



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解答用紙を用い、問題番号を明記すること。ただし、問題6を選択する場合、解答には専用の解答用紙の表・裏のみを使用し、通常の解答用紙のうち1枚は白紙で提出すること。

問題1

容器中で静止している流体の温度は壁面の温度と等しくなるが、流体が流れている場合には、粘性による発熱のため流体の温度は上昇する。いま壁面の温度が一定温度 T_0 に保たれた半径 R の静止した円管内に、軸対称に流れが十分に発達している場合を考える。以下の間に答えよ。ただし、流体は非圧縮性流体であり、壁面での流体速度は0とし、円管の軸方向の圧力勾配は一定とする。また、周方向の速度は無視できるものとする。

(a) 座標系 (r, z) において、連続の式と z 軸方向の運動量収支式は次式で表される。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(r u_r)}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

ここで ρ は密度、 u_i は i 方向の流体速度、 p は圧力、 μ は粘度、 t は時間を表す。

(a-1) 定常状態において式 (2) が次式のように簡略化できるとき、どのような仮定に基づいているか述べよ。

$$\mu \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{du_z}{dr} \right) = \frac{dp}{dz} \quad (3)$$

(a-2) 定常状態における流体の速度分布を求めよ。

(次ページにつづく)

（問題 1 のつづき）

（b）定常状態においてエネルギー収支式は次式のように簡略化できる。

$$k \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = -\mu \left(\frac{du_z}{dr} \right)^2 \quad (4)$$

ここで T は流体の温度、 k は熱伝導率を表す。定常状態における流体の温度分布を求めよ。

（c）粘性による単位質量当たりのエントロピー生成 $\partial S_m / \partial t$ は次式で表される。

$$\frac{\partial S_m}{\partial t} = \frac{\mu}{\rho T} \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} \right)^2 \quad (5)$$

流れが定常のとき、粘性によって発生した単位時間・単位質量当たりの発熱量 U_m を、半径方向の座標 r の関数として求めよ。

問題2

以下の自触媒反応について、



成分Aの反応速度 r_A は次式で与えられるものとする。

$$-r_A = kC_A C_R \quad (2)$$

ここで、 k は反応速度定数、 C_A 、 C_R はそれぞれ成分A、Rの濃度である。

- (a) 反応速度が最大となるAの濃度 C_{Amax} を、原料液中のA、Rの濃度 C_{A0} および C_{R0} を用いて表せ。

いま、 $C_{A0}=0.9 \text{ kmol}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $C_{R0}=0.1 \text{ kmol}\cdot\text{m}^{-3}$ の原料液を用い、連続操作で運転する反応器により、Aの最終出口濃度を $C_{Af}=0.1 \text{ kmol}\cdot\text{m}^{-3}$ としたい。ただし、反応器は温度一定のもとで運転し、原料液供給速度 $v_0=9 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $k=1 \text{ m}^3\cdot\text{kmol}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ とする。

- (b) 攪拌槽型反応器（CSTR）を単独で用いる場合の反応器体積 V_c を求めよ。

- (c) 管型反応器（PFR）を単独で用いる場合の反応器体積 V_p を求めよ。

- (d) CSTRとPFRを組み合わせて用いる場合について考える。

(d-1) 両反応器の体積の和が最小となる組み合わせ配置を記せ。また、その理由を C_A （横軸）と $-1/r_A$ （縦軸）の関係を示す概略図を用いて説明せよ。

(d-2) 両反応器の体積の和の最小値 V_{min} を求めよ。

問題3

図1のような体積 V の流通槽型反応器を用いて、反応速度が $r_A = -kC$ で表される反応を行う。 C は成分Aの濃度、 k は反応速度定数である。入口濃度 C_i を一定とし、反応容器内は完全混合とする。ただし、 t を時間、 s をラプラス変換パラメータ、体積流量を $F(t)$ 、出口濃度を $C_f(t)$ とする。以下の問に答えよ。

