

|                    |  |
|--------------------|--|
| 専門科目（三）： 化学工学（その1） |  |
|--------------------|--|

I 次の問いに答えなさい。解答は、化学工学(その2)の解答欄に記入しなさい。

問1 次の文中の①～⑩に相当する数式を答えなさい。なお、⑩は変数 $v_m$ を含んでもよい。

鉛直壁面に沿って流下する非圧縮性 Newton 流体の液膜を考える。奥行き・高さに比べて厚さは十分薄いとす。図1のように座標系を設定し、厚さ方向 $\Delta x$ 、奥行き方向 $W$ 、鉛直方向 $\Delta z$ の直方体の微小体積を考える。位置 $z = z$ における単位体積あたりの $z$ 方向運動量は、 $z$ 方向速度成分 $v$ 、流体密度 $\rho$ を用いて $\rho v|_z$ と表される。ここで、 $z = z$ および $z = z + \Delta z$ の断面を通して輸送される $z$ 方向運動量は、流れにより持ち込まれるものだけであるので、式(1),(2)で書き表される。

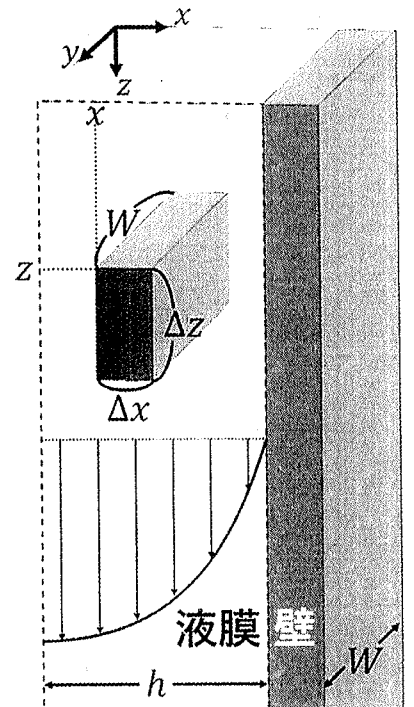


図1 鉛直壁面の流下液膜

①  $z = z$ における流入速度 (1)

②  $z = z + \Delta z$ における流出速度 (2)

一方、 $x = x$ および $x = x + \Delta x$ の断面を通して輸送される $z$ 方向運動量は、同断面で働くせん断力と考えられるので、せん断応力 $\tau_{xz}$ （裏面参照）を用いて式(3),(4)のように書き表される。

③  $x = x$ における流入速度 (3)

④  $x = x + \Delta x$ における流出速度 (4)

また、微小体積内における $z$ 方向運動量の蓄積速度と生成速度は次のように書き表される。ここで、 $g$ は重力加速度である。

⑤ 蓄積速度 (5)

⑥ 生成速度 (6)

ここで、奥行き方向には $z$ 方向運動量の流入出はなく、速度場は完全発達しており(① = ②)、さらに定常状態(⑤ = 0)を考えれば、式(1)～(6)から得られる $z$ 方向運動量の収支式は式(7)のように簡略化できる。

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} = ( \text{⑦} ) \quad (7)$$

さらに、液膜表面および壁面(滑りなし)における境界条件は式(8),(9)で表せる。ここで、 $h$ は液膜厚さである。

$$( \text{⑧} ) = 0 \quad (x = 0) \quad (8)$$

$$( \text{⑨} ) = 0 \quad (x = h) \quad (9)$$

Newton の粘性法則(裏面参照)とこれらの境界条件を用い、式(7)から液膜内 $z$ 方向速度分布が式(10)で得られる。

$$v = v_m \left\{ 1 - \left( \frac{x}{h} \right)^2 \right\} \quad (10)$$

ここで、 $v_m$ は最大流速であり、流体粘度 $\mu$ を用いて式(11)で書き表される。

$$v_m = ( \text{⑩} ) \quad (11)$$

さらに、式(10)を積分することで液膜内体積流量が( ⑪ )として求められる。

問2 次の文中の⑫～⑳に相当する数式を答えなさい。

鉛直に設置した円柱(半径 $R$ )の外表面に沿って流下する問1と同じ流体の液膜を考える。図2のように座標系を設定し、半径位置 $r$ に、半径方向 $\Delta r$ 、鉛直方向 $\Delta z$ のリング状の微小体積を考える。

