(a, b, c, d, e)を，M_1, M_2, K_1, K_2を適宜用いて表せ。

$$M_1\ddot{x}_1(t) = au(t) + bx_1(t) + cx_2(t)$$

$$M_2\ddot{x}_2(t) = dx_1(t) + ex_2(t)$$

（2）物体 I に加える力$u(t)$を入力，2 つの物体の相対変位$x(t) = x_1(t) - x_2(t)$を出力とするとき，$u(t)$から$x(t)$までの伝達関数$G(s)$は次式となる。式中の係数(f, g, h, i, j)を，M_1, M_2, K_1, K_2を適宜用いて表せ。

$$G(s) = \frac{M_2 s^2}{fs^4 + gs^3 + hs^2 + is + j}$$

Ⅱ　次の（1）～（2）の問いについて答えよ。

（1）一次遅れ系$P(s) = \frac{b}{1+as}$の単位ステップ応答が図 2 に示す波形$y(t)$となった。このときのaとbを求めよ。

（2）一次遅れ系$P(s) = \frac{1}{1+4s}$に PID 制御を施したフィードバック制御系を図 3 に示す。目標値$r(t)$として単位ステップ入力を加えた時の出力が$y(t) = 1 - e^{-t}$となった。このときの PID 制御のゲインK_p，K_i，K_dを求めよ。

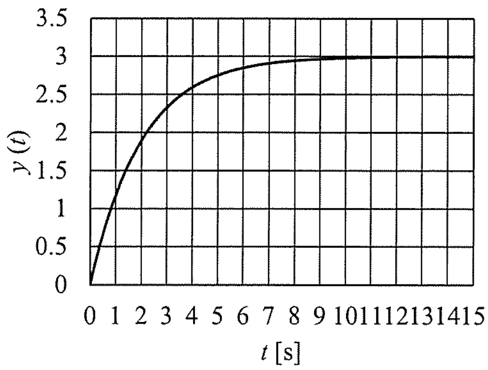


図 2

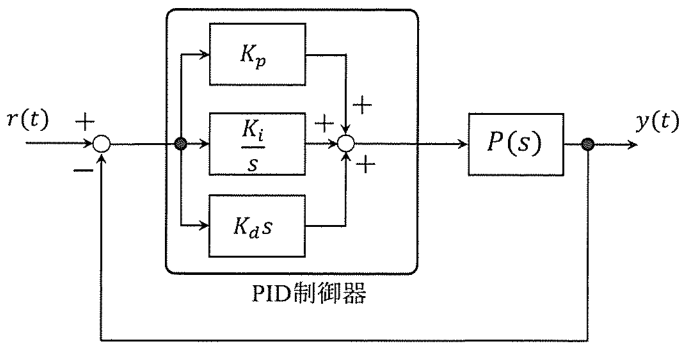


図 3

Ⅲ　次の伝達関数$G(s)$で表されるシステムを考える。Kは実数とする。

$$G(s) = \frac{1}{s^3 + 5s^2 + 8s + K}$$

このシステムの全ての極の実部が-1より小さくなるKの範囲を求めよ。

Ⅳ　図４のフィードバック制御系を考える。また，横軸を対数目盛とした$L(s)$のボード線図が図５の実線，ボード線図の概形図（折れ線近似）が図５の点線で与えられるとする。ただし，ω_1とω_2以外の折れ点角周波数は存在せず，角周波数がω_1からω_2の区間におけるゲイン線図の概形図の値は0 dBであるとする。このとき，目標値 $r(t)$ を

$$r(t) = \begin{cases} t & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases}$$

