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

燃焼反応に関する以下の問に答えよ。ただし、空気の組成は体積分率で N_2 : 80%、O_2 : 20%とする。答えは全て有効数字２桁で求めよ。

（ａ）空気を用いて硫黄を燃焼させたところ、式(1)、(2)で示される複合反応が起こり、SO_2 と SO_3 が生成した。SO_3 を除いた生成ガスを分析したところ、体積分率で SO_2 : 15%、O_2 : 3.0%、N_2 : 82%であった。生成した SO_2 の体積は、生成した SO_3 の体積の何倍か求めよ。

$$S + O_2 \rightarrow SO_2 \qquad (1)$$

$$S + 3/2\, O_2 \rightarrow SO_3 \qquad (2)$$

（ｂ）90 wt%の炭素と 6.0 wt%の水素および 4.0 wt%の灰分からなる固体燃料を、空気を用いて燃焼させた。灰分は、SiO_2 や Al_2O_3 などの無機酸化物とする。

燃焼後の残渣（ざんさ）は、炭素 60 wt%、灰分 40 wt%であった。燃焼ガスには、CO_2、CO、N_2、O_2、H_2O が含まれ、$CO_2 : CO : N_2$ のモル比は、6 : 1 : 40 であった。

(b-1) 固体燃料に含まれていた炭素のうち、未反応の炭素の割合 [%] を求めよ。

(b-2) 固体燃料 100 g あたり、完全燃焼に必要な酸素の物質量 [mol] を求めよ。

(b-3) 固体燃料 100 g あたり、炭素の燃焼に使われた酸素の物質量 [mol] を求めよ。

(b-4) 燃焼ガスの酸素のモル分率 [mol%]を求めよ。

問題２

半径 R_0 の円筒容器の下部から、密度 ρ 、粘度 μ の非圧縮性、ニュートン流体が大気圧 p_0 中に放出されている場合について考える。

（ａ）図１に示す流体放出について以下の問に答えよ。

(a-1) 式(1)で示す Navier-Stokes 方程式より、高さ $y=h$ における Bernoulli の式を導出せよ。その際、最も重要と思われる仮定を記せ。ここで ν は動粘度、g は重力加速度である。

$$\vec{v}\bullet\nabla\vec{v}=-\frac{1}{\rho}\nabla p+\nu\nabla^2\vec{v}+\vec{g} \tag{1}$$

(a-2) 下部に開けられた半径 R の穴から流体が放出されているときの流速 v を R、R_0 を用いて表せ。ただし穴の高さを０とし、Bernoulli の式が成立するものとする。なお液面の下降速度（v_0）は無視できないものとする。

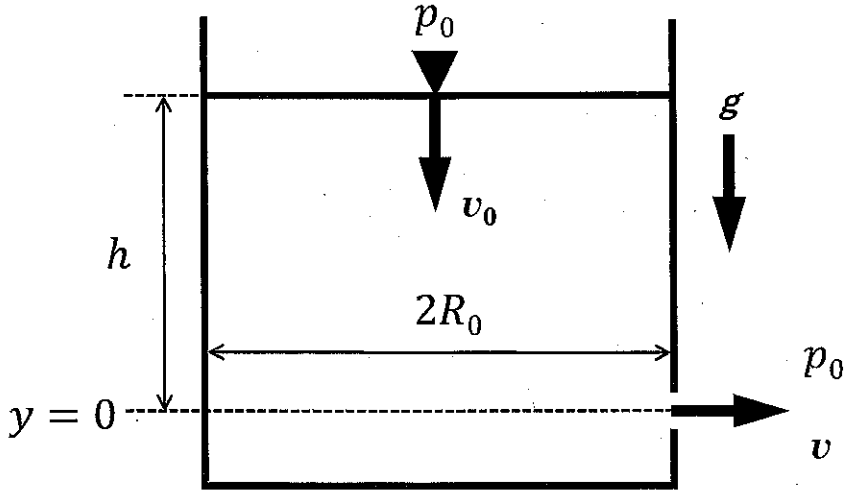


図１

（次ページへ続く）

（問題２の続き）

（ｂ）次に十分に細い内径 $2R$、長さ L の水平円管内の流動について考える。円管内では式(2)の運動方程式が成立するものとする。このとき $v_{\mathrm{max}} = 2\,v_{\mathrm{av}}$ であることを用い、円管内の平均流速（v_{av}）は式(3)で表されることを示せ。ここで r、z はそれぞれ半径方向、流れ方向座標、τ はせん断応力であり、$-(\mathrm{d}p/\mathrm{d}z)$ は $\Delta p/L$ と近似可能であるものとする。なお v_{max} は円管内最大速度である。

$$-r\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}+\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left(r\tau_{rz}\right)=0 \tag{2}$$

