

問(I) (55点)

ピストンをもつ往復動式一段圧縮機の圧力比の上限について考える。まず、圧縮機の動作を図1.1の p - V 線図で確認する。なお、以下各物理量の添字番号は、対応する状態、または過程を表すものとする。

状態1→状態2: ピストンが下死点から移動し、シリンダ内部の気体を圧縮する(圧縮過程)。このときピストンが気体になす仕事を L_{12} とする。

状態2→状態3: 圧力 p_2 に達すると排気弁が開き、ピストンの上死点への移動とともに圧縮された気体が圧力、温度一定のもとシリンダ外部へ排気され、排気弁が閉じる(排気過程)。このときピストンが気体になす仕事を L_{23} とする。

状態3→状態4: ピストンが上死点に達したときにピストンと吸排気弁との間のすきま容積($=V_3$)に残った高圧の気体は、吸気側圧力に等しくなるまで膨張する(膨張過程)。このときピストンが気体になす仕事を L_{34} とする。

状態4→状態1: 圧力 $p_4(=p_1)$ で吸気弁が開き、ピストンの下死点への移動とともに外部の気体が圧力、温度一定のもとシリンダ内部へ吸気され、吸気弁が閉じる(吸気過程)。このときピストンが気体になす仕事を L_{41} とする。

圧力比を $\gamma(=p_2/p_1)$ とする。また、ピストンの行程容積を $V_S(=V_1-V_3)$ とすると、すきま比 $\sigma(=V_3/V_S)$ 、および容積効率 $\eta(=(V_1-V_4)/V_S)$ を定義する。作動流体は、比熱比 κ (温度によらず一定)の理想気体とする。また、各過程は準静的であり、ピストンの摩擦は無視し得るものとする。以下の問いに答えよ。

- (1) まず、すきま容積が存在しない理想的な圧縮機を考える。ピストンは排気過程で全ての気体を圧力、温度一定のもと排気する(状態3')。また、状態4'→1で気体を圧力、温度一定のもと吸気する。状態4'→1→2→3'の一連の過程を通じてピストンが気体になす正味の仕事 L' を求めよ。ただし、 p_1 、 V_1 、 κ 、および γ を用いて表せ。なお、圧縮過程は断熱変化とする。
- (2) 次に、すきま容積が存在する圧縮機を考える。状態1→2→3→4→1の一連の過程を通じてピストンが気体になす正味の仕事 L を求めよ。ただし、 p_1 、 V_S 、 κ 、 γ 、および η を用いて表せ。なお、圧縮過程、および膨張過程はそれぞれ断熱変化とする。
- (3) この圧縮機を使い、より高い圧力の気体を得たい。しかし、 p_1 を固定して p_2 を高くしていく、すなわち γ が増加すると V_4 も大きくなり、吸気過程で吸気可能な気体の体積は減少していく。このように η が γ に依存することを、 η を κ 、 γ 、および σ を用いて表すことで説明せよ。
- (4) この圧縮機では γ はどこまで高くできるだろうか。 γ を大きくしていくと、あるところで吸気過程においてもはや外部から吸気ができなくなる。このときの γ を κ 、および σ を用いて表せ。また、このときの γ 以上の圧力比を得たい場合にはどのような方法が考えられるか、文章で記述せよ。