完全発達状速度場では、式(1),(2)に相当する $z$ 方向の流れに起因する運動量の流入出は無視できる。また、式(3),(4)に相当する $r$ 方向に輸送される $z$ 方向運動量はせん断応力 $\tau_{rz}$ のみを考えればよい。従って、 $z$ 方向運動量に関する収支式は流体密度 $\rho$ および重力加速度 $g$ を用いて式(12)で表される。

$$\begin{matrix} \text{( ⑫ )} \\ \text{蓄積速度} \end{matrix} = \begin{matrix} \text{( ⑬ )} \\ \text{流入速度} \end{matrix} - \begin{matrix} \text{( ⑭ )} \\ \text{流出速度} \end{matrix} + \begin{matrix} \text{( ⑮ )} \\ \text{生成速度} \end{matrix} \quad (12)$$

定常状態において、式(12)に Newton の粘性法則を適用すると、流体粘度 $\mu$ を用いて、 $v$ に関する微分方程式(式(13))が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v}{\partial r} \right) = \text{( ⑯ )} \quad (13)$$

ここで、液膜厚さを $h$ とすると、液膜表面および円柱外表面における境界条件は式(14),(15)で与えられる。

$$\text{( ⑰ )} = 0 \quad (r = R + h) \quad (14)$$

$$\text{( ⑱ )} = 0 \quad (r = R) \quad (15)$$

これを用いて式(13)から、液膜内の $z$ 方向速度分布が式(16)として得られる。

$$v = \text{( ⑲ )} \left\{ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right\} + \text{( ⑳ )} \ln \left( \frac{r}{R} \right) \quad (16)$$

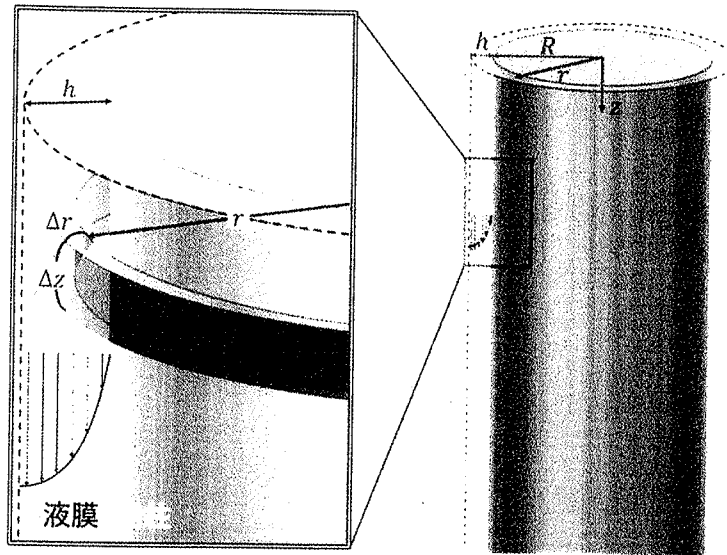


図2 円柱外表面の流下液膜

問3 ある条件下では、式(10),(11)と式(16)は同じ近似解(式(17))を与える。ここで、 $\eta$ は壁面もしくは外表面からの距離で、図1では $\eta = h - x$ 、図2では $\eta = r - R$ の関係がある。この近似解を与えるための、図1と図2に共通する条件および図2に限定される条件を示しなさい。また、それぞれの場合について式(17)の導出過程を示しなさい。

$$v = \frac{\rho g h \eta}{\mu} \quad (17)$$

Newton の粘性法則:  $\tau_{xz} = -\mu \frac{\partial v}{\partial x}$

ここで、 $\tau_{xz}$ は $x$ 方向単位ベクトルを法線ベクトルとする平面( $yz$ 平面)の単位面積において $z$ 方向に働くせん断力(せん断応力)、 $v$ は $z$ 方向速度成分、 $\mu$ は流体粘度を表す。

ここには答案を記入しないこと。

専門科目（三）： 化学工学（その2）

I 解答欄

|    |    |          |   |  |   |  |
|----|----|----------|---|--|---|--|
| 問1 | ①  |          | ② |  | ③ |  |
|    | ④  |          | ⑤ |  | ⑥ |  |
|    | ⑦  |          | ⑧ |  | ⑨ |  |
|    | ⑩  |          | ⑪ |  |   |  |
| 問2 | ⑫  |          | ⑬ |  | ⑭ |  |
|    | ⑮  |          | ⑯ |  | ⑰ |  |
|    | ⑱  |          | ⑲ |  | ⑳ |  |
| 問3 | 条件 | 図 1,2 共通 |   |  |   |  |
|    |    | 図 2 に限定  |   |  |   |  |

