

化学工学Ⅱ

以下の5問題全てについて解答せよ。なお、各問題ごとに別々の解答用紙を用い、問題番号を明記すること。

問題1

図1に示すように、外乱 w が存在する化学プロセス $P(s)$ の制御を考える。 $P(s)$ は式(1)で与えられ、コントローラ K_b を用いて制御する。以下の問に答えよ。

$$P(s) = \frac{100}{(s+1)(s+10)^2} \quad (1)$$

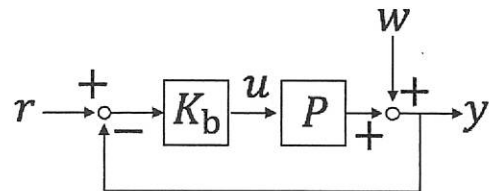


図1

- (a) $K_b = 50$ 、 $w = 0$ としたときの目標値 r から出力 y までの伝達関数を求めよ。
- (b) 図2に示すように、コントローラ K_f をさらに用いる場合を考える。

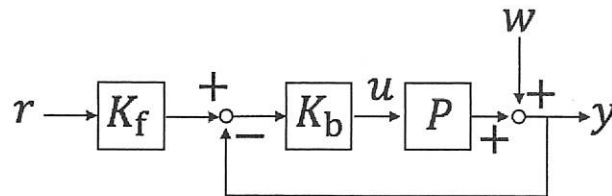


図2

- (b-1) $K_b = 50$ 、 $w = 0$ としたときの目標値 r から出力 y への伝達関数を $G_m(s) = \frac{20}{s+20}$ としたい。 K_f を求めよ。
- (b-2) 出力 y を目標値 r と外乱 w および $P(s)$ 、 K_b 、 K_f を用いて表せ。
- (b-3) プロセスの制御における K_b 、 K_f の主な役割を簡潔に説明せよ。

(次ページにつづく)

(問題1のつづき)

(c) $K_b = 1$ 、 $w = 0$ としたときの開ループ伝達関数 $G(s) = K_b P(s)$ のボード線図を図3に示す。この線図は正弦波を入力としたときの周波数特性を表す。縦軸はゲイン $|G(j\omega)|$ および位相 $\angle G(j\omega)$ を、横軸は角周波数 ω を示し、それぞれをゲイン線図、位相線図と呼ぶ。

(c-1) この線図から安定性の判別を行うと、 $\angle G(j\omega_{cp}) = -180^\circ$ に対して $|G(j\omega_{cp})| < 1$ であるため安定となる。この判別の条件で安定となる理由を簡潔に説明せよ。

