

問(I) (55点)

温度 $T_L$ の低温熱源（大気）と温度 $T_H (>T_L)$ の高温熱源の間にヒートポンプを稼働させる。比熱比 $\kappa$ （定数）の理想気体を作動流体とする閉じた系のサイクルを用いる。状態1で気体の温度、圧力、体積は $T_L, p_1, V_1$ である。状態1から気体を断熱圧縮し、温度 $T_H$ に達した状態を状態2とする。状態2から気体は等温で高温熱源に放熱し、圧力 $p_3$ に達した状態を状態3とする。状態3より気体を断熱膨張させ、温度 $T_L$ に達した状態を状態4とする。状態4から状態1まで気体は等温で低温熱源から受熱する。全ての過程は準静的で摩擦は無い。 $T_L, T_H, p_1, V_1, p_3, \kappa$ を既知とし、これらを用いて以下の問いに答えよ。

- (1) このサイクルの状態変化を図1.1の $p$ - $V$ 線図上に示せ。各状態を示す番号を付すこと。
- (2) 状態2の気体の圧力 $p_2$ , 体積 $V_2$ を求めよ。
- (3) 状態1から状態2の間に気体がされる仕事 $L_{12}$ を求めよ。
- (4) 状態2から状態3の間に気体が放出する熱 $Q_H$ を求めよ。
- (5) このヒートポンプの成績係数 $\epsilon$ を求めよ。

次に、上記における2つの過程1→2, 3→4を完全な断熱には出来ず、両過程において気体が大気中に放熱してしまうサイクルを考える。すなわち、状態1から気体をポリトロープ指数 $c$ で圧縮し、温度 $T_H$ に達した状態を状態5とする。状態5から気体は等温で高温熱源に放熱し圧力 $p_3$ に達した状態を状態3とする。状態3より気体をポリトロープ指数 $e$ で膨張させ、温度 $T_L$ に達した状態を状態6とする。状態6から状態1まで気体は等温で低温熱源から受熱する。全ての過程は準静的で摩擦は無い。 $T_L, T_H, p_1, V_1, p_3, \kappa, c, e$ を既知とし、これらを用いて以下の問いに答えよ。

- (6) サイクル1→5→3→6→1の状態変化を図1.1上に書き足せ。状態5, 6を示す番号を付すこと。
- (7)  $\kappa, c, e$ の大小関係を示せ。
- (8) 状態1から状態5の間に気体がされる仕事 $L_{15}$ , 放出する熱 $Q_{15}$ を求めよ。
- (9) サイクル1→2→3→4→1の成績係数 $\epsilon$ とサイクル1→5→3→6→1の成績係数 $\epsilon'$ の大小関係を理由と共に示せ。必要なら図1.1に書き足して利用してよい。

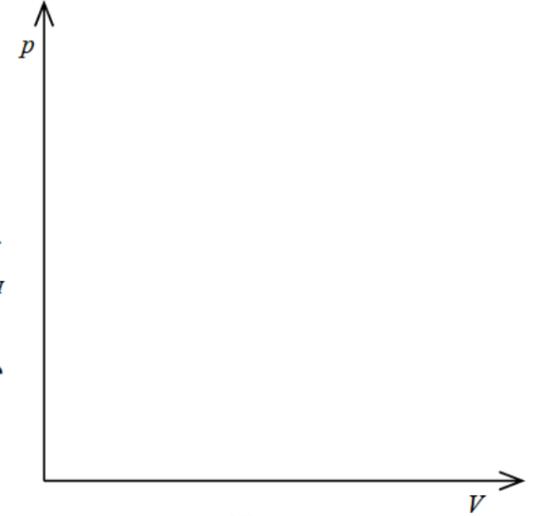


図 1.1

問(Ⅱ) (55点)

図2.1に示すように半径  $R_1$  (m)の銅線が、内半径:  $R_1$  (m), 外半径:  $R_2$  (m)のビニール樹脂で被覆されている。銅線には電流が流れており、内部では一様な発熱量  $H$  ( $\text{W}/\text{m}^3$ )のジュール熱が生じている。ビニール被覆の外側は、熱伝達率  $h$  ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ), 温度  $T_a$  (K)の空気にさらされている。銅線とビニール被覆は完全に接触しており、その境界の温度は  $T_1$  (K), ビニール被覆の外表面温度は  $T_2$  (K)ある。また、銅線とビニール被覆の熱伝導率はそれぞれ  $k_A, k_B$  ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )であり、温度によらず常に一定である。なお、ビニール被覆表面からのふく射による放熱は無視してよく、半径方向のみの一次元定常問題と見なしてよい。銅線の中心を  $r=0$  として、以下の問いに答えよ。