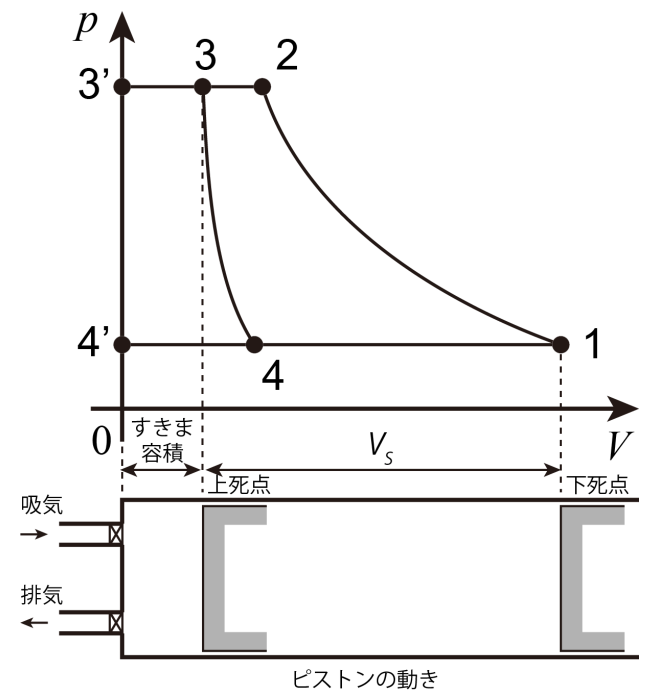


図 1.1 圧縮機の p - V 線図

問(Ⅱ) (55点)

図2.1に示すように、発熱体が真空層を挟んで固体壁と向き合っている。発熱体の左側は断熱されており、内部は単位体積あたり H (W/m^3) で一様に発熱している。発熱体の左側および右側の温度は、それぞれ T_0 および T_1 であり、固体壁は一定温度 T_2 (K) に保たれている。発熱体と固体壁の間はふく射で熱が輸送される。発熱体の厚さおよび熱伝導率は、それぞれ L (m) および k ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) (一定) であり、奥行きと垂直方向の長さは無限である。

ただし、発熱体右側と固体壁の間（無限平行平板間）のふく射による熱伝達は次式で計算される。

$$q_{12} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (\text{W}/\text{m}^2)$$

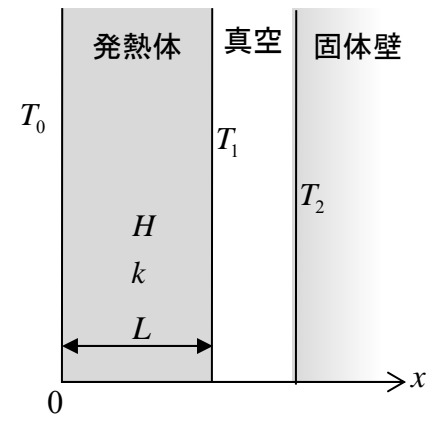


図2.1

ε_1 , ε_2 は面1(発熱体右側)および面2(固体壁)の放射率, σ はステファン・ボルツマン定数($\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$)である。この時、以下の問いに答えよ。ただし、解答はすべて H, L, k, σ のいずれかを用いて表せ。また定常問題として取り扱ってよい。

- (1) 発熱体から固体壁への熱流束 q_{12} (W/m^2) を求めよ。
- (2) 一次元定常熱伝導方程式を解いて、発熱体左右の面の温度差 $T_0 - T_1$ を求めよ。
- (3) $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1/8$, かつ $T_1 = 2T_2$ の時, T_1 を求めよ。

次に(3)の状態では真空層に非常に薄い板を挿入したところ、発熱体右面の温度 T_1 は T_{1b} に変化し、板の温度は T_3 となった。板の放射率は両側ともに $1/8$ であり、内部の温度は均一とみなしてよい。この時、以下の問いに答えよ。

- (4) 板から固体壁への熱流束 q_{32} を求めよ。
- (5) T_3 を求めよ。
- (6) 発熱体右面の温度の板挿入前後の比 T_{1b}/T_1 を有効数字3桁で求めよ。ただし、必要に応じて $\sqrt[3]{31} \approx 2.36$ を用いてよい。

問(Ⅲ) (40点)

図3.1の $p-h$ 線図上に示されている蒸気圧縮式の理論冷凍サイクルがある。状態1から2では冷媒は外部から l_c だけ仕事をされ、状態2から3では q_H だけ放熱し、状態4から1では q_L だけ受熱する。表3.1は冷媒の飽和蒸気表である。次の問いに答えよ。

