

熱力学

以下の問いに答えよ。なお、解答用紙には、答えを算出する過程 — 計算式やその式を得るための根拠となる方程式等 — も丁寧に記述する事。

1 比熱一定の理想気体 1 kg に図1のような $T-S$ 線図上のサイクルを準静的に行なわせる。数字は熱力学の状態を示し、1から4までの状態の圧力 [Pa], 温度 [K], 体積 [m^3] が、それぞれ、 (P_1, T_1, V_1) , (P_2, T_2, V_2) , (P_3, T_3, V_3) および (P_4, T_4, V_4) で与えられている。気体定数を R [J/(kg·K)], 比熱比を $\gamma (> 1)$ とする。

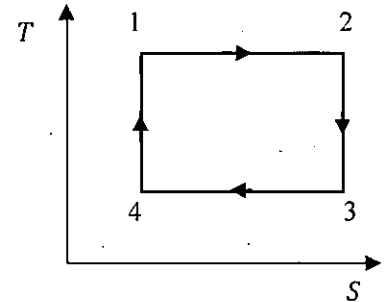


図1

(1) このサイクルを $P-V$ 線図上に表わすと図2のようになる。図2のA, B, C, Dは、それぞれ図1の1, 2, 3, 4のどれに対応するか、例えば1にAが対応するなら1-Aのように書いて答えよ。

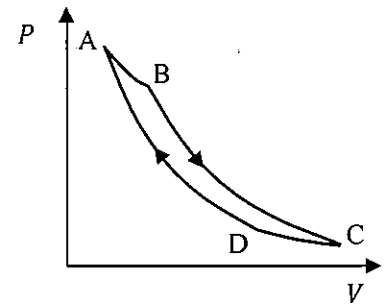


図2

(2) 状態変化 $1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 3$, $3 \rightarrow 4$, $4 \rightarrow 1$ の各段階において、外から吸収する熱量と外へする仕事を Q , W , γ および R のうち必要な記号を用いて表わせ。 Q と W には状態を表わす数字を添字として付すこと。

(3) このサイクルは温度の異なる2つの熱源との間で、熱源と同じ温度で可逆的に熱のやりとりをして動力サイクルとして動作する。高温熱源の温度が 15°C , 低温熱源の温度が -15°C のとき、このサイクルの熱効率を求めよ。

(4) このサイクルを $1 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ のように逆方向に作動させると、2つの熱源の間で動くヒートポンプ・サイクルとして動作する。高温熱源の温度を 40°C , 低温熱源の温度を 25°C としたとき、冷房運転のときの成績係数を求めよ。

2 圧力 $p_1 = 1200 \text{ kPa}$, 温度 $T_1 = 1173 \text{ K}$ の空気 (流量 $m_f = 0.050 \text{ kg/s}$) が定常的にタービンへ流入し, 圧力 $p_2 = 100 \text{ kPa}$ まで膨張し, 外へ排出されている。空気はガス定数 $R = 0.287 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 比熱比 $\gamma = 1.40$ の理想気体であると仮定して以下の問いに答えよ。なお, タービン前後における運動エネルギーの変化と位置エネルギーの変化については無視できる。

- (1) タービン出口における空気の温度 T_2 が 673 K の時, タービン前後における比エンタルピーの変化 $\Delta h_{12} [\text{kJ}/\text{kg}]$ およびタービンの出力 $L_{12} [\text{kW}]$ を求めよ。なお, タービンは断熱されており空気と周囲の間で熱の出入りはない。
- (2) タービン内での過程が可逆断熱膨張であると想定した場合について, タービン出口における空気の温度 $T_{2i} [\text{K}]$ とタービン前後における比エンタルピーの変化 $\Delta h_{12i} [\text{kJ}/\text{kg}]$, およびタービンの出力 $L_{12i} [\text{kW}]$ を求めよ。
- (3) 先の問 (1) と問 (2) では, 同じ流量, 同じ状態の空気がタービンで断熱膨張して出力を得ているが, 出口における温度と得られる出力が異なっている。この差が生じる要因について熱力学的な観点から簡単に説明せよ。