- (a) $C_f(t)$ の時間変化を表す物質収支式を記せ。
- (b) 体積流量と出口濃度の定常値 F_0 、 C_{f0} からの微小変化をそれぞれ $\Delta F(t)$ 、 $\Delta C_f(t)$ とする。 $\Delta F(s)$ を入力変数、 $\Delta C_f(s)$ を出力変数とみなした場合の伝達関数 $G_p(s)$ は $K/(Ts+1)$ と表せる。 K および T を求めよ。
- (c) 図2のような制御系を用いて、出口濃度の目標値の微小変化 $\Delta C_f^*(s)$ からの偏差に比例して流量を調整するとき、そのブロック線図を描け。ただし、 ΔC_f^* は目標値、 Δe は誤差信号、 $G_c(s)$ と Δp_F はフィードバックコントローラの伝達関数と出力、 $G_u(s)$ は操作端伝達関数とする。
- (d) 出口濃度の目標値をステップ状に δC_f^* 変化させる。出口濃度の微小変化 ΔC_f の応答を K 、 T 、 δC_f^* を用いて表し、定常値を求めよ。ただし、 $G_c(s) G_u(s) = a$ (一定) とする。

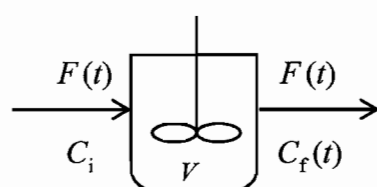


図1

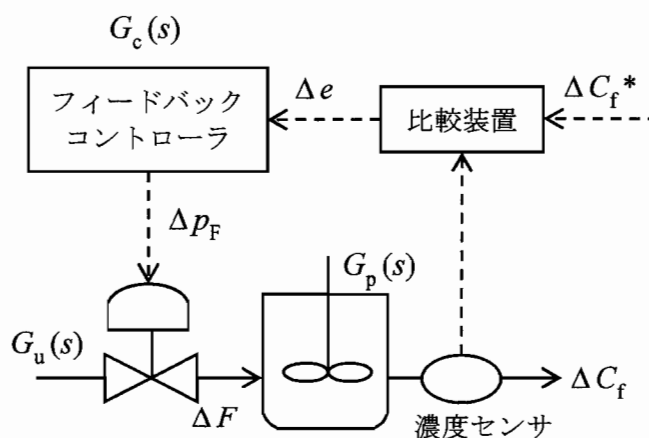


図2

問題4

充填塔にCO₂ガスを含む空気を導入し、CO₂の90%を回収する操作を行う。 L 、 G は液相および気相のモル流量であり、 x_j 、 y_j は液相および気相中のCO₂のモル分率($j=B$: 塔底、 T : 塔頂)である。CO₂濃度は希薄であり、気相と液相におけるガス成分のモル分率には、 $y^* = mx$ なる平衡関係が成立する(m : 平衡定数)。また、 N_{OG} は気相基準総括移動単位数、 H_{OG} は気相基準総括移動単位高さとする。

