

化 学 工 学 II

以下の6問題の中から5問題を選択して解答せよ。なお、各問題ごとに別々の答案用紙を用い、問題番号を明記すること。問題3の問(b-1)および問題5の問(b)の解答には、専用の答案用紙を使用すること

問題1

定常状態で流れている非圧縮性ニュートン流体について考える。流れが二次元であり、かつ重力の効果、温度分布、濃度分布が無視できるとき、流動現象は式(1)から式(3)で表すことができる。

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + v \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

ここで、 u_x 、 u_y は x および y 方向速度、 p は圧力、 ρ は密度、 v は動粘度である。

x 方向に一定速度 u_∞ で流れる層流中に水平に置かれた平板上の層流境界層について考える。ただし、流体は $x=0$ で平板に接し、平板先端で流れに乱れは発生しないものとする。また、平板表面を $y=0$ とし、境界層厚みを δ とする。

(問題1のつづき)

以下の間に答えよ。

(a) 式(1)から式(3)の各項の大きさの程度 (order of magnitude) を比較することにより層流境界層方程式を導出したい。

(a-1) 境界層厚み δ は u_∞ の $1/2$ 乗に反比例することを示せ。

(a-2) 境界層内で圧力は一定値となることを示せ。

(a-3) 境界層方程式が式(1)、式(4)で表されることを示せ。

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \quad (4)$$

(b) 次に層流境界層内速度分布を求める。ここでは a 、 b 、 c 、 d の4つの係数を用い、 u_x を式(5)で表すこととする。

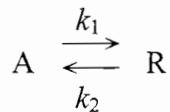
$$u_x = a + by + cy^2 + dy^3 \quad (5)$$

(b-1) 速度分布決定に必要な境界条件を理由とともに示せ。

(b-2) 境界層内速度分布 u_x/u_∞ を y/δ の関数で表せ。

問題2

次式で示す1次可逆反応に関する以下の間に答えよ。



ここで、 k_1 、 k_2 は、それぞれ正反応、逆反応の速度定数を示す。なお、平衡定数 K の値は既知とする。以下の問では、反応は一定温度で行うものとする。

- (a) 回分反応において、Aの濃度 C_A と反応時間 t の関係を表す次の設計式について、(①)、(②)、(③)に入る式を示せ。導出過程も示すこと。ただし、原料中にRは含まれず、Aの初濃度は C_{A0} である。

$$C_A = (①) + (②) \exp\{(③)t\}$$

- (b) 回分反応において C_A の経時変化を測定した。これらの測定データをグラフ用紙上にプロットし直線回帰により反応速度定数を求める方法を説明せよ。ただし、原料中にRは含まれず、Aの初濃度は C_{A0} である。解答には、プロット図の概略も示すこと。

- (c) 連続式の攪拌槽型反応器(CSTR)および管型反応器(PFR)を用いて反応を実施する。反応器入口での原料供給速度を徐々に遅くすると、反応器出口におけるAの転化率(反応率) X_A は反応器の形式に依存しない一定の値に漸近する。このことを、各反応器の設計式に基づいて説明せよ。ただし、供給原料中にRは含まれず、Aの濃度は C_{Af} である。

問題3

以下の気液反応について二重境膜説に基づいて考える。



気相内成分 A (分圧 p_A) が液相へ溶解しながら成分 B と反応する。この反応は、反応速度 $-r_A = kC_A C_B$ (k は反応速度定数、 C_A , C_B はそれぞれ A, B の液相濃度) にて進行する。

なお、界面における A のガス分圧 p_{Ai} と液相濃度 C_{Ai} には $p_{Ai} = HC_{Ai}$ (H は Henry 定数) なる平衡関係が成立立つとする。A, B の液相本体濃度はそれぞれ C_{AL} , C_{BL} 、気相中の A の拡散係数は D_{AG} 、液相中の A, B の拡散係数は D_A , D_B 、液相単位体積あたりの界面積は a 、気相側、液相側の境膜厚みは δ_G と δ_L である。以下の間に答えよ。