3 容積 $V = 0.450 \text{ m}^3$ のよく断熱された剛体容器の内部に, 温度 $T_1 = 100^\circ\text{C}$ の飽和水と飽和水蒸気, および体積と熱容量が無視できる小さいヒーターが入っている。飽和水と飽和水蒸気の質量の合計 m は 1.500 kg である。添付の表を利用して, 以下の問いに答えよ。

- (1) 容器内の圧力 $P_1 [\text{kPa}]$ はいくらか。
- (2) 飽和水の質量 $m' [\text{kg}]$ と飽和水蒸気の質量 $m'' [\text{kg}]$ を求めよ。
- (3) 飽和水と飽和水蒸気のエンタルピーの合計 $H_1 [\text{kJ}]$ を求めよ。
- (4) ヒーターを用いて, 飽和水と飽和水蒸気の温度が温度 $T_2 = 120^\circ\text{C}$ で熱的平衡状態となるまで $Q = 1.2 \text{ kW}$ の熱を容器内に定常的に加え続けた。加熱後の容器内の圧力 $P_2 [\text{kPa}]$ はいくらか。また, この過程に要した時間 $\Delta t [\text{s}]$ はいくらか。なお, ヒーターから放出された熱は直ぐに飽和水と飽和水蒸気に吸収され, 系における熱力学的状態の変化は準静的であるとして計算せよ。

水の飽和表 (温度基準) (1)