表3.1 冷媒の飽和蒸気表

温度	圧力	比エンタルピー		比エントロピー	
T_H	p_H	h_H'	h_H''	s_H'	s_H''
T_L	p_L	h_L'	h_L''	s_L'	s_L''

注：表内の「'」は飽和液、「''」は乾き飽和蒸気を意味する。

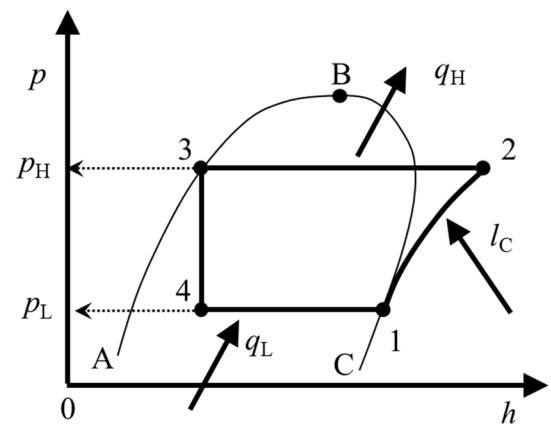


図3.1 $p-h$ 線図. ABは飽和液線. BCは乾き飽和蒸気線.

(1) リストから用語を選び、カッコ内に記号ア～シを入れて、冷凍サイクルの説明文を完成させよ。なお、同じ記号を複数回使っても良い。

説明文：

状態1における冷媒の状態は()である。
 次の状態2までの過程は()で進み、冷媒は圧縮機により仕事 l_c を受けて()となる。
 次の状態3に至る過程は()で進み、冷媒は()により q_H 放熱して()となる。
 その後、状態4に至る過程では膨張弁により()で進み、冷媒は()となる。
 次の状態1までの過程は()で進み、冷媒は()によって q_L 受熱して()になる。

リスト：

ア)蒸発器, イ)凝縮器, ウ)膨張弁, エ)圧縮機, オ)飽和液, カ)圧縮液, キ)過熱蒸気, ク)湿り蒸気, ケ)乾き飽和蒸気, コ)等エンタルピー変化, サ)等エントロピー変化, シ)等圧変化

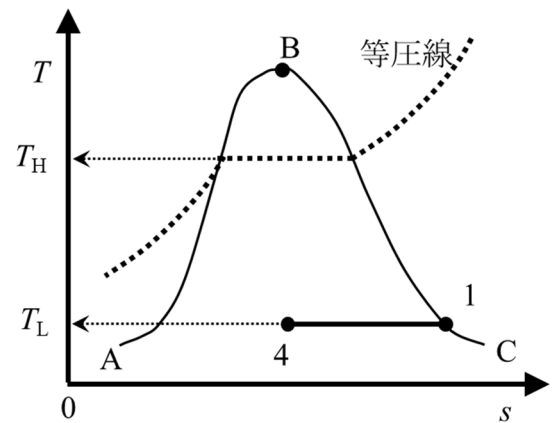


図3.2 $T-s$ 線図.

(2) 状態4の乾き度 x_4 を表3.1の記号を使って表せ。

(3) 図3.2の $T-s$ 線図上にこのサイクルを描け。なお状態1, 4は予め与えている。

(4) 表3.1の記号, および l_c, x_4 を使って状態1, 2, 3, 4の比エンタルピー, 比エントロピーを求め、次の表にまとめて示せ。

状態	1	2	3	4
h				
s				

(5) ヒートポンプ, 冷凍機としての成績係数 ϵ_{HP} 及び ϵ_R を, 各状態の比エンタルピー h_1, h_2, h_3, h_4 を使ってそれぞれ示せ。

(6) 圧縮機の断熱効率 η_c が $0 < \eta_c < 1$ となり不可逆過程となった。この時の冷凍機としての成績係数を ϵ_R^* とする。 $\epsilon_R^* < \epsilon_R$ となることを証明せよ。