- (1) 銅線内部の熱伝導方程式  $\frac{k_A}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) + H = 0$  を解いて、銅線内部の温度分布  $T(r)$  を  $R_1, H, T_1, r$ , および  $k_A$  を用いて求めよ。
- (2) 銅線内部で最大となる温度  $T_{\max}$  (K) を求めよ。
- (3) 長手方向の長さを  $L$  とする時、ビニール樹脂部の熱伝導による熱抵抗は  $\frac{1}{2\pi k_B L} \ln \left( \frac{R_2}{R_1} \right)$  (K/W), ビニール樹脂表面から空気への対流による熱抵抗は  $\frac{1}{2\pi R_2 h L}$  (K/W) で表される。ここで、 $R_1$  を固定し、 $R_2$  を変化させることを考える。この時、ビニール被覆厚さが厚くなると、熱伝導による熱抵抗は大きくなるが、対流による熱抵抗は小さくなる。総括熱抵抗を最小にするビニール被覆厚さが存在することを示し、その厚さ  $\delta_{\min}$  を求めよ。
- (4) (3)で求めた総括熱抵抗が最も小さくなる場合の  $T_1$  (K) を  $R_1, H, h, T_a$ , および  $k_B$  を用いて求めよ。
- (5) 銅線, ビニール被覆, および空気部の温度分布の概形を直線と曲線の区別, 傾きに注意しながら図2.2に示せ。ただし,  $k_A > k_B$  とする。

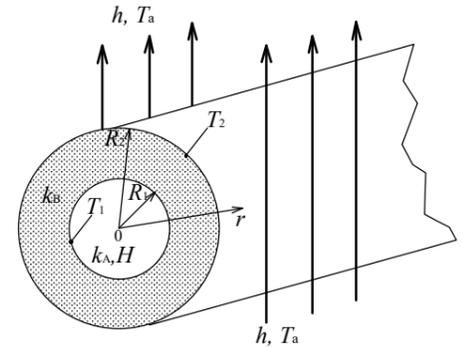


図 2.1

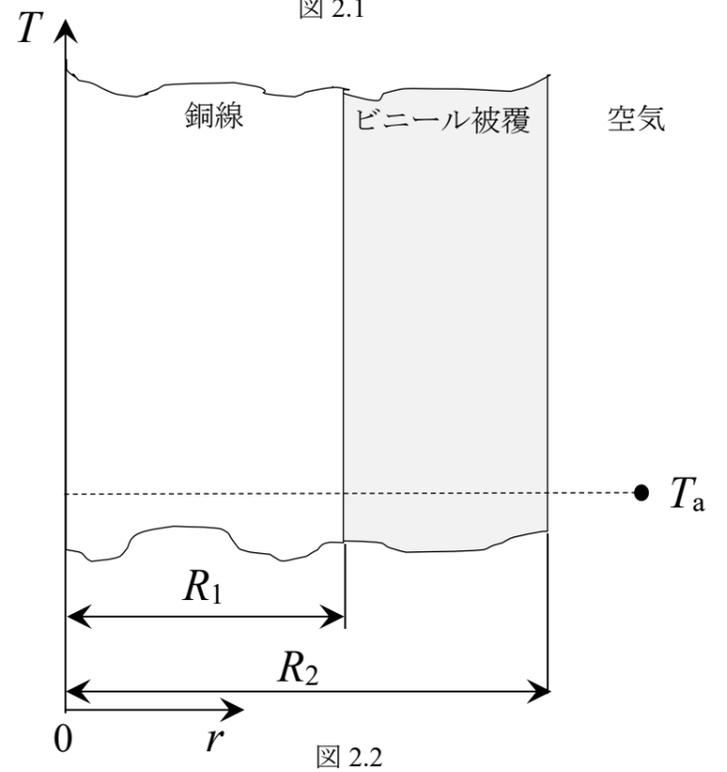


図 2.2

問(Ⅲ) (40点)