$$v_{\mathrm{av}}=\frac{\Delta p}{L}\frac{R^2}{8\mu} \tag{3}$$

（ｃ）最後に、図２に示すように、図１の下の出口に（ｂ）の円管を取り付けた場合の放出について考える。このとき式(3)において $L\rightarrow 0$ とすると $v_{\mathrm{av}}\rightarrow\infty$ となり、明らかに非現実的な解となる。そこで図２における円筒と円管とのつなぎ目位置の圧力を p' と定義し、$p'-p_0=\Delta p$ を用いて Bernoulli の式を解き、式(3)と連立することにより矛盾の生じない平均流速 v_{av}' を求めよ。ただし $v_0 \ll v_{\mathrm{av}}'$ としてよい。

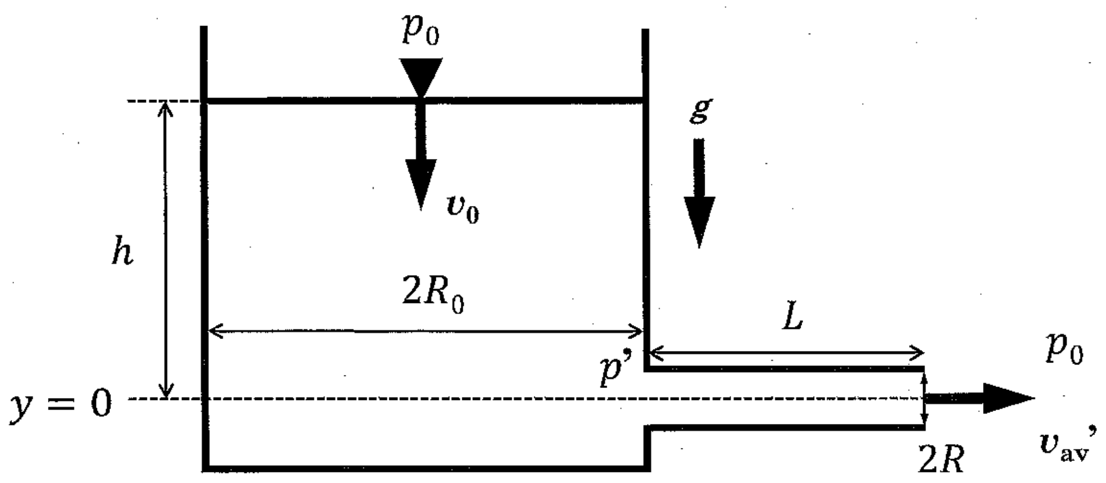
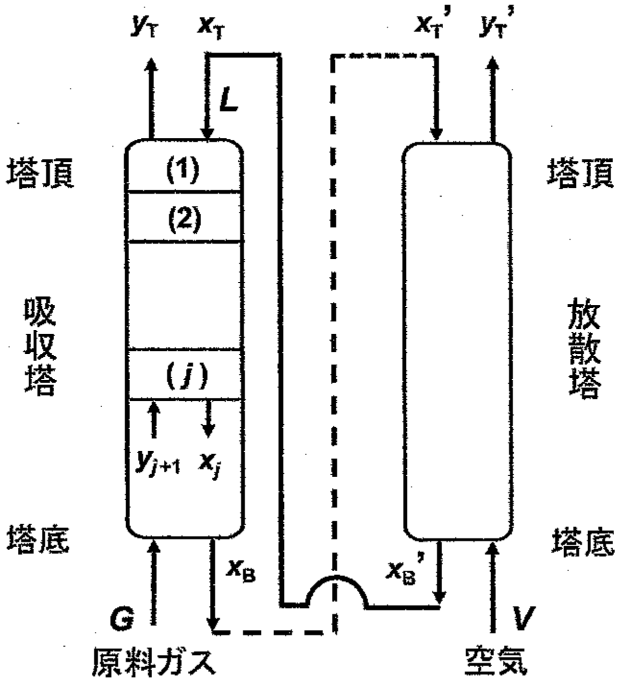


図２

問題３

吸収塔と放散塔で構成される微量成分 X の分離回収プロセス(右図)に関して、以下の問に答えよ。ここで、L は液相、G および V は気相のモル流量であり、一定値である。x、y はそれぞれ液相および気相中の X のモル分率であり、x^*、y^* はそれぞれ y、x と平衡な液相および気相中の X のモル分率とする。X の濃度は希薄であり、X 以外の成分は液相に不溶である。塔内外は、定常であり、常温および大気圧とする。



