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

水平に配置された 2 枚の滑らかな無限平行平板に挟まれた、粘度 μ の非圧縮性ニュートン流体の強制対流について考える。平板間の距離 h が十分に小さく、流れが十分に発達したとき、流れは二次元粘性流れとなり、速度分布は放物線状となる。なお系は等温に保たれている。

（a）両平板が静止しているときの流れ方向 x の速度分布 $u(y)$を下面からの距離 y、平板間距離 h、流れの最大速度 u_{max} を用いて表せ。

（b）上記（a）において流体中の微小区間内の力のつり合いを考える。

(b-1) 流れ方向の圧力勾配 dp/dx をせん断応力 τ を用いて表せ。

(b-2) $u(y)$を dp/dx を用いて表せ。

(b-3) u_{max} を dp/dx を用いて表せ。

（c）次に下板を固定したまま、上板を流れと同方向に、流れが定常に達するまで速度 $U\,(< u_{max})$で動かし続けた。

(c-1) $u(y)$を dp/dx を用いて表せ。

(c-2) 流速が最大となる y を求めよ。

(c-3) 流量 Q を求めよ。

問題２

ある液相並列反応における目的生成物 P と副生成物 R の生成速度は、それぞれ、式 (1) と (2) で表される。なお、C_i（i = A, B, P, R）は各成分の濃度であり、k_1、k_2 は反応速度定数である。

$$\mathrm{A} + \mathrm{B} \xrightarrow{k_1} \mathrm{P} \qquad r_\mathrm{P} = \frac{\mathrm{d}C_\mathrm{P}}{\mathrm{d}t} = k_1 {C_\mathrm{A}}^{0.4} {C_\mathrm{B}}^{0.6} \qquad (1)$$

$$\mathrm{A} + \mathrm{B} \xrightarrow{k_2} \mathrm{R} \qquad r_\mathrm{R} = \frac{\mathrm{d}C_\mathrm{R}}{\mathrm{d}t} = k_2 {C_\mathrm{A}}^{0.5} {C_\mathrm{B}}^{1.5} \qquad (2)$$

反応器に供給される原料は成分 A、B を等モル含んでおり、生成物 P、R を含まない。なお、反応器は一定温度に保たれている。また、反応による体積変化は無視する。

成分 A の微小反応量のうち、目的成分 P に転化した A の割合は微分選択率 S_d と定義され、式 (3) で与えられる。

$$S_\mathrm{d} = \frac{\mathrm{d}C_\mathrm{P}}{-\mathrm{d}C_\mathrm{A}} = \frac{r_\mathrm{P}}{r_\mathrm{P} + r_\mathrm{R}} \qquad (3)$$

反応器入口、出口における成分 A の濃度をそれぞれ C_{A0}、C_{Af} とする。反応器出口において、成分 A の全反応量のうち目的成分 P に転化した A の割合は総括選択率（S_O）と定義される。また、供給された成分 A の全量のうち目的成分 P に転化した割合は収率（Y）と定義される。

（a）流通管型反応器および流通槽型反応器により操作を行った。それぞれの場合の総括選択率（S_O）を、k_1、k_2、C_{A0}、C_{Af} を用いて示せ。

（b）成分 A の濃度と S_d の関係を図示し、この図を用いて流通管型反応器および流通槽型反応器における目的成分 P の収率（Y）を算出する方法の概略を説明せよ。なお、図中には、C_{A0}、C_{Af} および反応器出口における微分選択率 S_{df} を書き入れること。

（c）反応器入口における成分 A の濃度 $C_{\mathrm{A0}} = 1.0\ \mathrm{mol{\cdot}m^{-3}}$、反応速度定数 $k_1 = 1.0\ \mathrm{h^{-1}}$、$k_2 = 1.0\ \mathrm{m^3{\cdot}mol^{-1}{\cdot}h^{-1}}$ で運転する。なお、反応器出口での成分 A の転化率は 50 %である。

(c-1) 流通管型反応器あるいは流通槽型反応器のいずれで操作した場合に収率が高くなるか、理由を付して答えよ。

(c-2) 問 (c-1) で選んだ反応器の容積を求めよ。ただし、反応器入口における供給液流量は $1.0\ \mathrm{m^3{\cdot}h^{-1}}$ である。

問題３

充填塔を用いたガス吸収操作について考える。

微量の目的成分（モル分率 ：y_0）を含む空気を塔底から流束 G [mol·m^{-2}·s^{-1}]で、目的成分を含まない回収液を塔頂から流束 L [mol·m^{-2}·s^{-1}]で供給する。ここで、G、L は一定である。また、気液間の物質移動は二重境膜説に従うものとし、液相、気相における目的成分のモル分率（x, y）には $y^* = mx$（m：定数）なる平衡関係が成立する。