温度 $T_1$  (K), 圧力 $p$ の水 (圧縮液) が, 一定の質量流量 $\dot{m}$  (kg/s)で加熱管内に流入し, 一定の圧力 $p$ で受熱しながら飽和温度 $T_2$  (K)を経て, 温度 $T_3$  (K)の過熱蒸気となって流出している. 圧縮液, 湿り蒸気および過熱蒸気の各域での単位時間あたりの受熱量は, 全体の受熱量 $\dot{Q}$  (kW)のそれぞれ15%, 60%および25%であった. 管摩擦などの不可逆現象を無視した可逆的な状態変化を仮定し, さらに蒸気の運動エネルギーと位置エネルギーを無視して以下の問いに答えよ. なお, 圧力 $p$ の飽和液の比体積を $v'$  ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ), 比エントロピーを $s'$  ( $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ )で, また乾き飽和蒸気では  $'$ の代わりに  $''$ を付けて表す.

- (1) 乾き飽和蒸気の状態に到達した点の体積流量は, 飽和液の状態に到達した点の体積流量の何倍であるかを,  $v'$ と $v''$ を用いて表せ.
- (2) 湿り蒸気域中のある点の体積流量が, 飽和液の状態に到達した点の体積流量の $\alpha$ 倍 ( $\alpha > 1$ )であった. このときの蒸気の乾き度 $x$ を, 導出過程を示しながら  $v', v'', \alpha$ を用いて表せ.
- (3) 受熱量に対応させて各域の流体の温度変化の概略図を図3.1中に示せ. その際に圧縮液の比熱の温度依存性は無視できるが, この圧力の過熱蒸気の比熱は温度上昇とともに減少することを考慮せよ. 併せて各域の温度変化がそのような理由を述べよ.
- (4) 温度 $T_2$  (K)を, 導出過程を示しながら  $\dot{m}, \dot{Q}, s', s''$ を用いて表せ.
- (5) 図3.2に示すように水蒸気の比エンタルピー $h$ と比エントロピー $s$ の関係を表した $h$ - $s$ 線図において, 湿り蒸気域の等圧線の傾き $dh/ds$ は, 圧力が高くなるにつれて大きくなっている. その理由を述べよ.

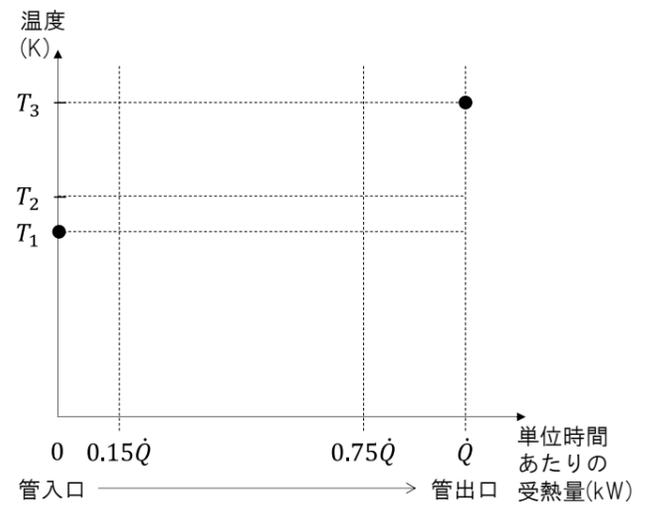


図 3.1 温度変化の解答欄

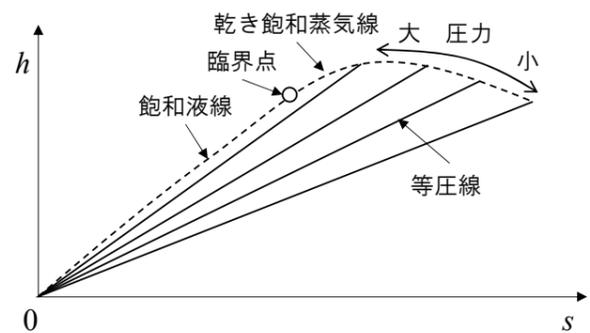


図 3.2  $h$ - $s$  線図の概略図