(c-2) $\angle G(j\omega_{cp}) = -180^\circ$ となるときの角周波数 ω_{cp} を求めよ。ただし、計算過程も示せ。

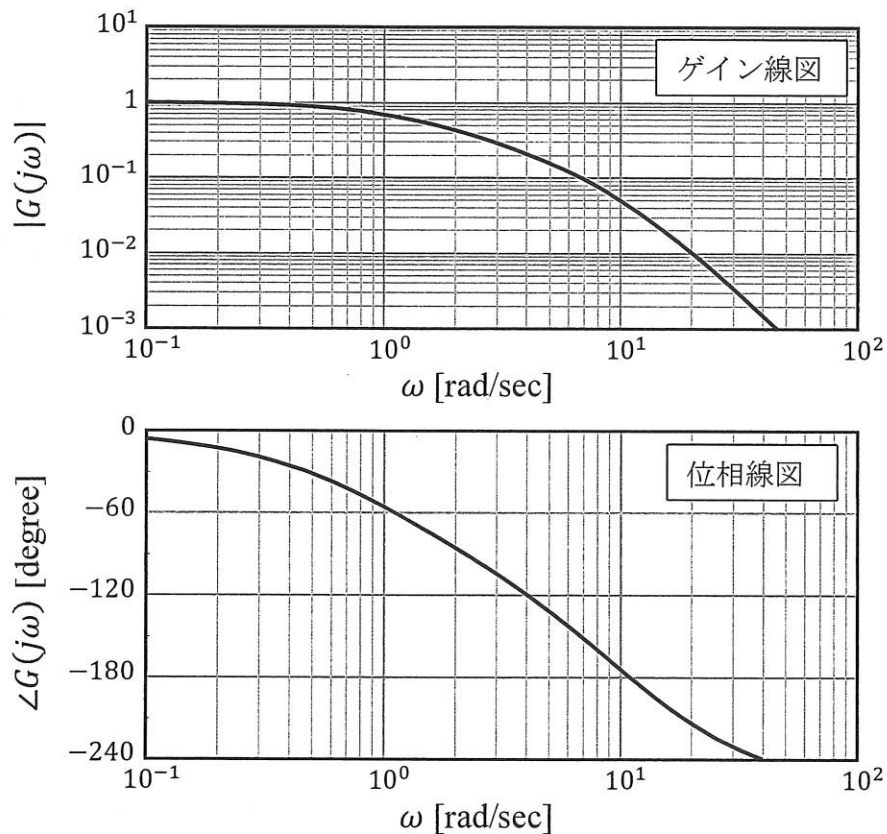


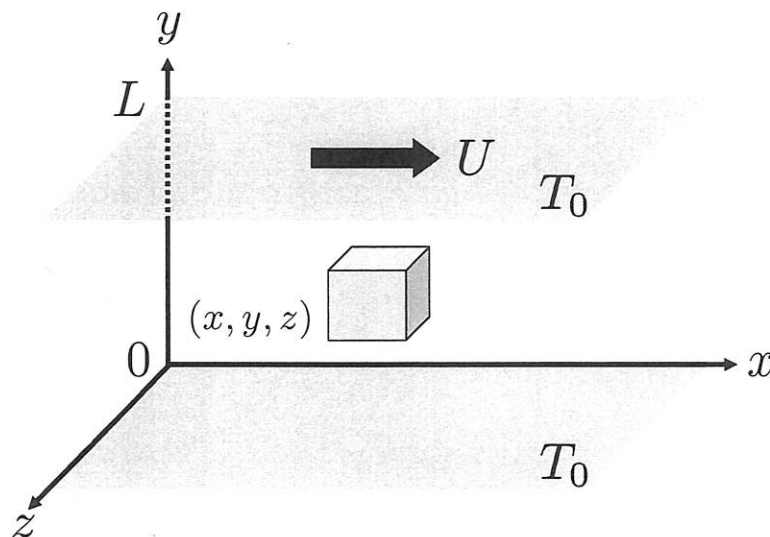
図3 ボード線図

問題2

高い粘性率を持つ流体において速度勾配が大きいとき、粘性摩擦によって運動エネルギーが熱エネルギーへ変換され、流体温度の上昇が無視できないことがある。この粘性による発熱を、図のような十分に広い2枚の平行平板間に注入された、粘性率 μ 、熱伝導率 k を持つ非圧縮性ニュートン流体の定常流れで考える。

2枚の平板の温度はいずれも T_0 で一定に保たれている。平板間の距離を L のまま、一方の平板を静止させ、もう一方の平板を一定の速度 U で動かしたところ、流れは定常となった。平板の移動方向に x 軸、平板に対して垂直方向に y 軸、また x 軸と y 軸と垂直になるように z 軸を取る。 L が十分に小さいとき、流体の流れは x 軸方向のみに生じ、その速度分布は $u(y) = \frac{U}{L}y$ とあらわされる。さらに、流体の温度変化は y 軸方向のみに生じるものとし、その分布を $T(y)$ とする。

重力の効果は無視できるものとして、以下の問に答えよ。なお、図中に示された微小流体要素は、ひとつの頂点が座標 (x, y, z) にあり、 x 、 y 、 z 軸方向に微小長さ Δx 、 Δy 、 Δz を持つ直方体であり、その体積は ΔV である。また、関数 $f(x)$ の微小量 Δx に対する近似式 $f(x + \Delta x) \cong f(x) + \frac{df}{dx}\Delta x$ を用いてよい。



(次ページにつづく)

（問題2のつづき）

- (a) 微小流体要素の上面および下面に作用するせん断応力をそれぞれ求めよ。
- (b) 単位時間あたりに、微小流体要素がせん断応力によりなされた正味の仕事を求めよ。
- (c) 単位時間あたりに、微小流体要素から熱伝導により流出した正味の熱量を求めよ。
- (d) (b)と(c)の結果から、微小流体要素におけるエネルギー保存を考慮することにより、流体の温度分布 $T(y)$ を求めよ。
- (e) 流体の最高温度を求めよ。

問題3

抽質(成分A : 50 wt%)と原溶媒(成分B : 50 wt%)から成る原料(液重量 F [kg])から抽剤液(成分C : 100 wt%)を用いて、成分Aの抽出を行う。下図および専用の解答用紙に示す溶解度曲線を用いて、以下の間に答えよ。ただし、解答に必要な記号があれば、その定義を明確にして使用すること。