とした際の定常偏差 $\lim_{t \to \infty} e(t)$ を，ω_1とω_2を適宜用いて求めよ。

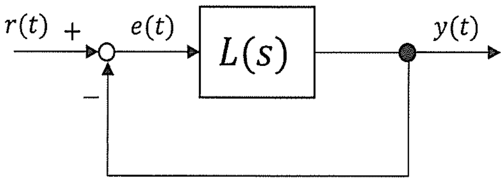


図４

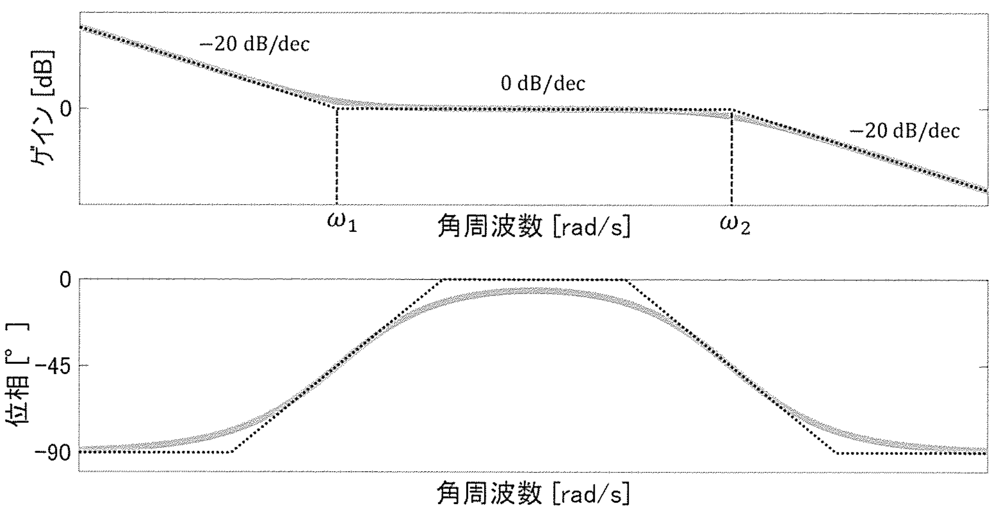


図５

問題 23　力学・材料力学　設問すべてについて解答すること。

Ⅰ　図１に示すように，長さL，質量Mの細長い一様な剛体棒 AB が端点 A でピン支持されている。剛体棒 AB は端点 B で水平方向に対して直角につながれた糸 BC によって水平状態にある。このとき，次の（1）～（7）の問いについて答えよ。ただし，重力加速度をg，剛体棒 AB の重心 G に関する慣性モーメントは$I_G = ML^2/12$で与えられる。

（1）ピン支持点 A に関する剛体棒 AB の慣性モーメントI_{A}を，M，Lを用いて示せ。

（2）図１の実線に示すように剛体棒 AB が平衡状態にあるとき，糸 BC の張力Tを，M，gを用いて示せ。

（3）糸を静かに切り離した後，剛体棒 AB は回転運動を始めた。剛体棒 AB が 90° 回転し図１の点線の位置に到達した。このときの剛体棒 AB の回転角速度ωを，M，g，L，I_{A}を用いて示せ。

図２に示すように，剛体棒 AB が 90° 回転したときの端点 B の位置に静止した質量mの質点がある。質点は回転する剛体棒 AB の端点 B で衝突して剛体棒 AB と合体した。