<解答欄は裏面にもあります>

問3

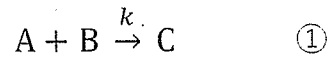
導出過程

ここには答案を記入しないこと。

専門科目（三）： 化学工学（その3）

II 以下の問いに答えなさい。解答は化学工学（その4）の解答欄に記入しなさい。  
なお、絶対零度は $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、気体定数は $8.314\text{ J/(K mol)}$ とする。

下記の反応式で表される液相素反応を、定容系の回分反応器（問2～問5）、定容系の連続槽型反応器（問6）、および定容系の管型反応器（問7）で行う。



ここで、 $k$ は反応速度定数である。成分A、B、Cの初濃度 $C_{A0}$ 、 $C_{B0}$ 、 $C_{C0}$ はそれぞれ $C_{A0} = 2.00\text{ mol/L}$ 、 $C_{B0} = 5.00\text{ mol/L}$ 、 $C_{C0} = 1.00\text{ mol/L}$ であり、それらは溶媒Dに溶解している。溶媒Dの初濃度は $C_{D0} = 50.0\text{ mol/L}$ であり、この溶媒は反応には直接関係しない。

問1 Aの80.0 mol%が反応したときの各成分A、B、C、Dのモル分率を答えなさい（有効数字3桁）。

問2 定容系の回分反応器を用いて①の反応を行う。この場合、 ~ に入る数式を、 $k$ 、 $C_{A0}$ 、 $C_{B0}$ 、 $C_{C0}$ 、 $C_{D0}$ 、 $C_A$ のうちで必要なパラメータを用いて答えなさい。

$$C_B = \text{ア}$$

$$\frac{dC_A}{dt} = \text{イ}$$

$$t = -\frac{1}{k} \cdot \frac{1}{C_{B0} - C_{A0}} \cdot \ln \left( \text{ウ} \right)$$

問3 この反応により、表1に示す結果を得た。表1に与えられたデータを用いて、反応速度定数 $k$ を決定しなさい（有効数字2桁）。

表1 回分反応器を用いた際の反応時間とA成分濃度の関係

| $t\text{ (s)}$       | 0    | 1    | 2    | 3    | 5    | 7.5  | 10   |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $C_A\text{ (mol/L)}$ | 2.00 | 1.90 | 1.81 | 1.72 | 1.57 | 1.40 | 1.26 |

問4 Aの80.0 mol%を反応させるために必要な反応時間を答えなさい（有効数字2桁）。

問5 この反応を行った温度を決定しなさい（有効数字2桁）。なお、同じ反応を $50.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ で行った際の反応速度定数は $0.100\text{ L/(mol s)}$ であり、 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ で行った場合は $5.32\text{ L/(mol s)}$ であった。

問6 ①の反応を、 $50.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ にて、定常状態で操作される定容系の連続槽型反応器で行う場合、Aの80.0 mol%を反応させるために必要な空間時間 $\tau\text{ (s)}$ を決定しなさい（有効数字3桁）。

問7 ①の反応を、 $50.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ にて、定常状態で操作される定容系の管型反応器で行う。用いる管型反応器は円柱状であり、その断面積 $S$ は $5.00 \times 10^{-3}\text{ m}^2$ である。また、供給液の体積流量 $v$ は $1.00\text{ L/s}$ である。Aの80.0 mol%を反応させるために必要な空間時間 $\tau\text{ (s)}$ 、および、管型反応器の長さ $(\text{m})$ を求めなさい（有効数字3桁）。

2022年度 神戸大学大学院工学研究科博士課程前期課程一般入試（応用化学専攻）試験問題

|                    |  |
|--------------------|--|
| 専門科目（三）： 化学工学（その4） |  |
|--------------------|--|

II 解答欄

|    |                    |          |
|----|--------------------|----------|
| 問1 | Aのモル分率             | Bのモル分率   |
|    | Cのモル分率             | Dのモル分率   |
| 問2 | ア                  | イ        |
|    | ウ                  |          |
| 問3 | $L/(\text{mol s})$ |          |
| 問4 | s                  |          |
| 問5 | K                  |          |
| 問6 | s                  |          |
| 問7 | 空間時間 $\tau$        | 管型反応器の長さ |
|    | s                  | m        |

|                           |  |
|---------------------------|--|
| <b>専門科目（三）： 化学工学（その5）</b> |  |
|---------------------------|--|

