

平成31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30年8月28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. 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1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もよい。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。

(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 のように, 断熱壁で囲まれた部屋の中に, 初期状態において, 同じ圧力の異なる理想気体 A と B が隔壁によって仕切られている。気体 A の温度, モル数, モル熱容量を T_A, n_A, C_A , 気体 B の温度, モル数, モル熱容量を T_B, n_B, C_B とする。その後, 隔壁を取り除き, 気体が混合して平衡状態に達した。その際のエントロピー増加量 ΔS について, 以下の設問に答えよ。一般気体定数を R_0 , ボルツマン定数を k_B , アボガドロ数を N_a とする。

- (1) $T_A = T_B$ のとき,

$$\Delta S = R_0 \left\{ n_A \ln \left(\frac{n_A + n_B}{n_A} \right) + n_B \ln \left(\frac{n_A + n_B}{n_B} \right) \right\} \quad (1-1)$$

となることを示せ。

- (2) $T_A \neq T_B$ のときの ΔS を求めよ。

- (3) 設問(2)の ΔS が正であることを示せ。なお, 非負実数 C, D および重み α, β ($0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1, \alpha + \beta = 1$) に対して式(1-2)が成り立つことを用いてよい。

$$\alpha C + \beta D \geq C^\alpha D^\beta \quad (1-2)$$

- (4) 微視的な視点では, エントロピーは $S = k_B \ln W$ によって与えられる。ここで W は一定の温度と体積における気体分子がとり得る微視的な状態の数であり, $T_A = T_B$ のとき, 混合の前後の値をそれぞれ W_1, W_2 とし, それらの比を式(1-3)で表すことができるとする。

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{(n_A N_a + n_B N_a)!}{(n_A N_a)! (n_B N_a)!} \quad (1-3)$$

微視的な視点から式(1-1)を導出せよ。なお、式(1-4)のスターリングの近似を用いてよい。

$$\ln(n!) \approx n \ln n - n \quad (1-4)$$

ここで、 n は正の整数である。

- (5) 設問(4)にもとづいて、そのときの混合が不可逆過程であることを微視的な視点から示せ。

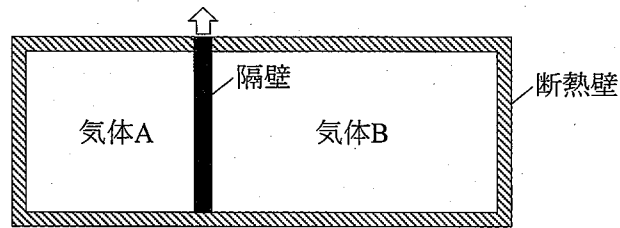


図 1-1

II. 液体と気体との間の定常の熱交換の問題を考える。図 1-2 に示すように厚さ d の金属板で高温(T_L)の液体と低温(T_G)の気体が隔離されている。液体から気体への熱通過を促進するために、気体側には半径 R 、長さ L の円柱形のフィンが取り付けられている。また、金属板の厚み方向の温度分布を考え、それに垂直な面内方向の温度分布は無視できるとする。金属板とフィンが熱伝導率 λ の同じ材料を融着したものである。ここで、フィン根本の中心を原点 O としてフィンの長さ方向に x 座標を定義する。液体側の熱伝達率を h_L 、気体側の熱伝達率を h_G 、金属板の液体側の面積を A とする。また、フィン先端からの熱伝達は無視できる（断熱）とし、円柱の x 軸に垂直な断面内の温度は一様と仮定する。以下の設問に答えよ。

