平成２６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１部）

試験日時：平成２５年８月２７日（火）　９：００～１１：００

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２まである．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４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．
5．１問ごとに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１部）」と記入すること．答案用紙の右端にある「枚／枚中」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２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，２枚全部を提出すること．
11．問題冊子は持ち帰ってよい．

問題　1

下記のⅠ，Ⅱの両方について解答せよ．

Ⅰ．理論サイクルが図 1-1 に示すオットーサイクルの $P-V$ 線図で表すことができる，4 サイクル内燃機関について以下の問いに答えよ．ただし，シリンダ内のガスは理想気体であり，圧力 P と容積 V の下付き文字は，図 1-1 中の番号で示す熱力学的状態に対応する．

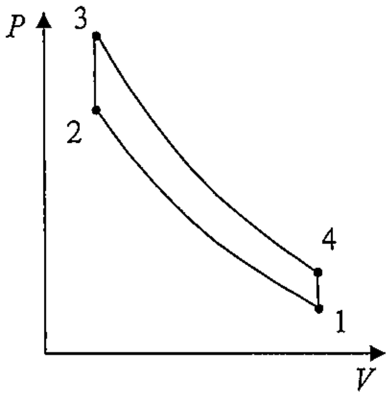


図 1-1

(1) 作動ガスの比熱比 κ が一定である場合のオットーサイクルの理論熱効率を，P_1，P_2，P_3，P_4，V_1，V_2，V_3，V_4，κ のうちから必要な記号を用いて示せ．

(2) この内燃機関の $T-S$ 線図を図 1-1 中の番号に対応させて描け．また，内燃機関の行程，a)燃焼前のガスの圧縮，b)点火・燃焼，c)燃焼後のガスの膨張，と図 1-1 中の番号で示される状態の変化との対応を示せ．

(3) このサイクルが膨張過程で外界になす仕事を，P_3，V_3，V_4 とシリンダ内の燃焼ガスの比熱比 κ を用いて求めよ．なお，導出過程を示すこと．

(4) このサイクルの膨張過程が，断熱状態で PV^n＝一定（$n<\kappa$）のポリトロープ変化で記述できる不可逆変化であったときの損失（仕事に変化せずに内部エネルギーになった熱）を，導出の過程と共に P_3，V_3，V_4，κ，n を用いて示せ．また，この膨張過程をオットーサイクルの $P-V$ 線図上

に破線で示せ．ただし，損失のある膨張過程の初期温度は，損失のない場合の初期温度と等しいとする．

この内燃機関の点火･燃焼過程において，シリンダ内がモル比 $1:(3m+1)/2$ のアルカン系燃料ガス C_mH_{2m+2} と酸素 O_2 の混合ガスで満たされ，以下に示す化学反応式に従って断熱的に完全燃焼をしたものとする．

$$C_mH_{2m+2} + \frac{3m+1}{2}O_2 \rightarrow mCO_2 + (m+1)H_2O$$

(5) 酸素の比熱比を分子運動の自由度から求めよ．なお，温度は十分に低いこととする．

(6) この内燃機関で吸入する混合ガスの全モル数を変えずに，燃料ガスの量を減らし，酸素の量を増やした場合，熱効率はどのように変化するか．また，その理由を記せ．

II. 図 1-2 のように，幾何学的形状および物性が等しい 2 つの基板が平行に置かれており，その間の高さ H の流路に定常的に水を流して冷却する．ここで，流路の入口と出口の圧力差を ΔP とする．また，基板の幅 W は長さ L に比べて十分に長く，流れは 2 次元層流と見なせる．なお，基板の熱伝導率が高いため，その表面温度 T_w は基板の長さ方向の位置 x によらず一定である．水の密度 ρ，比熱 c_p，熱拡散率（温度伝導率）α，粘性係数 μ の温度依存性は無視できるとする．