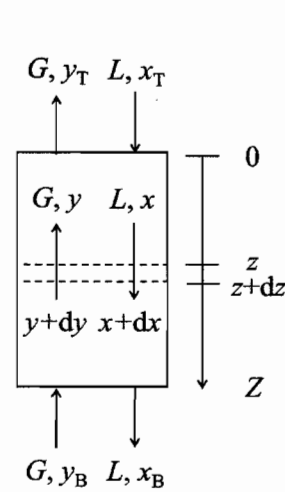


図1

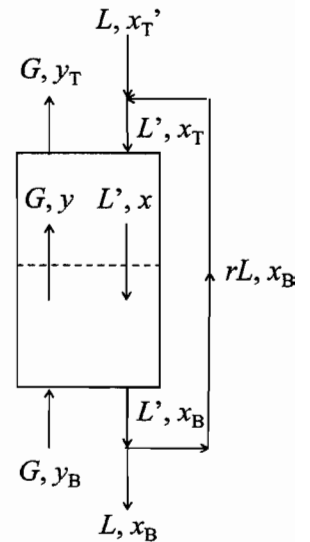


図2

(a) 純水を用いたCO₂ガス吸収操作を考える(図1)。

(a-1) 液相のモル流量を最小理論量の2倍で操作した場合、操作線の式を m 、 y_B を用いて表せ。

(a-2) 塔内の任意の位置における微小区間 dz の物質収支より、塔高さ Z と N_{OG} および H_{OG} との関係を導出せよ。ここで、気相基準総括物質移動係数を K_y 、充填塔単位体積あたりの気液界面積を a とする。

(b) ガス吸収操作における循環の影響を考える(図2)。ここで、 r は循環比、 L' は水相のモル流量、 x_T' は純水導入部における液相中のCO₂のモル分率である。

(b-1) 操作線の式を G 、 L 、 r 、 y_B を用いて表せ。

(b-2) x - y 線図上に、 $r=0$ および $r=r$ の場合における操作線ならびに平衡線を描け。ただし、 x_B 、 x_T 、 y_B 、 y_T を図中に明示すること。この図に基づき、循環操作が N_{OG} におよぼす影響について、理由を付して簡潔に記述せよ。

(c) 図1の充填塔において、純水の代わりにモノエタノールアミン水溶液を導入する。問(b-2)と同様に、 x - y 線図上に操作線ならびに平衡線を描け。この図に基づき、物理吸収と化学吸収における N_{OG} の大小について、理由を付して簡潔に記述せよ。

問題5

真空中に置かれている2枚の平行平板間のふく射伝熱について考える。平板の透過率は0であり、面積は十分大きく、互いに向かい合う面（面1、面2）以外への伝熱は無視できるものとする。また Stefan-Boltzmann 係数を $\sigma [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$ とする。

- (a) 面1、面2がともに黒体で、高温側温度が $T_1 [\text{K}]$ 、低温側温度が $T_2 [\text{K}]$ の場合、高温面から低温面に伝わる単位面積あたりの放射伝熱量 Q を示せ。単位を明示すること。
- (b) 次に面1が黒体で、面2が放射率 ϵ_2 、吸収率 α_2 の灰色体である場合を考える。面1より放射された熱量 $E_1 [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$ のうち、一部は面2に吸収され、残りは反射される。反射された熱および面2から放射された熱量は全て面1に吸収される。定常状態においては両面の温度が等しくなることより、放射率と吸収率の値が等しいことを示せ。
- (c) 最後に、面1、面2がともに灰色体である場合について考える。ここで面1の温度および放射率を $T_1 [\text{K}]$ 、 ϵ_1 、面2の温度および放射率を $T_2 [\text{K}]$ 、 ϵ_2 とする。

- (c-1) 面1から面2に伝わる単位面積あたりの放射伝熱量 Q は、定常状態においては式(1)となることを示せ。必要であれば式(2)の関係を用いても良い。

$$Q = \frac{\sigma}{(1/\epsilon_1) + (1/\epsilon_2) - 1} (T_1^4 - T_2^4) \quad (1)$$

$$1 + x + x^2 + \cdots = \frac{1}{1 - x} \quad (0 \leq x < 1) \quad (2)$$

- (c-2) 面1、面2の放射率がともに ϵ のとき、同じく放射率 ϵ の遮蔽板を面1と面2の間に平行に挿入した。遮蔽板は極めて薄く、板を通しての熱伝導は無視できる。定常状態においては面1と面2の間の伝熱量は遮蔽板挿入前の半分となることを示せ。

問題 6

原溶媒 A、抽剤 B、抽質 C から成る 3 成分系では、図 1 に示す相平衡が成立する。以下の問に答えよ。ここで、原料液(点 F)の流量は F 、抽剤液(点 B)の流量は S とする($F/S=3/2$)。