- (1) フィンの軸方向の温度分布を求める。図 1-3 に示す微小長さ dx の検査体積の熱バランスを示せ。また、フーリエの式を用いてフィンの軸方向の一次元温度分布 $T(x)$ を求める微分方程式を導出せよ。
- (2) フィンの軸方向の温度分布を求めよ。ただし、フィン根本温度を T_0 とする。
- (3) フィン表面からの放熱量 Q_f を求めよ。また、以下の比によって定義されるフィン効率 η を求めよ。

$$\eta = \frac{Q_f}{Q_{f,ideal}}$$

ここで、 $Q_{f,ideal}$ は、フィン全面の表面温度が根本の温度 T_0 と等しいとしたときのフィン全面からの放熱量である。

- (4) フィンがないシンプルな場合について、液体から気体への熱通過率 K を A, h_L, h_G, d, λ を用いて表せ。ただし、液体から気体への伝熱量 Q を用いて、熱通過率 K は $Q = K(T_L - T_G)$ として定義される。また、熱通過率 K の逆数である総括熱抵抗 $R_t = 1/K$ をいくつかの熱抵抗の和として表せ。
- (5) 図 1-2 のようにフィンがある場合には、金属板から気体への伝熱はフィン根本以外の面積 A_0 からの伝熱とフィン表面の面積 A_f からの伝熱 Q_f の和として表される。フィンがある場合の総括熱抵抗 R_t を求め

よ。また、設問(3)のフィン効率 η が実用的なフィンの設計に用いられる理由について記述せよ。

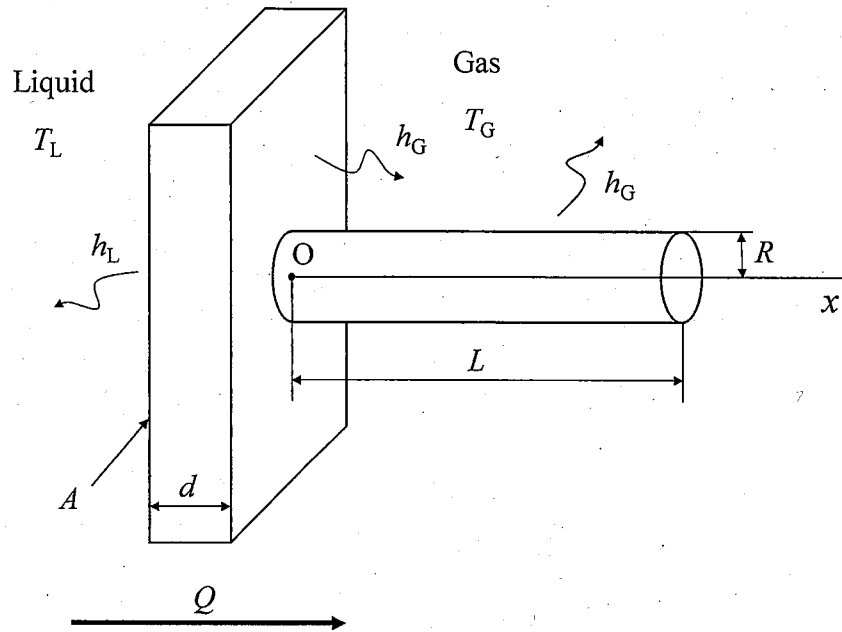


図 1-2

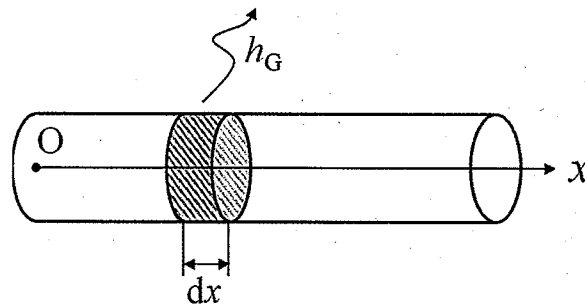


図 1-3

問題 2

図 2-1 に点線で示すような，側面が流管と一致する検査体積をとり，船に取り付けられたプロペラ周りの流れを考える．検査体積内の流れは一次元の定常・非圧縮性流れであり，損失の発生や重力の影響は無視できる．検査体積の入口，出口の圧力は等しく，検査体積の側面に働く力は無視できる．検査体積の入口からは，船速 V_1 と等しい速さで流れが流入し，質量流量は M である．プロペラにより加速された流れが検査体積の出口から V_2 の速さで流出する．以下の設問に答えよ．