(a) 反応速度が遅く、界面近傍における A, B の分圧および液相濃度分布が図 1 のようになる場合を考える。

(a-1) 反応速度を以下の式で表す。 (①)、(②)、(③) に入る数式を示せ。ただし、導出過程も示すこと。

$$-r_A = p_A / \{1/(①) + H/(②) + H/(③)\}$$

(a-2) 液相を激しく攪拌した場合でも、B の濃度を A の濃度に対して過剰にした場合でも反応速度は変化しなかった。この反応系の律速過程を説明し、反応速度式を示せ。

(b) 液境膜内で各成分が接触した瞬間に反応が完結する場合を考える。

(b-1) 界面近傍における A の分圧、A, B の液相濃度分布を、専用の答案用紙の図中に示せ。

(b-2) A の吸収速度は、物理吸収のみの場合より何倍大きくなるか示せ。

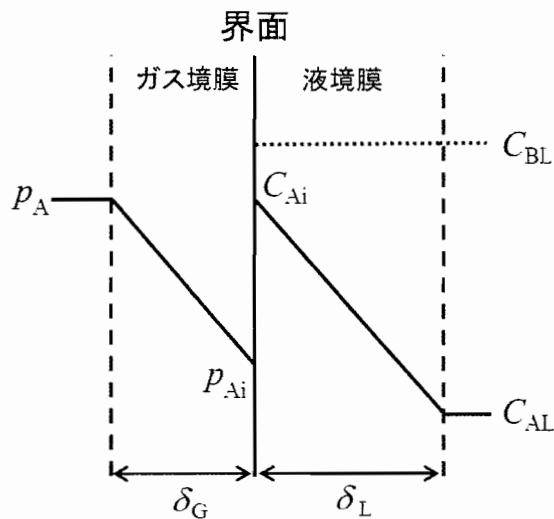


図 1

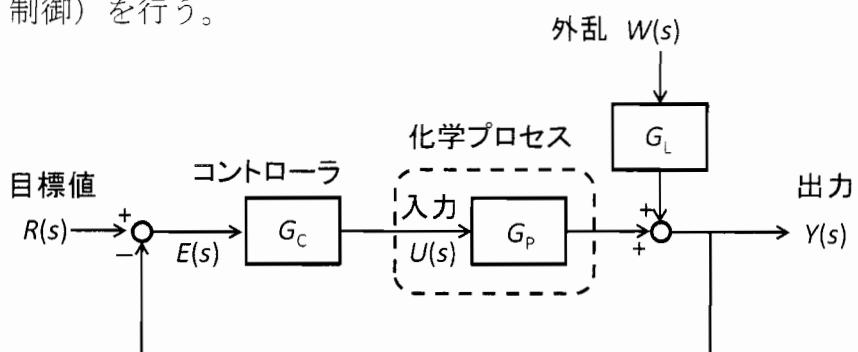
問題4

フィードバック制御に関する以下の間に答えよ。

- (a) 式(1)が成り立つことを証明せよ。 $F(s)$ は $f(t)$ のラプラス変換、 t は時間、 s はラプラス変換パラメータである。

$$\lim_{s \rightarrow 0} sF(s) = \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) \quad (1)$$

- (b) 入力 $U(s)$ 、出力 $Y(s)$ 、外乱 $W(s)$ 、伝達関数 G_P の化学プロセスをフィードバック制御する。そのブロック線図を下に示す。 $U(s)$ 、 $Y(s)$ 、 $W(s)$ 、 $E(s)$ 、 $R(s)$ は、それぞれ、入力 $u(t)$ 、出力 $y(t)$ 、外乱 $w(t)$ 、偏差 $e(t)$ 、出力の目標値 $r(t)$ のラプラス変換である。また、 G_C 、 G_L はそれぞれコントローラ、外乱の伝達関数である。ここで、 $G_C = K$ の比例制御（P制御）を行う。