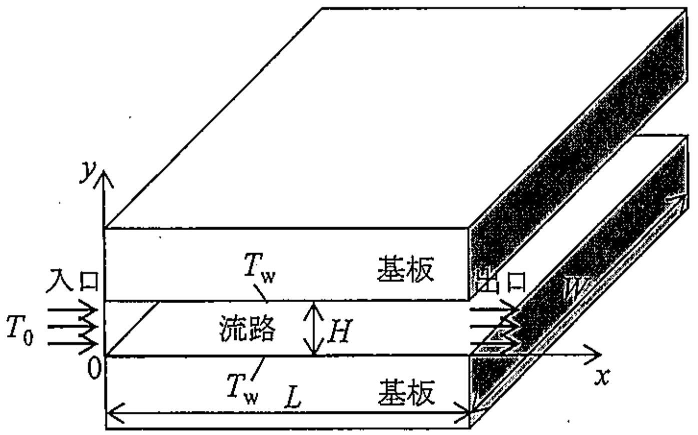


図 1-2

(1) 流路内の速度場および温度場が完全に発達していると見なして，以下の設問に答えよ．

1. 流路断面内の水の平均温度を $T_m(x)$ とするとき，

$$\frac{\mathrm{d}T_m}{\mathrm{d}x} = \frac{2q}{\rho U_m H c_p} \tag{1}$$

となることを示せ．ここで，$q(x)$ は位置 x における基板から水への局所熱流束，U_m は平均流速である．

2. 基板と水の間の熱伝達率 h が x によらず一定であるとき，流路内の平均温度 T_m の分布を描け．なお，横軸を x，縦軸を T_m とし，T_w および入口の水の温度 T_0 を図中に明記すること．また，基板の温度と水の平均温度の差（T_w-T_m）が基板の温度と入口の水の

温度の差（T_w-T_0）の e^{-1} 倍になる位置 x_1 を求めよ．ここで e は自然対数の底である．

3. T_m が流路出口で T_w と等しいと見なせる場合に，2 つの基板から取り除かれる単位時間あたりの総伝熱量 Q を求めよ．なお，U_m は式(2)で与えられる．

$$U_m = \frac{H^2 \Delta P}{12 \mu L} \tag{2}$$

(2) 流路内の速度場と温度場が未発達である場合も含めて考える．流路の入口と出口の圧力差 ΔP を一定に保ったまま L を変化させた場合，単位時間あたりの総伝熱量 Q は図 1-3 に示すように L に対して極大値をとる．なお，L に伴って流量が変化することに注意すること．

1. 流路内の流れは，図 1-3 中の①において速度・温度境界層の厚さが H に比べて十分に小さい境界層流れとなり，②において速度・温度場が完全に発達した流れとなる．①と②の間で Q が極大値をとる理由を説明せよ．

2. 密度，粘性係数，比熱が水と同じであり，熱拡散率（温度伝導率）が水よりも大きい流体を用いた場合，図 1-3 の曲線が①と②においてどのように変化するか，理由も含めて説明せよ．

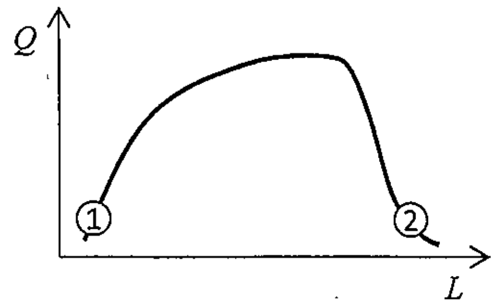


図 1-3

問題 2

下記のⅠ，Ⅱの両方について解答せよ．

Ⅰ. 図 2-1 に示すような管で構成されるジェットポンプについて考える．このポンプは，第一流体が流れるノズル，第二流体が流れる吸引部，および両流体を混合する混合部により構成され，第一流体がノズルから混合部に噴出することで第二流体が吸引される仕組みとなっている．ここで，第一流体，第二流体はともに密度 ρ の非圧縮性の液体とし，第一流体，第二流体の体積流量をそれぞれ Q_1, Q_2 とする．また，ノズル，吸引部出口，混合部の流路断面積をそれぞれ A_1, A_2, A_3（ただし，$A_3 = A_1 + A_2$），ノズル出口，吸引部出口，混合部出口における流速をそれぞれ V_1, V_2, V_3 とし，面積比 $\overline{A} = A_2/A_1$，および速度比 $\overline{V} = V_2/V_1$ を定義する．このとき，壁面摩擦はすべて無視できるものとして，以下の設問に答えよ．