なお、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。

（ａ）向流操作による吸収塔の設計について考える。

(a-1) 微小区間の物質収支より、塔高さ Z [m]を推算する式を求めよ。また、塔高さを気相基準の総括移動単位高さ H_{OG} [m] および気相基準の総括移動単位数 N_{OG} [-]を用いて表せ。ここで、気相基準の総括物質移動係数を K_y [mol·m^{-2}·s^{-1}]、充填塔内の単位体積あたりの有効気液界面積を a [m^{-1}]とする。

(a-2) 液相側の物質移動係数 k_x [mol·m^{-2}·s^{-1}]、気相側の物質移動係数 k_y [mol·m^{-2}·s^{-1}]を用いて H_{OG} を表せ。また、H_{OG} を気相の境膜に対する移動単位高さ H_G [m]と液相の境膜に対する移動単位高さ H_L [m]を用いて表せ。

（ｂ）向流操作および並流操作により目的成分を 90%回収する。並流操作の場合、塔頂より空気と回収液を供給する。

(b-1) 向流および並流の場合の操作線を導出し、x-y 線図上に操作線と平衡線の概略を描け。ただし、両操作での塔頂、塔底における組成、および両操作線の交点を G、L、y_0 で表し、図に明記すること。

(b-2) N_{OG} を図解法で求める方法を説明し、両操作における塔高さの大小を述べよ。ただし、両操作の H_{OG} は等しいものとする。

問題４

容積 V [m^3]の完全混合槽を２個直列に接続した液体加熱プロセスを考える。第１槽に液体が一定流量 F [m^3·s^{-1}]で供給され、出口液体は第２槽に送られる。各槽間における流動遅れ、放熱は無視する。第１槽にはヒーターが設置され、その加熱量は $Q(t)$ [J·s^{-1}]である。加熱前の各槽内に満たされた液体の温度は第１槽の入口液体温度と等しく、第１槽の入口液体温度、出口液体温度はそれぞれ T_0 [K]、$T_1(t)$ [K]とする。第２槽の入口液体温度は第１槽の出口液体温度と等しく、第２槽の出口液体温度は $T_2(t)$ [K]とする。なお、t は時間を表す。また、液体の密度は ρ [kg·m^{-3}]、液体の比熱は c_p [J·kg^{-1}·K^{-1}] とし、物性値の温度依存性は無視する。

（ａ）第１槽について　$V\dfrac{\mathrm{d}T_1(t)}{\mathrm{d}t} = F(T_0 - T_1(t)) + \dfrac{Q(t)}{\rho c_p}$　が成り立つことを示せ。

（ｂ）$T_{\mathrm{d1}}(t) = T_1(t) - T_0$ とする。入力を $Q(t)$、出力を $T_{\mathrm{d1}}(t)$ とした場合の伝達関数を求めよ。

（ｃ）入力を $Q(t)$、出力を $T_{\mathrm{d1}}(t)$ とした場合の第１槽のステップ応答を求めよ。

（ｄ）$T_{\mathrm{d2}}(t) = T_2(t) - T_0$ とする。入力を $Q(t)$、出力を $T_{\mathrm{d2}}(t)$ とした場合の伝達関数 $G_{\mathrm{p}}(s)$ を求めよ。

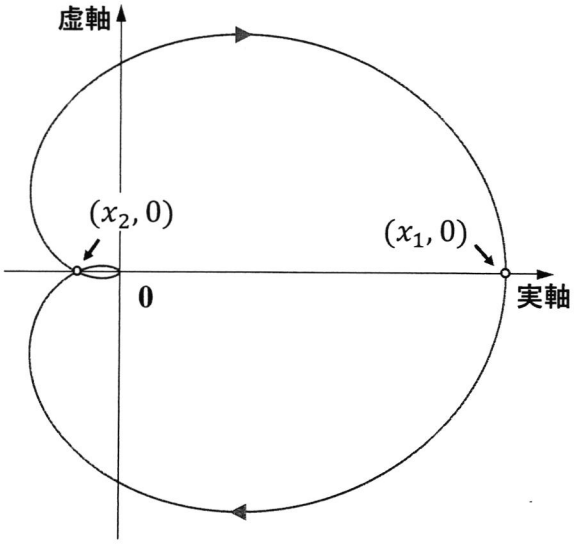
（ｅ）問（ｄ）で求めた伝達関数 $G_{\mathrm{p}}(s)$ が 式 (1) で表される場合を考える。このプロセスを式 (2) に示す伝達関数 $G_{\mathrm{c}}(s)$ の調節計を用いてフィードバック制御する。このときの一巡伝達関数 $G_0(s) = G_{\mathrm{p}}(s)\,G_{\mathrm{c}}(s)$ のナイキスト線図を下図に示す。