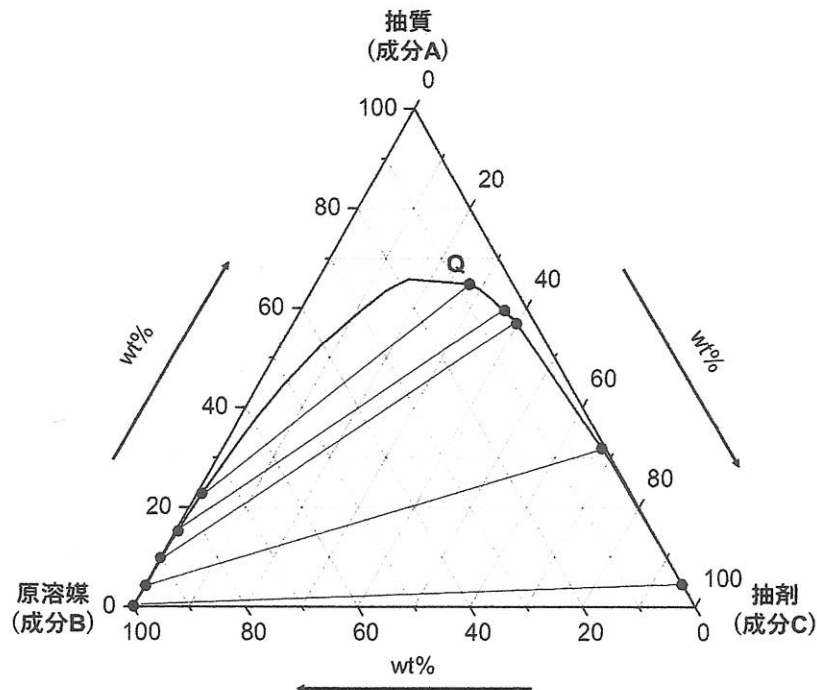


図 3成分系の溶解度曲線およびタイライン

- (a) 単抽出および多回抽出について考える。
- (a-1) 二相分離可能な抽剤の最小量を求めよ。
- (a-2) 液量 $F/4$ [kg]の抽剤で抽出した場合、一回目の抽出液の組成点 E_1 、抽残液の組成点 R_1 を解答用紙の図中に示せ。ただし、作図に使用した線は残すこと。
- (a-3) 液量 $F/2$ [kg]の抽残液(組成点 R_1)に対して、液量 $F/8$ [kg]の抽剤で抽出した場合、抽出液の組成点 E_2 、抽残液の組成点 R_2 を解答用紙の図中に示せ。ただし、作図に使用した線は残すこと。
- (a-4) 一度の抽出操作のみで、(a-3)で求めた点 R_2 の組成の抽残液を得た。この時、必要な抽剤量を求めよ。

(次ページにつづく)

(問題3のつづき)

- (b) 抽出後、図に示す点 Q の組成の抽出液を得た。回収した抽出液(抽出液量 Q [kg])に対して、液量 xQ ($x > 0$) [kg] の原溶媒(成分 B)を加え、平衡とした。
- (b-1) この時、 x の増加に伴う抽出液(抽剤側)の組成の変化を解答用紙の図に示し、その理由を簡潔に説明せよ。
- (b-2) (b-1)の操作後、抽出液(抽剤側)を回収し、抽剤を蒸発により完全に除去した。この時、 x の増加に伴い、成分 B に対する成分 A の割合は①増加、②減少、③一定のいずれの挙動を示すか、解答用紙の図を用いて簡潔に説明せよ。

問題4

固体触媒を充填した流通管型反応器に関する以下の問に答えよ。

- (a) 流通管型反応器は、微分型反応器と積分型反応器に大別される。それぞれの特徴を挙げよ。
- (b) 積分型反応器を用いて得られた反応試験のデータを積分法により解析する。以下の問に答えよ。
- (b-1) 式(1)は積分型反応器の解析に用いる基礎式である。管型反応器の微小空間における物質収支を考えることにより、式(1)を導出せよ。 X_A は反応物Aの転化率、 W は触媒充填量[kg]、 F_{A0} は反応器入口での反応物Aの物質流量[mol/h]、 $-r_A$ は触媒質量あたりの反応速度[mol/(kg·h)]である。

$$\frac{W}{F_{A0}} = \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{-r_A} \quad (1)$$