- (b-1) 外乱による出力の変動に対して、どのような制御を行っているか、図中の記号を使って説明せよ。

- (b-2) 出力 $Y(s)$ を目標値 $R(s)$ と外乱 $W(s)$ および伝達関数を用いて表せ。

- (b-3) 出力 $Y(s)$ は定常値からの変動、目標値 $R(s)$ は 0 である。 $G_P = 2/(3s + 1)$ および $G_L = 1/(3s + 1)$ のとき、外乱 $w(t)$ がステップ状に 1 だけ変化した場合について考える。定常状態での $y(t)$ を式(1)を用いて求め、P 制御では変動前の値に戻らないことを示せ。

- (c) ステップ応答 $y(t)$ は、比例制御（P制御）では変動前の値に戻らないが、比例制御に積分制御を加える（PI制御にする）と変動前の値に戻ることを示せ。ただし、 $R(s)$ 、 G_P および G_L は問(b-3)と同じであり、 $G_C = K \{ 1 + 1/(sT) \}$ とする。ここで T は積分時間である。

問題5

精留塔に関する以下の間に答えよ。

(a) 図1に示す精留塔を用い、大気圧下で2種類の揮発性成分の混合物(理想溶液)を分離するプロセスを考える。沸点の液をモル流量 F_1 で供給し(原料①)、塔頂および塔底から留出液および缶出液を回収し、塔頂では還流する。ここで、McCabe-Thieleの仮定が成立するものとする。

(a-1) 濃縮部における操作線を表す式を導出せよ。

(a-2) $x-y$ 線図を用いて所要理論段数を求めたい。その手順を箇条書きで示せ。ただし、供給段における物質収支を考慮すること。

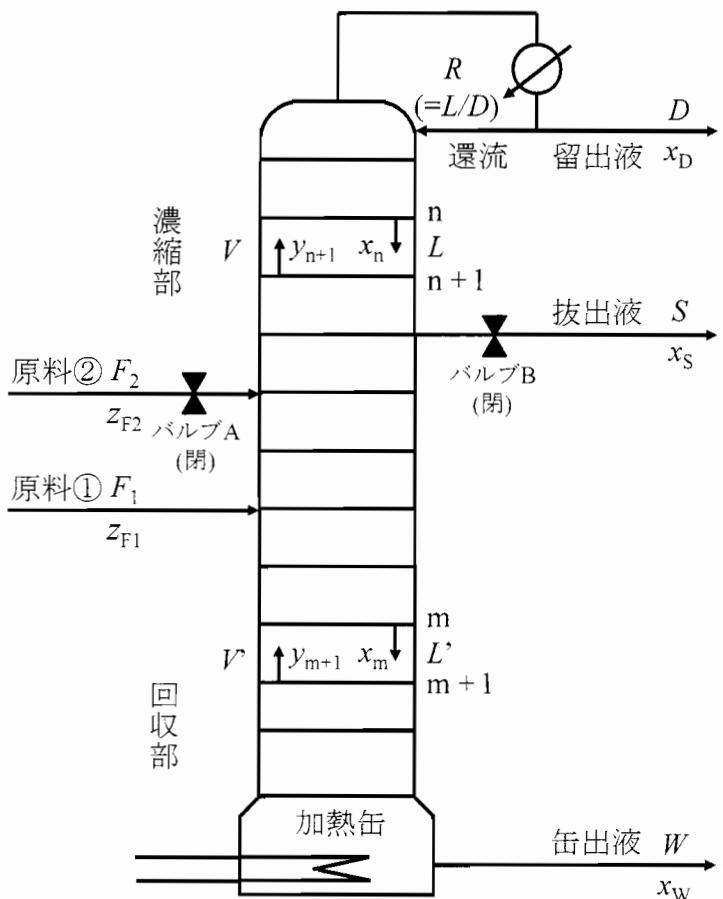


図1

使用記号一覧

- F_1 : 原料①のモル流量
- D : 留出液のモル流量
- W : 缶出液のモル流量
- L : 濃縮部液のモル流量
- L' : 回収部液のモル流量
- V : 濃縮部蒸気のモル流量
- V' : 回収部蒸気のモル流量
- F_2 : 原料②のモル流量
- S : 拔出液のモル流量
- R : 還流比 ($=L/D$)