（4）合体した物体のピン支持点 A に関する慣性モーメントI'_{A}を，I_{A}，m，Lを用いて示せ。

（5）衝突した直後の合体した物体の回転角速度ω'をI_{A}，I'_{A}，ωを用いて示せ。

（6）合体した物体の重心 G′ とピン支持点 A との距離$L_{\mathrm{AG'}}$をM，m，Lを用いて示せ。

（7）合体した物体は角度θで回転角速度が 0 になった。このときの角度θをI'_{A}，ω'，$L_{\mathrm{AG'}}$，m，M，gを用いて示せ。

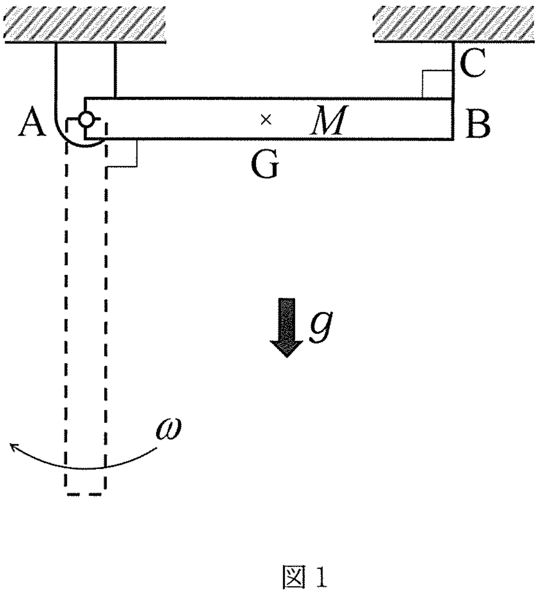


図１

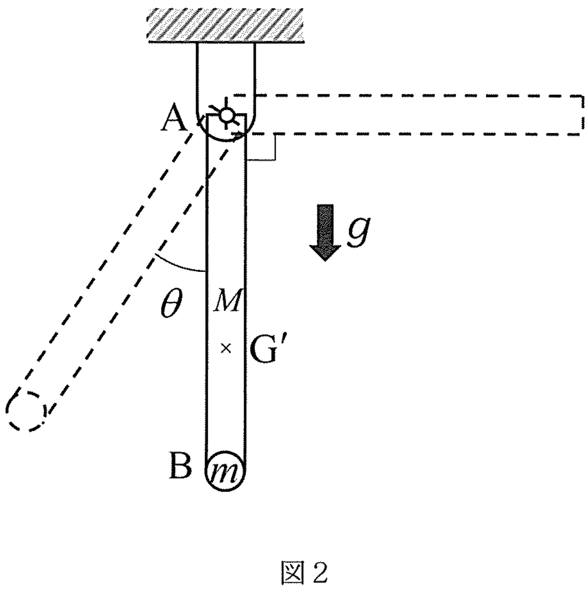


図２

Ⅱ　図３のように，長さ L_1+L_2 の一様な真直はり AB があり，A にて剛体壁に固定されている。固定端 A の図心を原点とし，はりの長軸方向に沿って x 軸，鉛直方向下向きに y 軸，右手直交座標系に z 軸をとる。はりの断面は図４に示すように矩形であり，幅 b，高さ h である。また，$(x, y, z) = (L_1, 0, 0)$ の位置 C には，y 軸方向からの角度 $\theta = \pi/3$ で図の示す向きかつ x-y 面内に，大きさ $2W$ の集中荷重が加えられている。このとき，以下の設問すべてに答えよ。なお，はりの縦弾性係数 E，断面２次モーメント I とする。

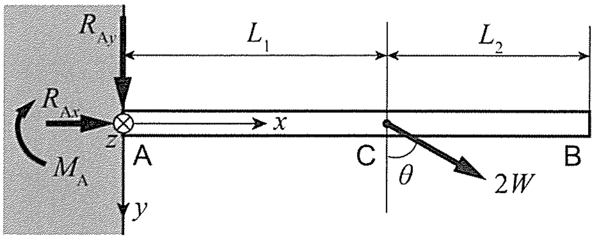


図３

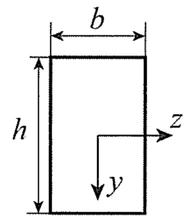


図４

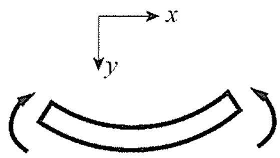


図５

（１）　固定端 A での，壁からはりの横断面に作用する x 軸方向の反力 R_{Ax}，y 軸方向の反力 R_{Ay}，曲げモーメント M_A をそれぞれ求めよ。なお，いずれも図３に示す方向が正である。

（２）　位置 x の断面での曲げモーメント $M(x)$を求め，曲げモーメント線図を描け。ただし，図５のように，はりを下に凸に曲げるモーメントを正とする。

（３）　区間 AC の x 軸に垂直な断面について，平均せん断応力 τ_{AC} と，垂直応力の最大値 σ_{AC} をそれぞれ求めよ。また，区間 CB の x 軸に垂直な断面について，平均せん断応力 τ_{CB} と，垂直応力の最大値 σ_{CB} もそれぞれ求めよ。なお，垂直応力は，引張を正，圧縮を負として答えよ。