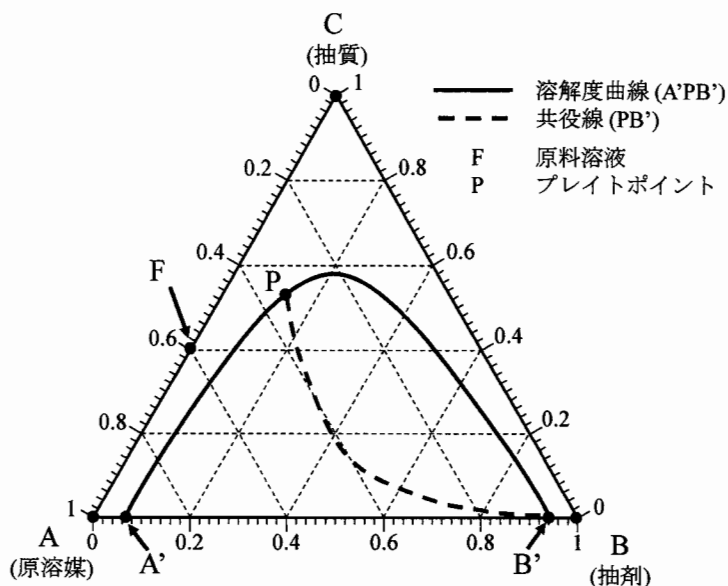


図 1

- (a) 単抽出操作について考える。混合溶液、抽出液、抽残液の抽質組成を、点 M、点 E、点 R として解答用紙の図中に示せ。また、その手順を簡潔に説明せよ。

- (b) 向流多段抽出操作について考える(図 2)。一方の端から原料(流量 F)、他端から抽剤(流量 S)が入り、 n 段の抽出操作の後に、抽残液(抽質成分 C のモル分率 $x_n = 0.05$ 、流量 R_n)と抽出液(抽質成分 C のモル分率 y_1 、流量 E_1)が両端から出ていく。ここで、 y_i と x_i は、 i 段目の抽出液(流量 E_i)と抽残液(流量 R_i)における抽質成分 C のモル分率とする。なお、原溶媒と抽剤の相互溶解、ならびに、各段における原溶媒と抽剤の流量変化は無視できるものとする。

(b-1) 物質収支より、流量比 F/S を、 y_{i+1} と x_i を用いて示せ。

(b-2) 相平衡図に基づいて解答用紙の x - y 座標に平衡線を描き、分配曲線図を完成させよ。

(b-3) 問(b-2)に示した分配曲線図を用いて所要理論段数を求めたい。その手順の概略を、解答用紙の分配曲線図に示すとともに、箇条書きで説明せよ。

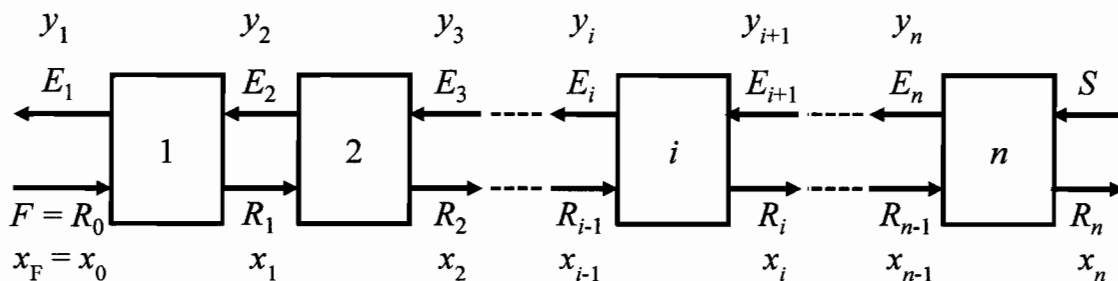


図 2