- (1) プロペラの推力を求めよ．
- (2) 単位時間にプロペラが船に対して与えた仕事 W_1 を求めよ．
- (3) 単位時間にプロペラが流体に対して与えた仕事 W_2 を求めよ．
- (4) W_2 と W_1 の差 $\Delta W \equiv W_2 - W_1$ を求めよ．また， ΔW が物理的に何を意味するかを説明せよ．

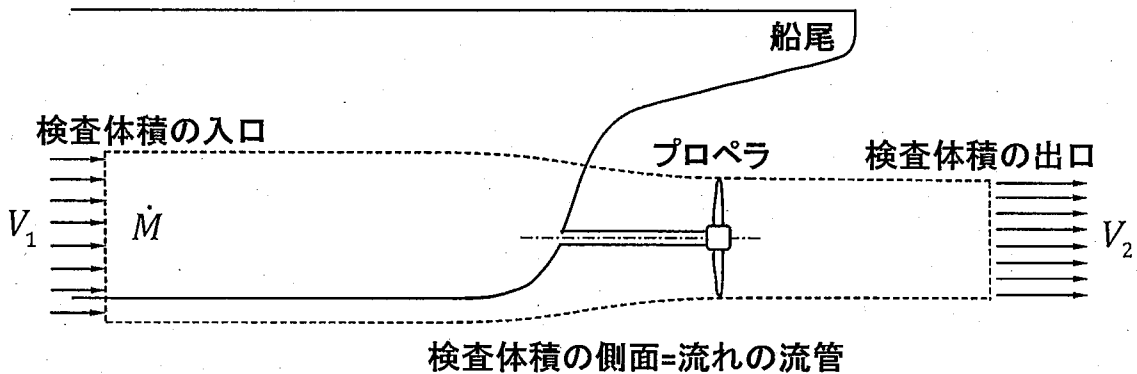


図 2-1

次に，損失の発生も考慮して，一定の角速度 ω で回転するプロペラの周りの流れを考える．図 2-2 左に示すように，プロペラには 5 枚の同一の動翼が周方向に等ピッチで取り付けられている．同図右は代表半径 r_0 における円筒面内の流れと流体力との関係を示したものである．プロペラに流入する流れはプロペラの回転軸方向の流速成分のみを有し，回転軸に垂直な断面内一様であり，流入速度は V_2 と等しいものとする．簡単のために，動翼周りの流

これは半径方向速度成分を持たず，1枚の動翼に作用する流体力 F は，次式により定義される，動翼の揚力係数 C_L ，および抗力係数 C_D を用いて表されるものとする。

$$C_L \equiv \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U^2 S} , \quad C_D \equiv \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 S}$$

ここに， U は代表半径 r_0 において動翼に流入する流れの相対速度の大きさを表し， F_L および F_D は，1枚の動翼に作用する流体力 F の，相対速度 U に垂直な成分（揚力），および平行な成分（抗力）をそれぞれ表す。また， ρ は流体の密度， S は1枚の動翼の代表面積をそれぞれ表す。1枚の動翼に作用するトルクは上記の流体力が代表半径 r_0 において作用しているものとして計算できるものとする。以下の設問に答えよ。

- (5) プロペラの推力 F_p ，およびトルク T_p を揚力係数 C_L ，抗力係数 C_D ，および必要な変数を用いて表せ。
- (6) プロペラが単位時間に船に対して与える仕事をプロペラの単位時間の仕事で割った値をプロペラ効率 η と定義する。 η を揚力係数 C_L ，抗力係数 C_D ，および必要な変数を用いて表せ。
- (7) 設問(1)から設問(6)の結果に基づき，同一の船速で，プロペラの推力を変えずに，プロペラ効率を向上させる方法を2つ挙げよ。

