

2027 年度（令和 9 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 機械工学プログラム）

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 8 ページまであります。解答用紙は、6 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。各問題につき問題文内で指定された解答用紙 1 枚を使用して解答してください。 解答用紙の追加配付はありません。

問題番号	出題科目
21	熱力学・流体力学
22	力学・材料力学
23	制御工学B

4. 監督者の指示に従って、志望プログラム及び受験番号を 6 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 2 1 熱力学・流体力学

設問すべてについて解答すること。

I 次の (1) ～ (11) の問いについて答えよ。解答用紙「2 1 -I」に解答すること。また、各設問について、たとえば、(1) $x=y+1$ のように、最終的な解答に設問の番号を付して下線で明示すること。

図 1 に系統図を示す西名古屋火力発電所の 7-1 号系列は、ガスタービン (ブレイトンサイクル) 3 台と、排熱回収ボイラー 3 台により回収されたガスタービンからの排熱を熱源とする蒸気タービン (ランキンサイクル) 1 台により構成される。系列全体の定格出力は約 120 万 kW であり、2018 年、世界最高熱効率 (低位発熱量基準で 63.08%) のコンバインドサイクル発電設備としてギネス世界記録に認定された。

- (1) このコンバインドサイクル発電設備が、燃料をメタン CH_4 (低位発熱量 50.0 MJ/kg) として、定格出力 120 万 kW、熱効率 63.0% (低位発熱量基準) で連続操作するとき、1 年間 ($=3.15 \times 10^7$ 秒) に使用する燃料の質量 (トン) を有効数字 3 桁で算出せよ。
- (2) (1) で、1 年間に排出される二酸化炭素の質量 (トン) を有効数字 3 桁で算出せよ。ただしメタンの燃焼反応式は $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ であり、16.0 g の CH_4 から 44.0 g の CO_2 が生成される。

図 1 のガスタービン (ブレイトンサイクル) の熱効率について考える。ガスタービンの作動条件を以下に示す。圧縮機内およびタービン内では可逆断熱変化が行われる。作動流体 (比熱比 κ 、気体定数 R 、定圧比熱 c_p) の状態量 (圧力、比体積、温度、比エントロピー) は、圧縮機入口 1 で (p_1, v_1, T_1, s_1)、圧縮機出口 2 で (p_2, v_2, T_2, s_2)、タービン入口 3 で (p_3, v_3, T_3, s_3)、タービン出口 4 で ($p_4 (=p_1), v_4, T_4, s_4$) とする。圧力比 r は $r = p_2/p_1 = p_3/p_4$ である。

- (3) 熱サイクル 1-2-3-4-1 の T - s 線図を描け。ただし、横軸は比エントロピー s 、縦軸は温度 T とする。
- (4) T_2 を κ, r および T_1 を用いて表せ。
- (5) 圧縮機での圧縮に必要な作動流体単位質量当たりの仕事 $W_c (= \int_1^2 v dp)$ を κ, R, T_1 および T_2 で表せ。
- (6) 燃焼器での等圧加熱過程における作動流体単位質量当たりの加熱量 q_H を、 c_p, T_2 および T_3 で表せ。
- (7) タービン出口 4 での作動流体の温度 T_4 を、 κ, r および T_3 を用いて表せ。
- (8) 作動流体が、タービン出口の状態から等圧冷却され圧縮機入口の状態に戻るとき、作動流体単位質量当たりの放熱量 $q_L (> 0)$ を、 c_p, T_1 および T_4 を用いて表せ。
- (9) このガスタービンの熱効率 η_G を、 r と κ を用いて表せ。

このコンバインドサイクルの総合効率について考える。

- (10) 蒸気タービン (ランキンサイクル) への作動流体単位質量当たりの加熱量 q_s を、 q_H, η_G および排熱回収ボイラーのガスタービン排気からの熱回収の効率 η_R で表せ。
- (11) 蒸気タービン (ランキンサイクル) の熱効率を η_s とするとき、総合効率 η を、 η_G, η_R および η_s を用いて表せ。