（４）　区間 AC 内において，x 軸に垂直な断面の図心 ($y = z = 0$) でのせん断応力は，その断面の平均せん断応力 τ_{AC} の 1.5 倍である。このとき，区間 AC 内の図心でのせん断応力が最大となる面の方向 (その面の法線と x 軸のなす角の大きさ α) と，そのせん断応力 τ_{max} を求めよ。

（５）　自由端 B での y 軸方向変位 y_B を求めよ。なお，軸力によるはりの伸びはたわみに比べて小さく無視できる。また，図６に示すように，長さ L の片持ちはりの自由端 B'に集中荷重 F が加えられたとき，自由端での y 軸方向変位は $FL^3/(3EI)$，たわみ角は $FL^2/(2EI)$であることを用いてよい。

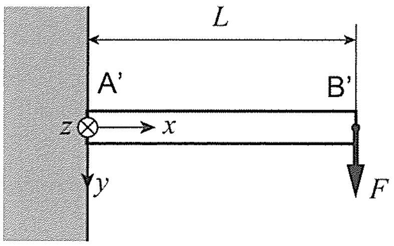


図６

問題 24　流体力学　設問すべてについて解答すること。

解答上の注意：各設問の解答について，<u>（1）$x=y+z$</u> のように，最終的な解答に設問番号を付して下線で明記すること。

図１のように，長さ L（OC 間）で狭いすき間 h の鉛直流路が, 十分に大きな上部タンク A と下部タンク B をつないでいる。タンク A とタンク B にはそれぞれ水深 d_A と水深 d_B の水が入っているが, この状態では重力の影響でタンク A からタンク B へ水が流出する。流出流量を制御するため，流路の片側をベルトにして速度 U_b で上向きに動かす。このすき間内の流れを解析するため，基礎式として２次元非圧縮性流体の連続の式と Navier-Stokes（NS）式を用いる。

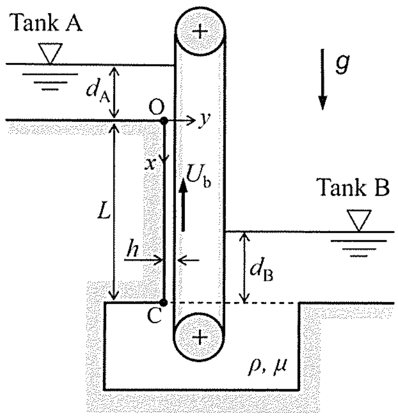


図１

- $\dfrac{\partial u}{\partial x} +$ ① $= 0$
- $\rho\left(\dfrac{\partial u}{\partial t} + u\dfrac{\partial u}{\partial x} + \text{②}\right) = -\dfrac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\text{③} + \dfrac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) + \rho g$
- $\rho\left(\dfrac{\partial v}{\partial t} + \text{④} + v\dfrac{\partial v}{\partial y}\right) = -\dfrac{\partial p}{\partial y} + \mu\left(\dfrac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \text{⑤}\right)$

ただし図１に示されるとおり，狭い隙間の上部角部を原点 O とし，壁面に沿って下方に x 座標，これと直交する隙間方向に y 座標をとる。また，x と y 方向の速度成分をそれぞれ u と v，圧力を p とする。水の密度と粘度はそれぞれ ρ と μ，重力加速度は g とし，これらは定数とする。

これについて，次の（１）～（５）の設問に答えよ。ただし（３）以降において，狭いすき間内の流れは定常で全域で完全発達しており，入口と出口の影響は無視できるものと仮定する。