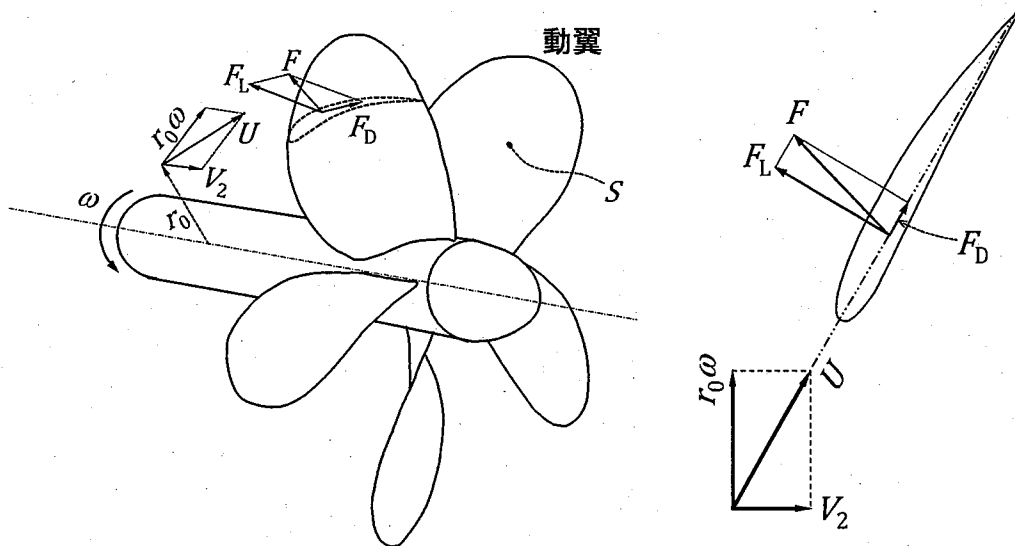


図 2-2

(白紙)

FY2019 Department of Mechanical Engineering

Master Course Program Entrance Examination

“Mechanical Engineering” (Part 1)

2018/8/28 (Tuesday) 9:00 ~ 11:00

Instructions

1. Do not open the exam booklet until you are instructed to begin.
2. Answer all Questions in Problems 1 and 2.
3. If you find some incomplete printing or collating, report them to the proctor.
4. Make sure that you have all 4 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 1)” 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 2 worksheets. Write your examinee number (candidate number) on the upper left corner of each worksheet.
10. Hand in both 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, in a room surrounded by adiabatic walls, different ideal gases A and B at the same pressure are initially divided by a separation wall. The temperature, molar amount, and molar heat capacity of gas A are T_A , n_A , and C_A , and the temperature, molar amount, and molar heat capacity of gas B are T_B , n_B , and C_B . The separation wall is then removed, and the gasses mix and reach equilibrium. Answer the following questions related to the entropy change ΔS of the mixing process. The universal gas constant is R_0 , Boltzmann constant is k_B , and Avogadro number is N_a .

(1) When $T_A = T_B$, derive the following equation.

$$\Delta S = R_0 \left\{ n_A \ln \left(\frac{n_A + n_B}{n_A} \right) + n_B \ln \left(\frac{n_A + n_B}{n_B} \right) \right\} \quad (1-1)$$

(2) When $T_A \neq T_B$, obtain ΔS .

(3) Show that ΔS in Question (2) is positive. You may use Equation (1-2) that applies to non-negative real numbers C and D , and weights α and β ($0 \leq \alpha \leq 1$, $0 \leq \beta \leq 1$, $\alpha + \beta = 1$).

$$\alpha C + \beta D \geq C^\alpha D^\beta \quad (1-2)$$

(4) From a microscopic viewpoint, entropy can be expressed as $S = k_B \ln W$, where W is the number of possible microscopic states of the gas molecules for given temperature and volume. When $T_A = T_B$, we define the values of W before and after the mixing as W_1 and W_2 , and express the ratio with Equation (1-3).