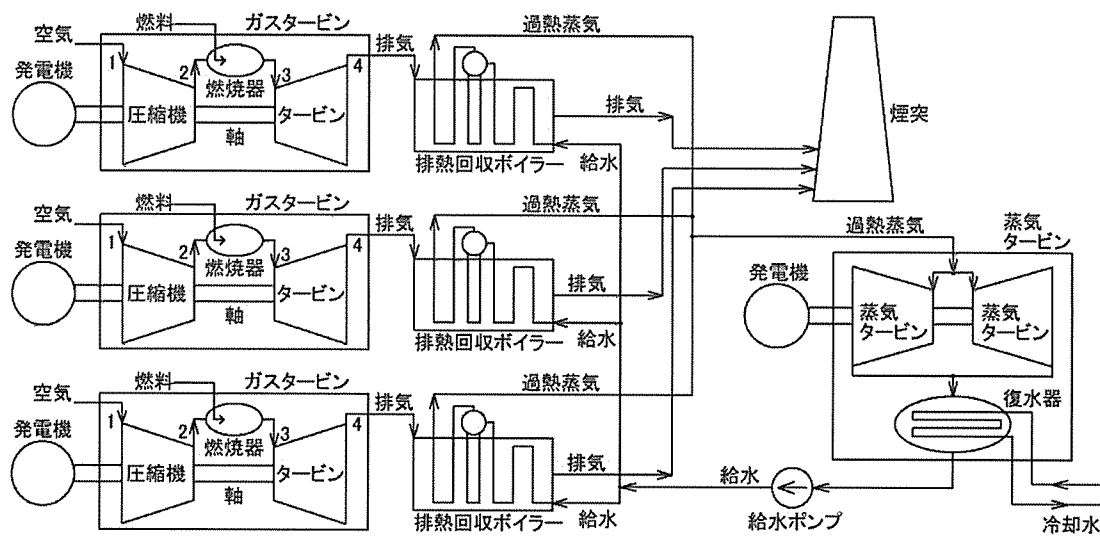


図1 西名古屋火力発電所の7-1号系列のコンバインドサイクルの系統図

Ⅱ 次の(1)～(5)の問いについて答えよ。解答用紙「2 1－Ⅱ」に解答すること。また、各設問について、たとえば、(1) $x=y+z$ のように、最終的な解答に設問の番号を付して下線で明示すること。

デカルト座標系 (x, y) の x および y 方向の速度成分が $u = +\frac{y}{b^2}$ および $v = -\frac{x}{a^2}$ でそれぞれ与えられる2次元定常流(ただし b と a は定数)について、以下の設問に答えよ。ただし、最終的な解答に u と v は使用しないこと。また、円周率が必要なら π とせよ。

(1) 加速度ベクトルの x 方向成分 a_x をできるだけ簡潔な形で表せ。

(2) 渦度 ζ (右手系で x 軸と y 軸に直交する z 軸まわりの成分) をできるだけ簡潔な形で表せ。

(3) 座標原点を中心として半径 a の円に沿った循環 Γ をできるだけ簡潔な形で表せ。ただし、循環は反時計まわりを正とする。

(4) 点 $(x = a, y = 0)$ を通る流線の式をできるだけ簡潔な形で表せ。

(5) 初期に $d\mathbf{r} = (dx, dy)$ であった流体線要素が流れに乗って単位時間後に $d\mathbf{r}' = (dx', dy')$ へと変形した。この場合、流体線要素の y 方向変形量 $(dy' - dy)$ をできるだけ簡潔な形で表せ。

問題 2 2 力学・材料力学

I 次の(1)～(6)の問いについて答えよ。解答用紙「2 2－I」に解答すること。

図1に示すように、密度が一様な薄い円板(質量 M , 半径 R)に、質量が無視できる伸び縮みしない細い糸が巻き付けられている。円板は糸に沿って滑らずに転がるものとする。円板ははじめ静止しており、静かに落下を開始した。糸の上端は天井に固定され、糸は壁に沿って常に鉛直に張られた状態を維持しているため、円板の重心 G は鉛直方向のみに運動するものとする。なお、円板は糸にのみ接している。このとき、次の問いに答えよ。ただし、重力加速度の大きさを g 、円板の重心 G の速度の y 成分を v 、加速度の y 成分を a 、角速度を ω 、角加速度を α 、糸の張力を T とする。また、図1のように鉛直下向きに y 軸となる座標系をとる。

- (1) 円板の重心 G に対する慣性モーメントが $I_G = \frac{1}{2}MR^2$ であることを示せ。
- (2) 円板と糸の接点 A を通る円板面に垂直な軸まわりの慣性モーメント I_A を求めよ。 I_G を用いてもよい。
- (3) 円板の落下開始直後における、円板の y 方向の並進の運動方程式と、重心 G まわりの回転の運動方程式を示せ。 I_A , I_G を用いてもよい。
- (4) 円板が糸の上を滑らずに接点 A まわりに転がっているとき、 a , α , R の関係を示せ。
- (5) 糸の張力 T と円板の角加速度 α の大きさを求めよ。 I_A , I_G を用いてもよい。ただし、 a は用いないこと。
- (6) 力学的エネルギー保存則を用いて、円板がちょうど1回転した瞬間の、重心 G の速さ v と角速度 ω の大きさを求めよ。 I_A , I_G を用いてもよい。