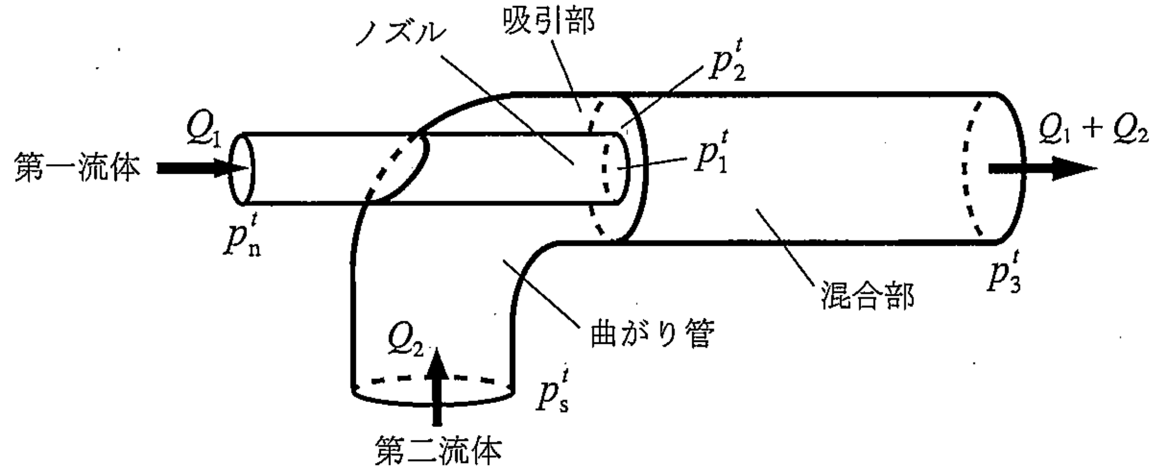


図 2-1

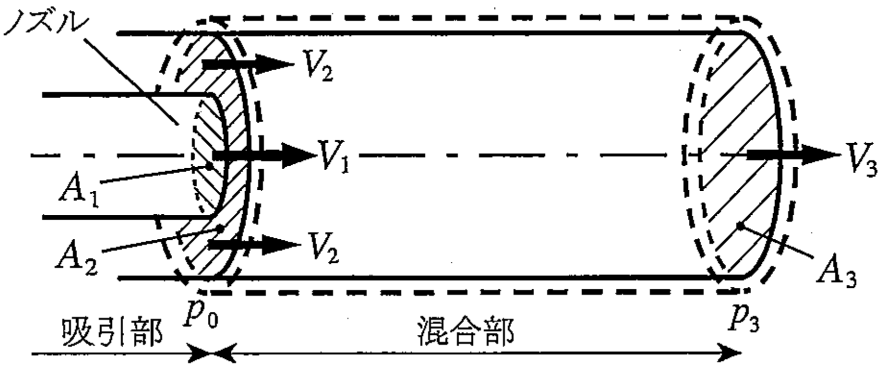


図 2-2

(1) 図 2-1 に示されたポンプ全体のうちノズル出口，吸引部出口，混合部領域のみを取り出し，図 2-2 の点線で囲まれた検査体積を考える．流速 V_3 を V_1, $\overline{A}$, $\overline{V}$ を用いて表せ．ただし，混合部の長さは十分に長く，流体は均一に混合するものとし，ノズル出口，吸引部出口，混合部出口において断面内の速度は一様とする．

(2) 混合部出口とノズル出口の静圧をそれぞれ p_3, p_0 とする．混合部出口とノズル出口の静圧差 $p_3 - p_0$ を ρ, V_1, $\overline{A}$, $\overline{V}$ を用いて表せ．ただし，ノズル出口と吸引部出口の静圧は等しく，ノズル出口，吸引部出口，混合部出口において断面内の静圧は一様とする．