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{(n_A N_a + n_B N_a)!}{(n_A N_a)! (n_B N_a)!} \quad (1-3)$$

Derive Equation (1-1) from a microscopic viewpoint. You may use Stirling's approximation in Equation (1-4).

$$\ln(n!) \approx n \ln n - n \quad (1-4)$$

Here, n is a positive integer.

- (5) Based on Question (4), show that the mixing is an irreversible process from a microscopic viewpoint.

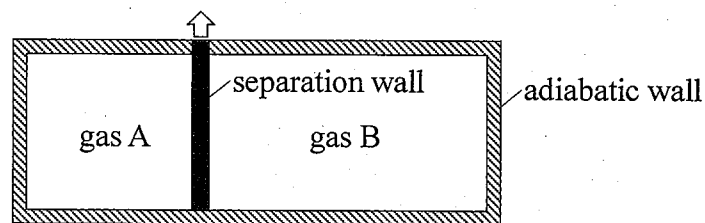


Figure 1-1

II. Let's consider the steady heat exchange between liquid and gas. As shown in Figure 1-2, liquid at higher temperature T_L and gas at lower temperature T_G are separated by a metal plate with thickness d . In order to enhance the heat exchange, a cylindrical fin with radius R and length L is attached to the metal plate on the gas side. Here, we consider the temperature variation along the thickness direction of the metal plate and assume that the temperature variation in the plane direction perpendicular to the thickness direction is negligible. The fin is made of the same material as the metal plate and is fused to the metal plate. The thermal conductivity of this material is λ . We define the x -coordinate from the origin O at the center of the root of the fin. Heat transfer coefficients are h_L on the liquid side and h_G on the gas side. The metal plate area on the liquid side is A . The heat transfer from the tip of the fin is ignored (assumed as insulated) and the uniform temperature distribution in cross-sections perpendicular to the x -axis is assumed. Answer the following questions.

- (1) Let's consider the temperature distribution along the fin axis. Describe the conservation of energy in a control volume with small axial length dx as shown in Figure 1-3. Then, using Fourier's law, obtain the differential equation describing the one-dimensional temperature distribution $T(x)$ along the fin axis.
- (2) Obtain the temperature distribution along the fin axis. Here the temperature at the root of the fin is T_0 .
- (3) Obtain the heat transfer rate Q_f from the fin surface. Then, obtain the fin efficiency η which is defined as the following ratio.

$$\eta = \frac{Q_f}{Q_{f,\text{ideal}}}$$

Here, $Q_{f,\text{ideal}}$ is the heat transfer rate from the fin surface under the assumption that the fin surface temperature is constant and is the same as the temperature at the root of the fin, T_0 .

- (4) Let's consider a simpler system without the fin. Express the overall heat transfer coefficient K between liquid and gas with A , h_L , h_G , d , and λ . The overall heat transfer coefficient K is defined as $Q = K(T_L - T_G)$ with the heat transfer rate Q between liquid and gas. Then, obtain the total thermal resistance $R_t = 1/K$ as a sum of several thermal resistances.
- (5) In the case of the metal plate with a fin in Figure 1-2, the heat transfer from the metal surface to gas is the sum of heat transfer from area A_0 , expressed as A minus the area of the fin root, and the heat transfer Q_f from the area of the fin surface A_f . Obtain the total thermal resistance R_t in the case with the fin. Then, explain why the fin efficiency η defined in Question (3) is useful for the practical thermal design of heat transfer surface with a fin.