温度		圧力 MPa	比体積 m ³ /kg		密度 kg/m ³ ρ'	比エンタルピー kJ/kg			比エントロピー kJ/(kg·K)		
°C	K		v'	v''		h'	h''	$h''-h'$	s'	s''	$s''-s'$
*0	273.15	0.00061121	0.00100021	206.140	0.00485108	-0.04	2500.89	2500.93	-0.00015	9.15576	9.15591
0.01	273.16	0.00061166	0.00100021	205.997	0.00485443	0.00	2500.91	2500.91	0.00000	9.15549	9.15549
5	278.15	0.00087257	0.00100008	147.017	0.00680194	21.02	2510.07	2489.05	0.07625	9.02486	8.94861
10	283.15	0.0012282	0.00100035	106.309	0.00940657	42.02	2519.23	2477.21	0.15109	8.89985	8.74876
15	288.15	0.0017057	0.00100095	77.8807	0.0128401	62.98	2528.36	2465.38	0.22447	8.78037	8.55590
20	293.15	0.0023392	0.00100184	57.7615	0.0173126	83.92	2537.47	2453.55	0.29650	8.66612	8.36962
25	298.15	0.0031697	0.00100301	43.3414	0.0230726	104.84	2546.54	2441.71	0.36726	8.55680	8.18954
30	303.15	0.0042467	0.00100441	32.8816	0.0304122	125.75	2555.58	2429.84	0.43679	8.45211	8.01532
35	308.15	0.0056286	0.00100604	25.2078	0.0396702	146.64	2564.58	2417.94	0.50517	8.35182	7.84665
40	313.15	0.0073844	0.00100788	19.5170	0.0512373	167.54	2573.54	2406.00	0.57243	8.25567	7.68324
50	323.15	0.012351	0.00101214	12.0279	0.0831403	209.34	2591.31	2381.97	0.70379	8.07491	7.37112
60	333.15	0.019946	0.00101711	7.66766	0.130418	251.15	2608.85	2357.69	0.83122	7.90817	7.07696
70	343.15	0.031201	0.00102276	5.03973	0.198423	293.02	2626.10	2333.08	0.95499	7.75399	6.79899
80	353.15	0.047415	0.00102904	3.40527	0.293663	334.95	2643.01	2308.07	1.07539	7.61102	6.53563
90	363.15	0.070182	0.00103594	2.35915	0.423882	376.97	2659.53	2282.56	1.19266	7.47807	6.28542
100	373.15	0.10142	0.00104346	1.67186	0.598136	419.10	2675.57	2256.47	1.30701	7.35408	6.04706
110	383.15	0.14338	0.00105158	1.20939	0.826863	461.36	2691.07	2229.70	1.41867	7.23805	5.81938
120	393.15	0.19867	0.00106033	0.891304	1.12195	503.78	2705.93	2202.15	1.52782	7.12909	5.60128
130	403.15	0.27026	0.00106971	0.668084	1.49682	546.39	2720.09	2173.7	1.63463	7.02641	5.39178
140	413.15	0.36150	0.00107976	0.508519	1.96649	589.20	2733.44	2144.24	1.73929	6.92927	5.18998
150	423.15	0.47610	0.00109050	0.392502	2.54776	632.25	2745.92	2113.67	1.84195	6.83703	4.99508
160	433.15	0.61814	0.00110199	0.306818	3.25926	675.57	2757.43	2081.86	1.94278	6.74910	4.80633
170	443.15	0.79205	0.00111426	0.242616	4.12174	719.21	2767.89	2048.69	2.04192	6.66495	4.62303
180	453.15	1.0026	0.00112739	0.193862	5.15832	763.19	2777.22	2014.03	2.13954	6.58407	4.44453
190	463.15	1.2550	0.00114144	0.156377	6.39481	807.57	2785.31	1977.74	2.23578	6.50600	4.27022
200	473.15	1.5547	0.00115651	0.127222	7.86026	852.39	2792.06	1939.67	2.33080	6.43030	4.09950
210	483.15	1.9074	0.00117271	0.104302	9.58755	897.73	2797.35	1899.62	2.42476	6.35652	3.93176
220	493.15	2.3193	0.00119016	0.0861007	11.6143	943.64	2801.05	1857.41	2.51782	6.28425	3.76643
230	503.15	2.7968	0.00120901	0.0715102	13.9840	990.21	2803.01	1812.80	2.61015	6.21306	3.60291
240	513.15	3.3467	0.00122946	0.0597101	16.7476	1037.52	2803.06	1765.54	2.70194	6.14253	3.44059
250	523.15	3.9759	0.00125174	0.0500866	19.9654	1085.69	2801.01	1715.33	2.79339	6.07222	3.27884
260	533.15	4.6921	0.00127613	0.0421755	23.7105	1134.83	2796.64	1661.82	2.88472	6.00169	3.11697
270	543.15	5.5028	0.00130301	0.0356224	28.0722	1185.09	2789.69	1604.60	2.97618	5.93042	2.95424
280	553.15	6.4165	0.00133285	0.0301540	33.1631	1236.67	2779.82	1543.15	3.06807	5.85783	2.78975
290	563.15	7.4416	0.00136629	0.0255568	39.1285	1289.80	2766.63	1476.84	3.16077	5.78323	2.62246
300	573.15	8.5877	0.00140422	0.0216631	46.1615	1344.77	2749.57	1404.80	3.25474	5.70576	2.45102
310	583.15	9.8647	0.00144788	0.0183389	54.5290	1402.00	2727.92	1325.92	3.35058	5.62430	2.27373
320	593.15	11.284	0.00149906	0.0154759	64.6165	1462.05	2700.67	1238.62	3.44912	5.53732	2.08820
330	603.15	12.858	0.00156060	0.0129840	77.0179	1525.74	2666.25	1140.51	3.55156	5.44248	1.89092
340	613.15	14.600	0.00163751	0.0107838	92.7314	1594.45	2622.07	1027.62	3.65995	5.33591	1.67596
350	623.15	16.529	0.00174007	0.00880093	113.624	1670.86	2563.59	892.73	3.77828	5.21089	1.43261
360	633.15	18.666	0.00189451	0.00694494	143.990	1761.49	2480.99	719.50	3.91636	5.05273	1.13637
370	643.15	21.043	0.00222209	0.00494620	202.176	1892.64	2333.50	440.86	4.11415	4.79962	0.68547
373.946	647.096	22.064	0.00310559	0.00310559	322	2087.55	2087.55	0	4.41202	4.41202	0

* この行に示す状態では準安定な過冷却液体である。この温度と圧力で安定な状態は水である。