（１）①～⑤に入るものを示し，基礎式を完成せよ。

（２）粘度 μ の次元を SI の基本単位（kg，m，s）を用いて示せ。

（３）この狭いすき間内の流れでは，連続の式，NS 式の y 方向成分，定常（$\dfrac{\partial u}{\partial t} = \dfrac{\partial v}{\partial t} = \dfrac{\partial p}{\partial t} = 0$），完全発達（$\dfrac{\partial u}{\partial x} = \dfrac{\partial v}{\partial x} = 0$），および壁面境界条件（滑り無し，不浸透）から，$y$ 方向速度成分 $v = 0$ および圧力 $p(x)$ を得る。これらの条件と NS 式の x 方向成分から，速度 $u(y)$ に対する常微分方程式を導出して示せ。

（４）圧力勾配 dp/dx を定数とし，また $y = 0$ で $u = 0$ と $y = h$ で $u = -U_b$ の壁面境界条件も用いて（３）で導出した常微分方程式を解き，すき間内の速度 $u(y)$ の解を示せ。

（５）設問の設定では静圧の条件から流路内で $dp/dx = \rho g(d_B - d_A)/L$ となる。これも用い，流出流量をゼロとするためのベルト速度 U_b の条件式を示せ。

問題25　熱力学　次の（1）～（7）の問いについて答えよ。

「ブレイトン再生サイクル（regenerative Brayton cycle)」では，タービン排ガスを熱源として加圧空気を予熱する「再生器」を使って，基本ブレイトンサイクルより高い熱効率が得られている。図1に構成を，図2に温度－比エントロピー線図を示す。「ブレイトン再生サイクル 1-2-2′-3-4-4′-1」の理論熱効率 η_{th} を，以下の手順で求めよ。

作動流体（理想気体）の状態量については，以下の記号を用い，添え字には各状態の数字を添えよ。絶対温度：T，圧力：p，比エンタルピー：h，比エントロピー：s

また，燃料の量は無視し，作動流体の定容（定積）比熱：c_v，定圧比熱：c_p および 比熱比：κ は，一定であるとする。

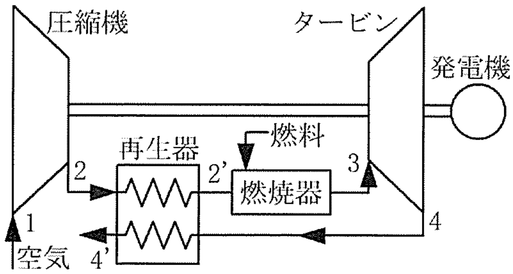


図1

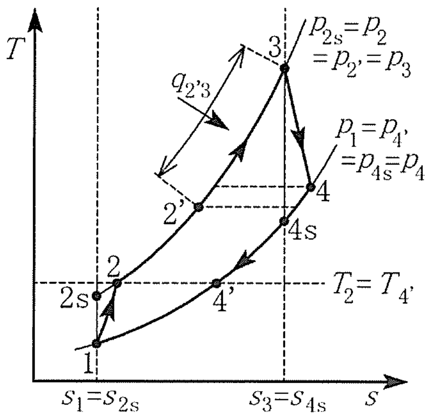


図2

サイクルの諸元は以下のように表す。

- 圧力比：$r_p = p_{2s}/p_1 = p_3/p_{4s}$
- 断熱温度比：$\theta_s = T_{2s}/T_1$
- 最高最低温度比：$\tau = T_3/T_1$
- 圧縮機の断熱効率：$\eta_c = (h_{2s}-h_1)/(h_2-h_1)$
  $= (T_{2s}-T_1)/(T_2-T_1)$
- タービンの断熱効率：$\eta_t = (h_3-h_4)/(h_3-h_{4s})$
  $= (T_3-T_4)/(T_3-T_{4s})$
- 再生効率：$\eta_e = (h_{2'}-h_2)/(h_4-h_2) = (T_{2'}-T_2)/(T_4-T_2)$

（1）断熱温度比 θ_s を，r_p および κ で表せ。

（2）温度 T_2 を，T_1，θ_s および η_c で表せ。

（3）作動流体単位質量あたりの圧縮仕事（作動流体が圧縮機から受ける仕事）w_c を，c_p，c_v，T_1，θ_s および η_c の中から必要なものを選んで用いて表せ。