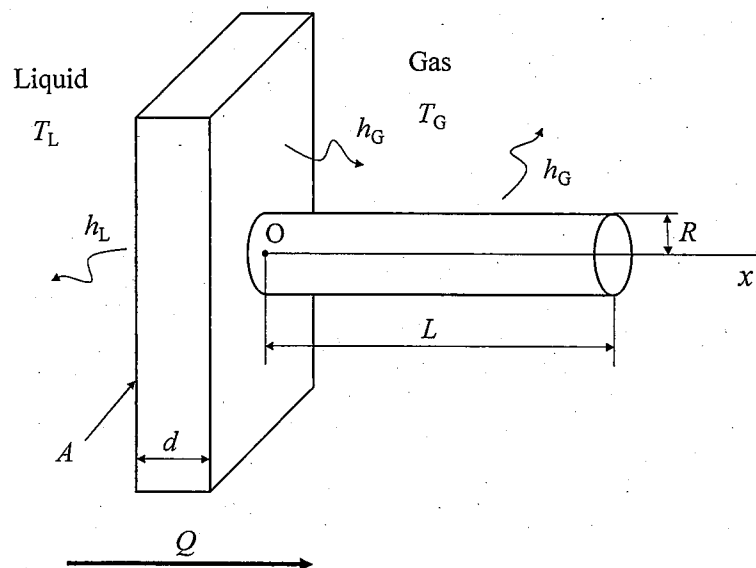


Figure 1-2

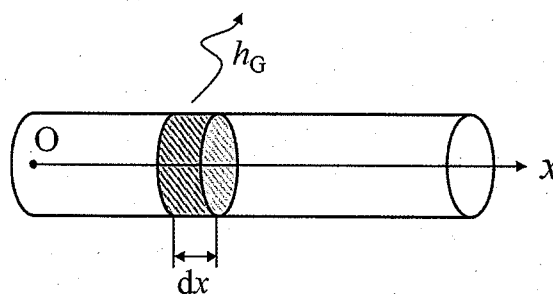


Figure 1-3

Problem 2

We will consider the flow around a propeller attached to a ship, in a control volume with its side surface aligned to a streamtube as shown by the dashed line in Figure 2-1. Assume that the flow in the control volume is a one-dimensional steady incompressible flow, and generation of loss and effects of gravity can both be neglected. The pressure at the inlet and outlet cross sections of the control volume are equal, and force on the side surface of the control volume can be neglected. The flow with a mass flow rate of \dot{M} enters the control volume at a velocity V_1 equal to the ship velocity. The flow, having been accelerated by the propeller, goes out of the control volume at a velocity V_2 . Answer the following questions.

- (1) Obtain the thrust force of the propeller.
- (2) Obtain the work W_1 that the propeller does on the ship per unit time.
- (3) Obtain the work W_2 that the propeller does on the fluid per unit time.
- (4) Obtain the difference between W_1 and W_2 , $\Delta W \equiv W_2 - W_1$. Then, explain what ΔW represents physically.