- z_{F1} : 原料①における低沸点成分のモル分率
- x_D : 留出液中における低沸点成分のモル分率
- x_W : 缶出液中における低沸点成分のモル分率
- x_n : 濃縮部液における低沸点成分のモル分率
- x_m : 回収部液における低沸点成分のモル分率
- y_{n+1} : 濃縮部蒸気における低沸点成分のモル分率
- y_{m+1} : 回収部蒸気における低沸点成分のモル分率
- z_{F2} : 原料②中の低沸点成分のモル分率
- x_S : 拔出液中の低沸点成分のモル分率
- m : 原料供給段から数えた回収部の段数
- n : 塔頂から数えた濃縮部の段数

(問題5のつづき)

(b) 問(a)の条件において、以下のようにバルブ操作した場合、操作線の概略を専用の答案用紙の $x-y$ 線図上に示せ。ただし、説明記述欄にその根拠を簡潔に説明し、図中には記号を明記すること。

(b-1) バルブ A のみ (原料②) を開き、沸点の蒸気 ($z_{F1} < z_{F2}$) をモル流量 F_2 で供給する。

(b-2) バルブ B のみ (拔出液) を開き、モル流量 S で液体を抜き出す。

(c) 問(b-1)および問(b-2)で行う操作が分離にもたらす効果を、それぞれ簡潔に記せ。

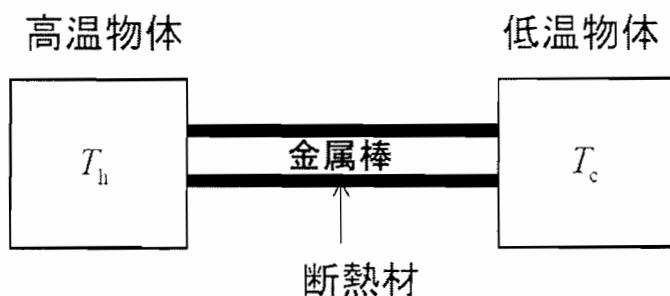
問題6

熱容量 (C_V) がともに等しい高温物体 (温度 : T_h) と低温物体 (温度 : T_c) 間での熱の移動を考える。ただし、熱の移動による物体の体積変化は無視でき、 C_V は温度に依存しない。以下の間に答えよ。

(a) 高温物体と低温物体を直接接触させた場合を考える。下記のいずれの場合でも、両物体の最終温度を T_f とする。

- (a-1) 両物体のエントロピーの変化量 ΔS を C_V 、 T_h 、 T_c を用いて表し、エントロピーが増加していることを示せ。
- (a-2) 外界の熱源と熱のやりとりをしながら可逆的に変化した場合、物体と熱源を合わせた全エントロピー変化 ΔS_{total} を求めよ。また、熱源との接触を絶った場合の不可逆変化における全エントロピー変化 ΔS_{total} も求めよ。

(b) 下図に示すように、断熱材で被覆された金属棒で高温物体と低温物体を連結した場合の熱移動を考える。このとき、金属棒は一様で熱の移動による体積変化はなく、高温および低温物体の温度は変化しない。ただし、金属棒の長さ、断面積、熱伝導率をそれぞれ L 、 A 、 k とする。



- (b-1) 金属棒を通じて dQ の熱が高温物体から低温物体へ移動するとき、系全体のエントロピーの変化量 dS を求めよ。
- (b-2) 定常状態における熱流束 q を求めよ。
- (b-3) 定常状態における単位時間あたりのエントロピーの変化量 dS/dt を L 、 A 、 k 、 T_h 、 T_c を用いて表し、正となることを示せ。