- (b-2) 1次反応（反応速度定数 k ）と仮定すると式(2)が成り立つことを示せ。導出過程が分かるように書くこと。ここで、 ε_A は体積変化率であり、 C_{A0} は反応器入口での反応物Aの濃度[mol/m³]である。

$$k \frac{WC_{A0}}{F_{A0}} = -(1 + \varepsilon_A) \ln(1 - X_A) - \varepsilon_A X_A \quad (2)$$

- (b-3) 流通管型反応器を用いて触媒を必要とする気相反応 $A \rightarrow 4R$ の反応実験を行った。反応器内の圧力は 3.324×10^5 Pa、温度は 400 K であり、反応器内で均一である。Aの純ガスを体積流量 2.0×10^{-2} m³/h で供給した。触媒充填量を変化させ、出口ガス中のAの濃度を測定したところ、以下の結果を得た。

Run	1	2	3
触媒充填量 W [kg]	0.080	0.16	0.32
Aの出口濃度 $C_{A, out}$ [mol/m ³]	60	50	42

(次ページにつづく)

(問題4のつづき)

この触媒反応が1次反応であるかどうか、積分法を用いて判別せよ。その際に用いたグラフの概略を示せ。すべての気体は理想気体とし、触媒内の細孔内拡散抵抗、触媒粒子周囲の境膜抵抗の影響は無視できるとする。気体定数は $R = 8.31 \text{ J/(K}\cdot\text{mol)}$ とする。

(c) 問 (b-3) において、反応速度式が複雑な場合、速度式を仮定せずに、微分法により反応速度式を求めることができる。 W と $C_{A \text{ out}}$ の実験データから、微分法により反応速度の濃度依存性を求める手順を述べよ。また、その際に用いたグラフの概略を示せ。ただし、数値の計算は不要である。

問題5

ミキサーを使った水蒸気の混合プロセスを考える。定常状態で、100℃の飽和水蒸気（流路①）と300℃、1.0 MPaの過熱水蒸気（流路②）をミキサーで混合し、250℃、300 kPaの水蒸気（流路③）を生成させる（図1）。このとき、飽和水蒸気の質量流速は1.5 kg・s⁻¹、ミキサーでの熱損失は2.0 kW、周囲の環境温度は25℃である。運動エネルギーとポテンシャルエネルギーを無視できるとして、以下の問に答えよ。

必要があれば、次式で表される流れ系の質量収支式、エネルギー収支式、エントロピー収支式を参考にせよ。

$$\frac{dm}{dt} = \sum_k \dot{m}_k$$

$$\frac{dE}{dt} = \sum_k \dot{m}_k H_{m,k} + \dot{Q} + \dot{W}$$

$$\frac{dS}{dt} = \sum_k \dot{m}_k S_{m,k} + \frac{\dot{Q}}{T_e} + \dot{S}_{\text{prod}}$$

m [kg] : 流体の全質量、 t [s] : 時間、 \dot{m}_k [kg・s⁻¹] : 質量流速、 E [kJ] : 流体の全エネルギー、 $H_{m,k}$ [kJ・kg⁻¹] : 単位質量当たりのエンタルピー、 $\dot{Q} (= \dot{Q}_{\text{in}} - \dot{Q}_{\text{out}})$ [kW] : 単位時間に系に流出入した熱、 $\dot{W} (= \dot{W}_{\text{in}} - \dot{W}_{\text{out}})$ [kW] : 単位時間に系に流出入した仕事、 S [kJ・K⁻¹] : 流体の全エントロピー、 $S_{m,k}$ [kJ・kg⁻¹・K⁻¹] : 単位質量当たりのエントロピー、 T_e [K] : 環境温度、 \dot{S}_{prod} [kJ・s⁻¹・K⁻¹] : 系内で生成した単位時間当たりのエントロピー、 k : 流路の番号、 T : 温度、 P : 圧力。

- ミキサーにおける水蒸気の質量収支式およびエネルギー収支式を示せ。
- 図2に水蒸気のエンタルピー－エントロピー線図を示す。流路①～③におけるエンタルピーとエントロピーの値を、それぞれ有効数字3桁と2桁で読み取れ。
- 流路③の水蒸気の質量流速 \dot{m}_3 [kg・s⁻¹]を求めよ。
- このプロセスで単位時間あたりに生成するエントロピー \dot{S}_{prod} [kJ・s⁻¹・K⁻¹]を求めよ。