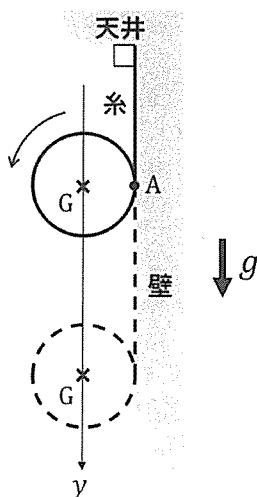


図1

II 設問すべてに解答すること。解答用紙「22-II」に解答すること。最終的な解答に下線で明示すること。

図2に示すように、左端Aが単純支持、右端Bが固定、長さが L であるはりがある。はりの断面は軸方向に対して一定で、材料は均質である。はりには、大きさ w [N/m]の等分布荷重が下向きに作用している。ここに、はりの左端Aを原点とし、B向きに正方向を有する x 軸を、それに直交し、下向きに正方向を有する y 軸を定義する。左端Aでの支点反力の大きさを R_A 、右端Bでの支点反力の大きさを R_B 、右端Bで壁からはりに作用する曲げモーメントを M_B とすると、以下の問いに答えよ。ただし、(1)～(4)の最終解答には、 R_A 、 R_B 、 M_B を使用してよい。はりの自重は無視してよく、変形は微小であると仮定する。せん断力 F および曲げモーメント M の正方向は図3に示す通りである。

- (1) はり全体における力のつり合いを表す式を示せ。
- (2) 左端Aを支点とすると、はり全体におけるモーメントのつり合いを表す式を示せ。
- (3) 位置 x における曲げモーメント $M(x)$ を表せ。
- (4) はりの曲げ剛性を EI とすると、曲率 d^2y/dx^2 を、 EI 、 R_A 、 w 、 x で表せ。
- (5) 反力 R_A を w および L により表せ。
- (6) 曲げモーメント M_B を w および L により表せ。
- (7) 曲げ応力の説明として、以下の①～③にあてはまる最も適切な言葉を記号A)～D)から選べ。
曲げ応力とは、はりや棒材が曲げモーメントを受けて曲がるとき、部材の軸方向に垂直な断面内に生じる□①□のことである。曲げ応力の大きさは、□②□の大きさに比例し、□③□の大きさに反比例する。

①の選択肢：

A) 垂直応力、B) せん断応力、C) 圧力、D) 主応力

②の選択肢：

A) 原点からの距離、B) 曲げ剛性、C) 引張剛性、D) 中立面（中立軸）からの距離

③の選択肢：

A) 断面積、B) 断面一次モーメント、C) 断面二次モーメント、D) 断面二次極モーメント

- (8) 曲げ応力の大きさが最大となる位置 x を求めよ。

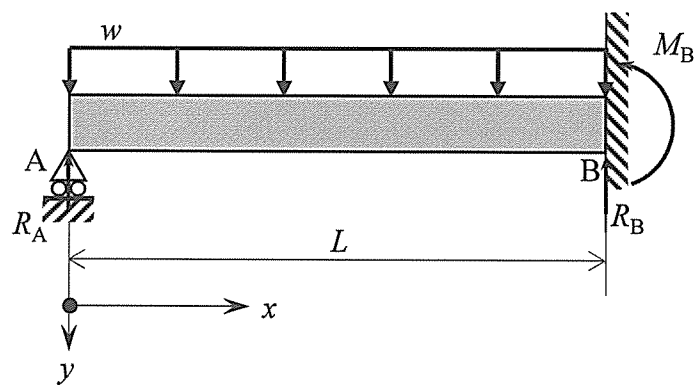


图 2

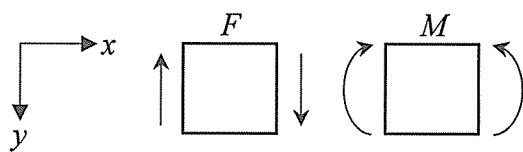


图 3

III 解答用紙「22-III」に解答すること。以下、炭素含有量は質量%，鉄鋼組織では質量分率＝体積分率である。また、 $\sqrt{2}$ 、 $\sqrt{3}$ の値が必要なときは $\sqrt{2} = 1.41$ 、 $\sqrt{3} = 1.73$ を用いること。