（4）温度 T_4 を，T_1，θ_s，τ および η_t で表せ。

（5）作動流体単位質量あたりの正味仕事 w を，c_p，c_v，T_1，θ_s，τ，η_c および η_t の中から必要なものを選んで用いて表せ。

（6）作動流体単位質量あたりの加熱量 $q_{2'3}$ を，c_p，c_v，T_1，θ_s，τ，η_c，η_t および η_e の中から必要なものを選んで用いて表せ。

（7）理論熱効率 η_{th} を，c_p，c_v，θ_s，τ，η_c，η_t および η_e の中から必要なものを選んで用いて表せ。

問題 26　生産加工

Ⅰ　次の（1）～（4）の問いについて答えよ。（3）（4）の解答の際は問題文中で使用された文字以外を使用しないこと。

（1）　ある合金系のある温度での組成と自由エネルギーの曲線を図 1 に示す。この合金系の状態図の型の名称を記し，さらにその状態図（横軸：組成 － 縦軸：温度）の模式図を描け。

（2）金属材料の強化法を２つ挙げよ。さらにそれらに共通するメカニズムを述べよ。

（3）降伏点が Y [Pa] の板材（長さ l [m]，幅 w [m]，厚さ t [m]，$w >> t$）を図 2 (a) のように長さが板幅より十分長く，幅が b [m] の工具を用いて圧縮したところ，圧縮荷重が N_0 [N] の時に板材は降伏した。板材の降伏は Mises の降伏条件に従うとして N_0 を求め，この応力状態に対応するモール円を示せ。

（4）図 2 (b) のように板材の長手方向（l の方向）へ張力 T [N] で引張りながら圧縮したところ，圧縮荷重が N_1 [N] の時に板材は降伏した。この時の応力状態は図 3 に示すブロックの応力状態と同じであった。N_1 と T を求め，対応するモール円を示せ。

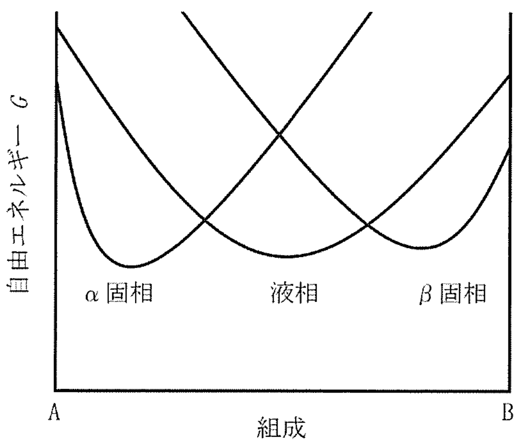


図 1

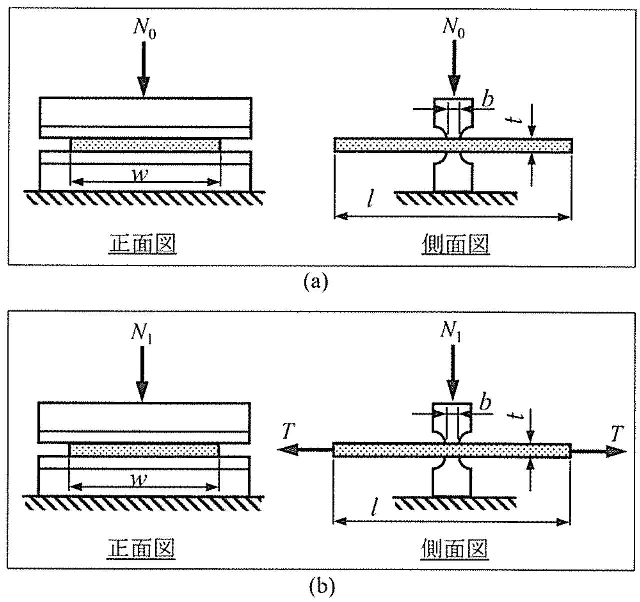
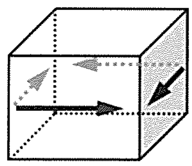


図 2



$\tau = Y/\sqrt{3}$

図 3