III 以下の問いに答えなさい。なお、解答は化学工学（その6）の解答欄に記入しなさい。

CO<sub>2</sub>の純水への吸収が以下に示すHenryの法則に従う場合を考える。

$$p_{eq} = H \cdot C_{eq}, \quad p_{eq} = H' \cdot x_{eq}, \quad y_{eq} = m \cdot x_{eq}$$

ここで、 $p$  [Pa]および $y$  [mol/mol]はそれぞれ気相中のCO<sub>2</sub>の分圧およびモル分率、 $C$  [mol/L]および $x$  [mol/mol]はそれぞれ水相中のCO<sub>2</sub>の濃度およびモル分率であり、下付き添字eqは吸収平衡状態を表す。また、 $H$ 、 $H'$ および $m$ はそれぞれの式に対するHenry定数である。

今、27.0 °Cにおいて $1.00 \times 10^2$  PaのCO<sub>2</sub>が1.00 Lの純水と接して平衡状態になったとき、CO<sub>2</sub>の吸収量は $3.00 \times 10^{-5}$  molであった。このとき、大気圧( $1.00 \times 10^5$  Pa)、27.0 °CにおけるHenry定数( $H$ 、 $H'$ 、 $m$ )を単位とともにそれぞれ答えなさい（有効数字3桁）。なお、大気圧、27.0 °Cにおける純水の密度は $0.99 \text{ g/cm}^3$ とする。

IV 以下の問いに答えなさい。なお、解答は化学工学（その6）の解答欄に記入しなさい。

CO<sub>2</sub>はN<sub>2</sub>やO<sub>2</sub>などに比べて水に溶けやすいガスである。この性質を利用して、空気中のCO<sub>2</sub>の分離除去を検討する。図のように、向流ガス吸収塔により空気中に0.04 mol%含まれるCO<sub>2</sub>を純水に吸収させることで、吸収塔出口における空気中のCO<sub>2</sub>濃度を0.01 mol%にしたい。このとき、純水へのCO<sub>2</sub>の吸収はHenryの法則に従うとし、その吸収平衡関係は、 $y_{eq} = m \cdot x_{eq}$  で記述できるものとする。ここで、 $m$ はHenry定数、 $y_{eq}$ および $x_{eq}$ はそれぞれ、吸収平衡状態における気相および水相のCO<sub>2</sub>のモル分率である。また、この吸収塔内において、空気中のCO<sub>2</sub>以外のガス成分の吸収、CO<sub>2</sub>の吸収に伴う気相および液相の流量変化は、いずれも無視できるものとする。

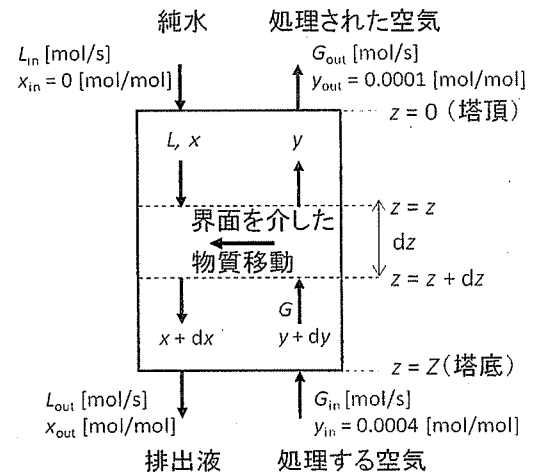
吸収塔内の気液界面におけるCO<sub>2</sub>吸収に伴うCO<sub>2</sub>の物質移動は境膜二重説に基づくと考えると、定常状態では、気液界面を介した単位界面面積あたりのCO<sub>2</sub>吸収速度 $N$  [mol/(m<sup>2</sup> s)]は、

$$N = K_y(y - y^*) = K_x(x^* - x)$$

と書き表せる。ここで、 $x$ 、 $y$ 、 $x^*$ および $y^*$ はそれぞれ、

- $x$ : 吸収塔内任意位置 $z$ における水相のCO<sub>2</sub>のモル分率
- $y$ : 吸収塔内任意位置 $z$ における気相のCO<sub>2</sub>のモル分率
- $x^*$ : モル分率 $y$ の気相と平衡な水相中のCO<sub>2</sub>のモル分率
- $y^*$ : モル分率 $x$ の水相と平衡な気相中のCO<sub>2</sub>のモル分率