(次ページへつづく)

(問題5のつづき)

(e) 熱損失がなく可逆的に運転できるようにミキサーを改良した場合、流路①と②の条件を固定した状態で流路③の温度と圧力を有効数字2桁で求めよ。ただし、各流路における水蒸気の質量流速は変わらないものとする。

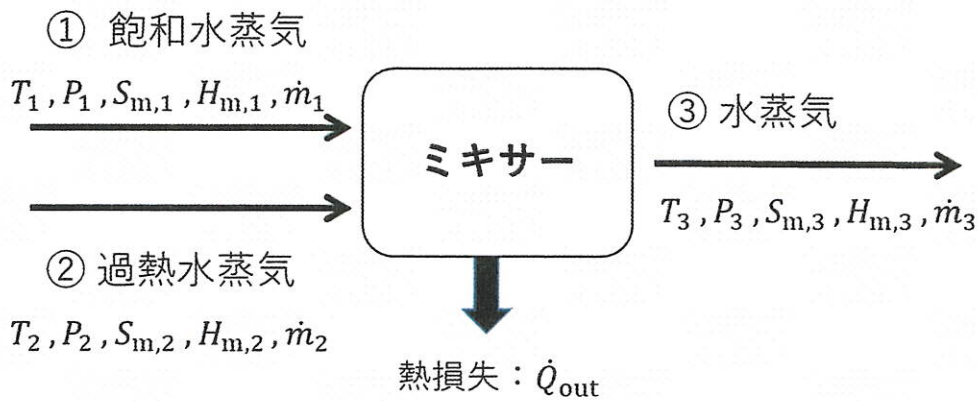


図1 ミキサーを使った水蒸気の混合プロセス

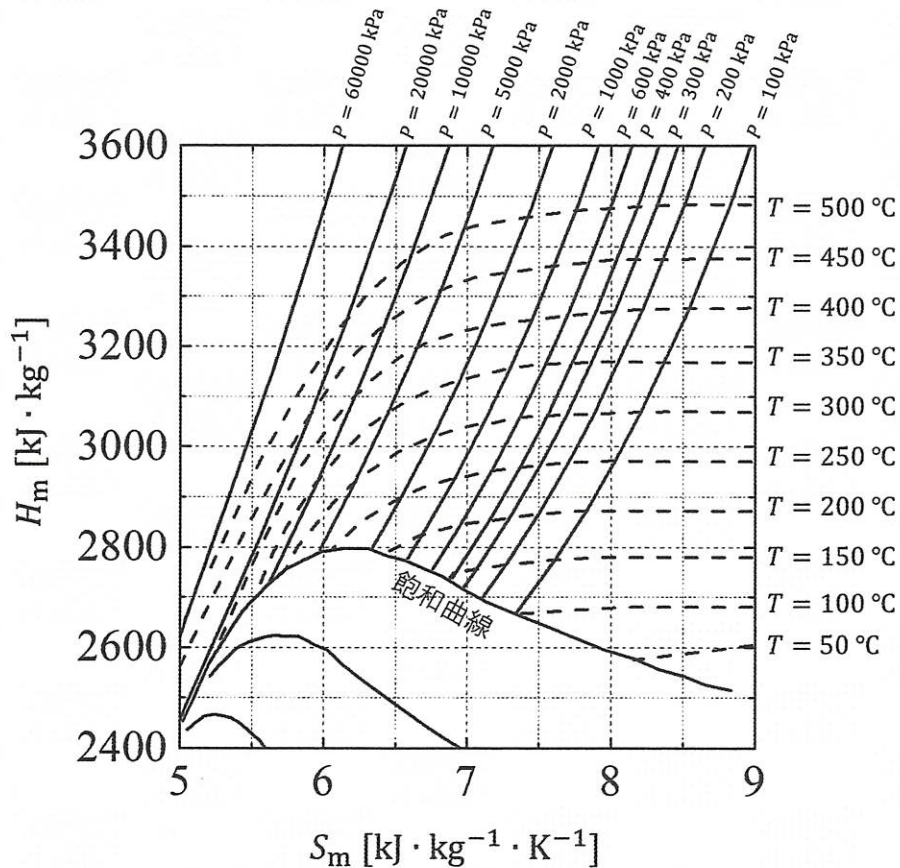


図2 水蒸気のエンタルピー－エントロピー線図