(e-1) 線図中の実軸上の座標を示す x_1、x_2 を求めよ。

(e-2) ナイキスト法により安定判別せよ。

$$G_{\mathrm{p}}(s) = \frac{1}{(s+1)^2} \qquad (1)$$

$$G_{\mathrm{c}}(s) = \frac{10}{s+2} \qquad (2)$$



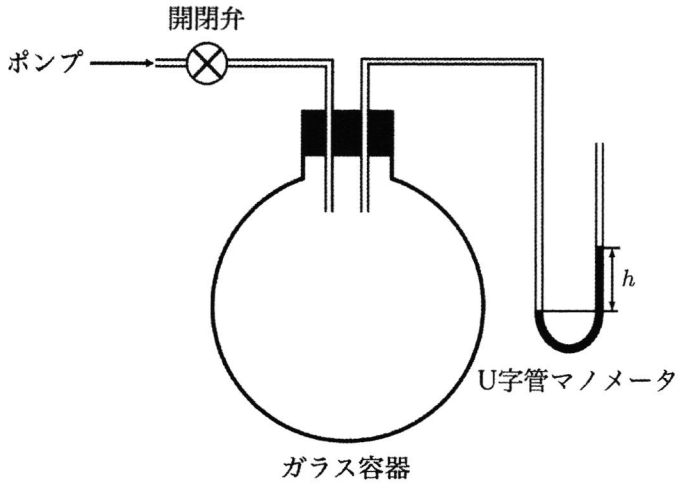
問題５

気体の比熱比 $\gamma = C_p/C_V$ を測定する実験について考える。ここで、C_p は定圧熱容量、C_V は定積熱容量である。

図のように、十分に大きな体積 V のガラス容器をゴム栓で密閉し、そこに２本のガラス管を挿入した。一方はＵ字管マノメーターにつなぎ、液柱の高さ h から容器内の気体の圧力と大気圧 p_0 との差を測る。マノメーター内にある液体の密度 ρ は気体の密度より十分に大きく、さらに気体の液体への溶解は無視できるものとする。他方には容器内の空気の出入りを調節する開閉弁が付いており、その先をポンプにつなげた。

はじめに開閉弁を開き、容器内へ外気温 T_0 と等しくなるまでポンプから空気を注入し、開閉弁を閉じてポンプをはずした。このとき空気の圧力は大気圧よりも若干高く、液柱の高さは h_1 であった (状態 1)。次に、瞬間的に開閉弁を開きこの空気を断熱的に膨張させ、開閉弁を閉じた。このとき液柱の高さは $h_2(=0)$ になった (状態 2)。最後に、容器内にある空気の温度がもう一度、外気温 T_0 と等しくなるまで放置したところ、液柱の高さは h_3 になった (状態 3)。

気体は理想気体 (完全気体) であるとして、以下の問に答えよ。なお、問（b）から（d）は γ、V、p_0、ρ、T_0、h_1、h_3、g の中から必要な記号を用いて答えよ。ここで g は重力加速度の大きさである。



（次のページにつづく）

（問題５のつづき）

（a） h_1、h_3 の大小関係を答えよ。

（b） 状態１から状態２へ変化したことにより、容器内にある気体の物質量が n_1 から n_2 になったとする。n_1/n_2 を求めよ。

（c） 状態２の気体の温度を T_2 とする。$(T_2 - T_0)/T_0$ を求めよ。

（d） 状態１から状態２への変化は、気体の物質量が n_1 のまま体積が V から V' へ断熱膨張する過程であると、仮想的にみなすことができる。このときの V' を求めよ。

（e） 比熱比 γ がマノメーターによる測定値 h_1、h_3 を用いて

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_3}$$

で与えられることを示せ。なお、絶対値が１より十分小さい ε に対する近似式 $\ln(1+\varepsilon) \fallingdotseq \varepsilon$ を用いよ。

（f） 様々な気体に対して比熱比 γ を測定したところ

$$\gamma = 1.7\,(\mathrm{Ar}), \quad \gamma = 1.4\,(\mathrm{N_2}), \quad \gamma = 1.4\,(\mathrm{O_2}), \quad \gamma = 1.3\,(\mathrm{CO_2})$$

という結果を得た。気体定数を R として、温度 T のときの気体 1 mol における 1 自由度あたりのエネルギーが $(1/2)RT$ となるエネルギー等分配則の観点から、この結果に分子論的な解釈を与えよ。