(3) ノズル出口，吸引部出口，混合部出口の全圧をそれぞれ p_1^t, p_2^t, p_3^t とする．混合部出口とノズル出口の全圧差 $p_3^t - p_1^t$ を ρ, V_1, $\overline{A}$, $\overline{V}$ を用いて表せ．

(4) 第一流体に関して，混合部の入口から出口にかけて静圧が上昇するのに対し，その全圧が低下する理由を説明せよ．ただし，$0<\overline{V}<1$ とする．

次に，吸引部上流に曲がり管が接続されたポンプ全体の系（図 2-1）について考える．以下では，面積比を $\overline{A}=1$ で一定とする．ここで，ノズル入口，曲がり管入口における全圧をそれぞれ p_n^t, p_s^t とする．曲がりによる全圧損失係数 K は以下のように定義される．

$$K = \frac{p_s^t - p_2^t}{\rho V_2^2/2}$$

さて，第一流体から第二流体へのエネルギー伝達特性について考えるため，ノズル入口と混合部出口の全圧差，曲がり管入口と混合部出口の全圧差，および第一流体，第二流体の体積流量を用いて，ポンプ効率 η を次式で定義する．

$$\eta = \frac{Q_2(p_3^t - p_s^t)}{Q_1(p_n^t - p_3^t)}$$

(5) η を $\overline{V}$, K のみを用いて表せ．

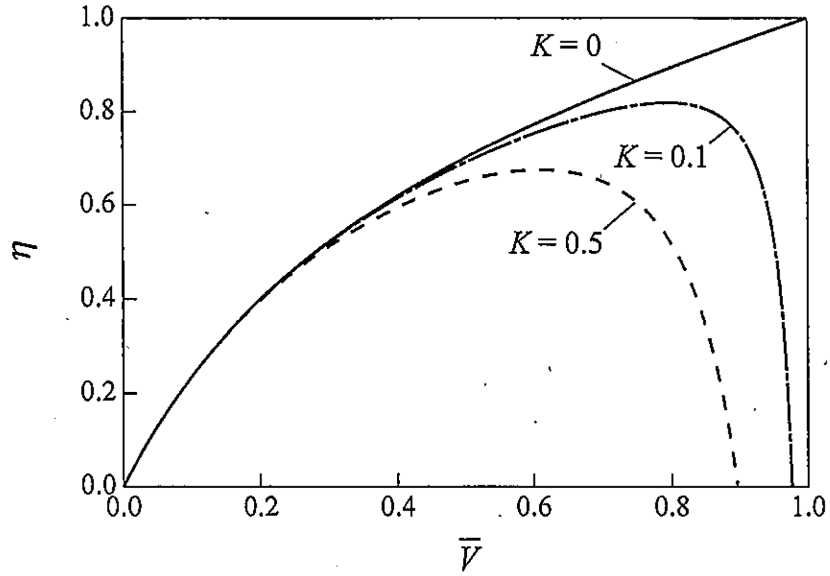


図 2-3

(6) 設問(5)で得られるηと$\overline{V}$の関係は図 2-3 のように表される．Kの値によって，ηと$\overline{V}$の関係が変化する理由を説明しなさい．

II.　図 2-4 のような奥行き方向に形状が変わらない二次元的な突起が気相中に置かれている．突起の先端の曲率半径は r_0 であり，突起の先端から根元方向へ表面に沿って座標 s を定義する．位置 $s = X$ において突起表面の曲率がゼロ（＝曲率半径が無限大）となっている．

この突起に，図 2-5 のようにスリットを設け，スリットから非圧縮性の液体を流して先端から流出させた．液体は突起表面に沿って液膜として流れ，そのときの液膜厚さを δ とする．液膜厚さ δ は十分に薄く，液膜表面の曲率は突起の曲率と等しいとみなせる．ここで，スリットは液膜表面の曲率に影響を与えず，突起先端における液膜表面の曲率半径は r_0 と等しい．また，流れは定常で，流速が遅いため慣性力は無視でき，さらには重力の影響も無視できるものとする．このとき，以下の設問に答えよ．ただし，液体の粘性係数を μ，表面張力を σ とする．