（a）棚段を用いた吸収塔について考える。気相と液相における X のモル分率には、$y^* = mx$ (m: 平衡定数)の平衡関係が成立する。

(a-1) j 段と塔頂での物質収支をとり、操作線を表せ。

(a-2) $L/(mG) = A$ とする。1 および 2 段目での気相基準の総括推進力を A、y_T、y_T^* で表せ。

(a-3) $A > 1$ の場合において、塔頂から塔底に至る気相基準の総括推進力の変化の概略図を専用の解答用紙に記せ。ただし、解答の根拠も説明せよ。

（b）放散塔について考える。二重境膜説が成立し、k_x および k_y を液相境膜および気相境膜のモル分率基準の物質移動係数とする。気相と液相における X のモル分率には、$y^* = m'x$ (m': 平衡定数)の平衡関係が成立する。

(b-1) 専用の解答用紙に操作線上の点 P(x , y)ならびに点 P に対応する気液界面の組成 Q(x_i , y_i)が記されている。この場合、液相抵抗支配、気相抵抗支配のどちらであるか根拠を示して答えよ。

(b-2) 吸収塔で x_B を nx_T にするとき、理論上可能な y_T' の最大値を与える液ガス比(L/V)を m'、n を用いて表せ。ただし、放散塔に導入する空気は X を含まない。

問題４

以下の①，②からなる並発反応に関して考える．

$X \rightarrow Y, \quad r_1 = k_1 (C_X)^m$ ①

$X \rightarrow Z, \quad r_2 = k_2 (C_X)^n$ ②

C_iは成分iの濃度（i = X, Y, or Z），$m, n > 0$であり，k_1，k_2は反応速度定数である．

（a）Yの選択率S_Yを表す式を示せ．

（b）$m = n = 1$であり，反応開始時にはXのみがC_{X0}で存在する場合について考える．この反応を回分反応器で行い，反応時間tにおけるC_X，C_Yの経時変化を測定する．得られたデータにもとづいて２つの異なる図（グラフA, B）を作成し，各図中の直線の傾きG_A，G_Bを表す式からk_1，k_2の値を求めたい．G_A，$G_B > 0$であり，グラフの軸の少なくとも１つは，C_Zに関するものとする．どのような式にもとづいてグラフを描き，k_1とk_2の値を求めるのか記せ．各軸を記したグラフA，Bの概略図および，G_A，G_Bを表す式も示すこと．

（c）Zの生成速度よりもYの生成速度を高くしたい．

(c-1) 反応①，②の活性化エネルギーをそれぞれE_1，E_2とする． $E_1 < E_2$の場合には，反応温度（T）を高くした方がよいか，低くした方がよいか．理由とともに記せ．ただし，各反応速度定数の温度依存性はArrheniusの式※)で表される．

※) $k = A \exp(-E/RT)$，(R：気体定数，A：頻度因子，E：活性化エネルギー)

(c-2) $m > n$ の場合には連続槽型反応器よりも管型反応器の方が有利である．その理由を各反応器の特徴にもとづいて記せ．ただし，反応温度は同一とする．

問題５

容積がV_1、V_2 （$V_1 \neq V_2$）である流通式撹拌槽２基を直列に連結する。第１槽へ濃度C_0の水溶液を一定流量Fで供給し、出口水溶液は第２槽に送られる。第１槽および第２槽から流出する水溶液の濃度をC_1およびC_2とし、時間をtとする。

（ａ）第１槽に供給する水溶液の濃度C_0の時間変化に伴う流出液の濃度C_1およびC_2の変化は、それぞれ次の常微分方程式で表される。式中の関数$f_1(C_0, C_1)$および$f_2(C_1, C_2)$を求めよ。

$$\frac{\mathrm{d}C_1}{\mathrm{d}t} = f_1(C_0, C_1)$$

$$\frac{\mathrm{d}C_2}{\mathrm{d}t} = f_2(C_1, C_2)$$

（ｂ）第１槽に供給する水溶液の濃度C_0の時間変化に伴う流出液の濃度C_2の変化は、次の２階線形常微分方程式で表される。

$$a_0\frac{\mathrm{d}^2C_2}{\mathrm{d}t^2} + a_1\frac{\mathrm{d}C_2}{\mathrm{d}t} + a_2C_2 = C_0$$

a_0、a_1、a_2を求めよ。

（ｃ）C_0を入力、C_2を出力とする系の伝達関数を考える。この系のステップ応答が非振動性漸近型となること示し、その応答を求めよ。

（ｄ）第１槽に関して、C_0を入力、C_1を出力とする系の伝達関数を考える。この系の周波数応答のゲインを求めよ。また、縦軸をゲイン$|G(j\omega)|$、横軸を角周波数ωを用いた$\omega\theta$（$\theta = \frac{V_1}{F}$）とするゲイン線図の概形を$10^{-2} \leq \omega\theta \leq 10^2$の範囲で示し、角周波数の増加に伴うゲインの変化に関して説明せよ。