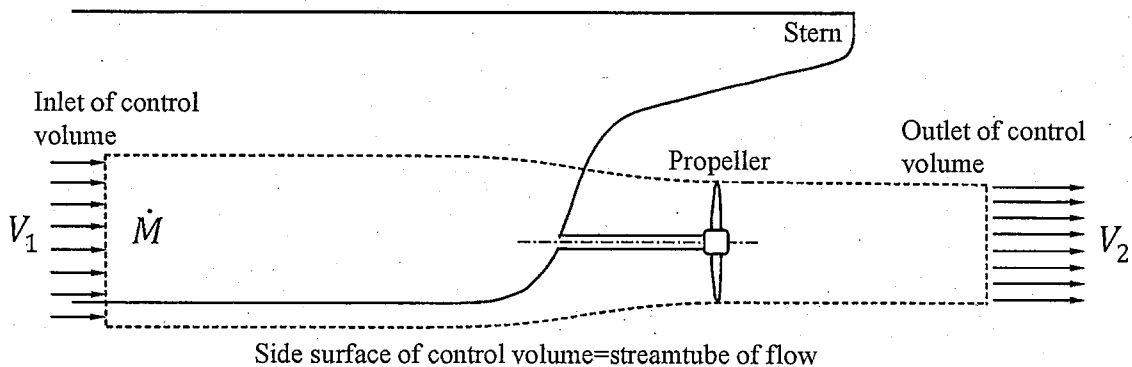


Figure 2-1

Next, by taking generation of loss into account, we will consider the flow around the propeller rotating at a constant angular velocity of ω . As shown in the left figure of Figure 2-2, the propeller has five identical blades installed with a constant pitch in the circumferential direction. The right figure represents the relation between the flow and fluid force on the cylindrical surface at the representative radius, r_0 . The flow that enters the propeller has a velocity component only in the direction of the axis of rotation of the propeller and is uniform in the cross section perpendicular to the rotational axis. The velocity component is equal to V_2 . For simplicity, we assume that the flow around the blades does not have a radial velocity component, and that the fluid force F that acts on one blade can be represented by a lift coefficient C_L , and a drag coefficient C_D , of the blade defined by the following equations,

$$C_L \equiv \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho U^2 S} \quad , \quad C_D \equiv \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 S} \quad ,$$

where U is the relative-velocity magnitude of the flow that enters the blades at the representative radius, r_0 . F_L and F_D , are the components of the fluid force F acting on one blade, respectively in the direction perpendicular to (lift force), and parallel to (drag force), the relative velocity U . ρ is the density of the fluid, and S is the representative area of one blade. The torque that acts on one blade can be computed by assuming that the above-mentioned fluid force acts at the representative radius r_0 . Answer the following questions.

- (5) Represent the thrust force F_P and torque T_P of the propeller by using the lift coefficient C_L , the drag coefficient C_D and other necessary variables.
- (6) The propeller efficiency η is defined by the work that the propeller does on the ship per unit time divided by the work generated by the propeller per unit time. Express η by using the lift coefficient C_L , the drag coefficient C_D and other necessary variables.

- (7) Based on the results of Question (1) through Question (6), propose two methods to improve the propeller efficiency for the same ship velocity with the thrust of the propeller kept constant.

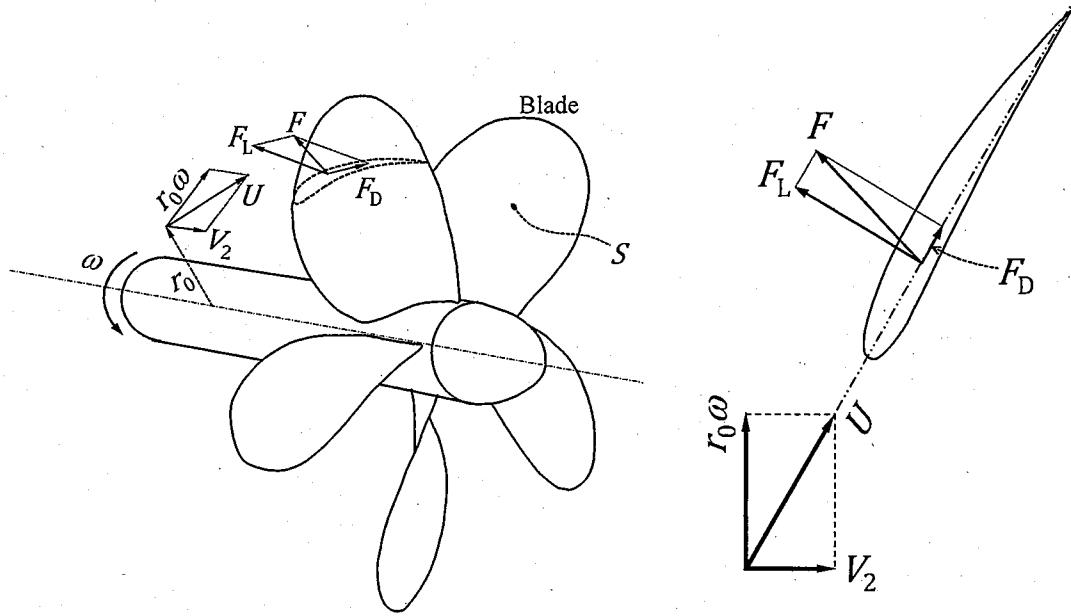


Figure 2-2

(Blank)