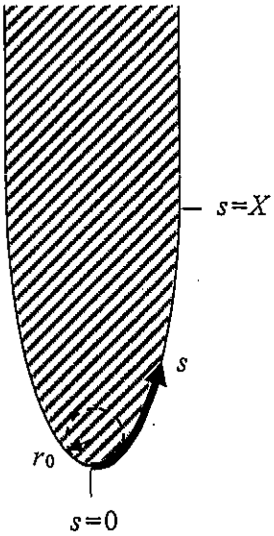


図 2-4

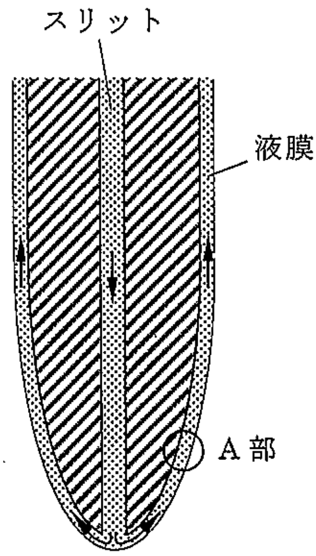
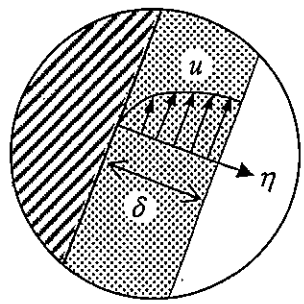


図 2-5



A 部拡大図

図 2-6

(1)　液膜内の壁面垂直方向圧力勾配はゼロとみなせる．ここで，s 方向の圧力勾配を $\dfrac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}s}$ とするとき，s 方向の液膜の運動方程式を記述せよ．ただし，壁面垂直方向を η，液の速度を $u(\eta)$ とする．ここで，液膜は十分に薄く，図 2-6 のように流れは平板上の流れと近似して良い．なお，前記したように慣性力と重力の影響は無視できる．

(2) 気液界面におけるせん断力が無視できるとき，図 2-6 に示した液膜内の速度分布 $u(\eta)$を求めよ．

(3) 一般に，表面張力の効果によって曲率半径 r の気液界面の内側の液体の圧力 P_Lは，気相圧力 P_Gよりも高く，下記の関係があることが知られている．

$$P_L = P_G + \frac{\sigma}{r}$$

この関係が成り立つものとして，突起先端から $s = X$ の位置までの区間（$0 \leqq s \leqq X$）における，s 方向の液膜内の圧力勾配 $\frac{dP}{ds}$ を，μ，σ，r_0，X の中から必要なものを用いて表せ．ただし，気相の圧力は場所によらず一定で，突起形状は液膜内の圧力勾配が $0 \leqq s \leqq X$ の区間内で一定 $\left(\frac{dP}{ds} = \text{const.}\right)$ となるようにその曲率が変化している．

(4) 突起の片側の側面を流れる奥行き方向単位長さあたりの液体の体積流量をΓとする．液膜厚さδをΓ，μ，σ，r_0，X を用いて表せ．

次に，液膜へ凝縮が生じ，下記の関係式で液膜流量Γが増加する場合を考える．

$$L\frac{d\Gamma}{ds} = \lambda\frac{\Delta T}{\delta}$$

ここで，L は流体の単位体積あたりの潜熱，λは液体の熱伝導率，ΔT (>0) は気液界面と壁面の温度差であり，いずれも座標 s に依存しない定数である．このとき，以下の設問に答えよ．

(5) 液膜流量変化が微小で，液膜流量Γと液膜厚さδの間に設問(4)で求めた関係が成り立つとき，液膜厚さδの s 方向変化を表す微分方程式を導出せよ．

(6) $s = 0$ における液膜厚さをδ_0とするとき，液膜厚さδを s の関数として表せ．