炭素含有量 0.40 % の鉄鋼材料 A と炭素含有量 0.77 % の鉄鋼材料 B がある。いずれもオーステナイト単相域まで加熱した後、室温まで徐冷した。下記の (1) ～ (8) の問いに答えよ。ただし、鉄－炭素系の状態図のフェライト中の炭素固溶限は 0.022 %、共析組成は 0.77 %、セメンタイトの炭素含有量は 6.69 % とする。また、鉄鋼材料の初期降伏応力は組織の体積分率に基づく単純線形混合近似が成立するものとする。例えば、組織 α の初期降伏応力が σ_α [MPa]、その体積分率が ρ_α 、組織 β の初期降伏応力が σ_β [MPa]、その体積分率が ρ_β のとき初期降伏応力 σ_{Y0} は、

$$\sigma_{Y0} = \rho_\alpha \sigma_\alpha + \rho_\beta \sigma_\beta$$

で見積もることができることとする。

- (1) 鉄鋼材料 A および鉄鋼材料 B は、それぞれ、亜共析鋼、共析鋼、過共析鋼のいずれに分類されるか答えよ。
- (2) 鉄鋼材料 A の冷却中、共析温度に達する直前に現れる初析相の名称を答えよ。また、共析温度直下の組織名称を全て答えよ。
- (3) 鉄鋼材料 A について、この法則を用いて初析フェライトの体積分率とパーライトの体積分率を求めよ。
- (4) 鉄鋼材料 A の室温組織に含まれる全フェライト量の体積分率を求めよ。
- (5) 鉄鋼材料 B の初期降伏応力 σ_{YB} は 700 MPa であった。初析フェライトの初期降伏応力 $\sigma_{Y\alpha}$ を 180 MPa として鉄鋼材料 A の初期降伏応力を求めよ。
- (6) 鉄鋼材料 A に均一な応力状態を維持しながら外力を負荷した。ある時点で材料の主応力状態が $\sigma_1 = 300$ MPa、 $\sigma_2 = 40$ MPa、 $\sigma_3 = -220$ MPa であった。この状態で鉄鋼材料 A は初期降伏するか判定せよ。ただし降伏は Mises の降伏条件に従うものとする。
- (7) 主応力方向の塑性ひずみ増分比 $d\varepsilon_1^p : d\varepsilon_2^p : d\varepsilon_3^p$ を求めよ。
- (8) 相当塑性ひずみ増分 $d\bar{\varepsilon}^p$ が 0.002 のとき、 $d\varepsilon_1^p$ 、 $d\varepsilon_2^p$ 、 $d\varepsilon_3^p$ を求めよ。

問題 2 3 制御工学B

設問すべてについて解答すること。解答用紙「2 3」に解答すること。ただし、 t は時刻とする。

I 図 1 のフィードバック制御系について以下の問いに答えよ。ただし、 K は実数とする。

- (1) $r(t)$ から $y(t)$ までの伝達関数 $G_{yr}(s)$ を求めよ。ただし、必要ならば K を用いてよい。
- (2) 伝達関数 $G_{yr}(s)$ の減衰係数が 0.5 となる K の値と、そのときの固有角周波数 ω_n を求めよ。
- (3) $K = 9$ とし、 $r(t) = \sin \omega t$ に対する定常応答を、実数 A 、 ω 、 ϕ を用いて $y(t) = A \times \sin(\omega t + \phi)$ と表す。このとき、 A が最大となる ω と、そのときの A を求めよ。

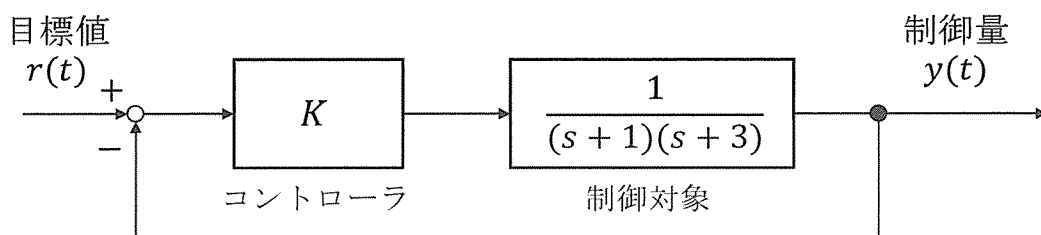


図 1

II 次の伝達関数 $H(s)$ で与えられるシステムを考える。

$$H(s) = \frac{2}{s^3 + 4s^2 + 9s + K + 5}$$

ただし、 K は正の実数とする。

- (1) このシステムに単位ステップ関数を入力したとき、出力 $y(t)$ が一定値に収束するための K の範囲を求めよ。また、このときの $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t)$ を K を用いて表せ。
- (2) 伝達関数 $H(s)$ のすべての極の実部が -1 未満となる K の範囲を求めよ。