である。また、 $K_y$ は気相モル分率差基準の総括物質移動係数、 $K_x$ は液相モル分率差基準の総括物質移動係数である。



問1  $x$ と $y^*$ の関係式を記述しなさい。

問2 気液界面においてCO<sub>2</sub>の吸収は平衡関係が成立しているとする。気液界面近傍における気相および水相のCO<sub>2</sub>のモル分率をそれぞれ $y_s$ および $x_s$ とすると、 $y_s$ と $x_s$ の関係式を記述しなさい。

問3  $K_x$ をHenry定数 $m$ 、CO<sub>2</sub>の気相境膜物質移動係数 $k_y$ および液相境膜物質移動係数 $k_x$ を用いて記述しなさい。

問4 塔頂から塔内位置 $z = z$ までのCO<sub>2</sub>の物質収支を考えることにより、 $y$ を $x$ の関数として書き表しなさい。

問5 塔内位置  $z \sim z + dz$  の気相におけるCO<sub>2</sub>の物質収支について、ア ~ ウ に入る数式を記述しなさい。なお、塔内断面積は $S$  [m<sup>2</sup>]、塔内単位容積あたりの気液界面面積は $a_v$  [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>]とする。

$$\boxed{\text{ア}} = \boxed{\text{イ}} + \boxed{\text{ウ}}$$

(微小区間への流入速度)                      (微小区間からの流出速度)                      (微小区間内における吸収速度)

問6 全圧 $1.00 \times 10^5$  Pa、温度27.0 °Cにて、 $S = 0.20 \text{ m}^2$ 、 $a_v = 300 \text{ m}^2/\text{m}^3$ の向流ガス吸収塔を、空気の供給流量 $G_{in} = 0.20 \text{ mol/s}$ 、純水の供給流量 $L_{in} = 400 \text{ mol/s}$ で操作するとき、吸収塔出口の空気中CO<sub>2</sub>濃度を0.01 mol%にするのに必要な吸収塔所要高さ $Z$ を決定しなさい（有効数字2桁）。なお、 $m = 1800$ 、 $K_y = 1.79 \times 10^{-3} \text{ mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ とする。

専門科目（三）： 化学工学（その6）

III 解答欄

| $H$ | $H'$ | $m$ |
|-----|------|-----|
|     |      |     |

IV 解答欄

|    |           |   |   |
|----|-----------|---|---|
| 問1 |           |   |   |
| 問2 |           |   |   |
| 問3 | $K_x =$   |   |   |
| 問4 | $y =$     |   |   |
| 問5 | ア         | イ | ウ |
|    |           |   |   |
| 問6 | $Z =$ $m$ |   |   |



2022年度 神戸大学大学院工学研究科博士課程前期課程一般入試(応用化学専攻) 試験問題

専門科目(三): 化学工学(その7)

V 下表はグルコースを増殖制限基質とする培地で酵母を培養した時の菌体濃度と培養時間の関係を示す。問1・2の解答は化学工学(その8)、問3・4の解答は化学工学(その9)の解答欄に記入しなさい。

|                          |     |     |     |     |      |    |    |    |    |    |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|------|----|----|----|----|----|
| 培養時間 [h]                 | 0   | 1   | 3   | 5   | 7    | 9  | 11 | 13 | 15 | 17 |
| 菌体濃度<br>[g-dry-cell / L] | 2.1 | 2.1 | 2.6 | 7.1 | 19.5 | 36 | 48 | 48 | 44 | 36 |

- 問1 この培養における酵母の菌体濃度の自然対数値をプロットし、増殖曲線を作図しなさい。  
 問2 問1で作成した増殖曲線を6分割し、各増殖期の名称を記入しなさい。  
 問3 微生物の増殖速度の遅速を判定するのに、菌体濃度が2倍になるのに要する時間を使えば便利であり、この時間を倍加時間( $t_d$ )と呼ぶ。この $t_d$ と比増殖速度 $\mu$ との関係式を求めなさい。  
 問4 この培養で得られた比増殖速度の最大値、そしてその時の倍加時間を計算し、単位も併せて答えなさい(有効数字2桁)。

VI 図1に示すバイオリアクターにてフィードバック制御のない連続操作を行い、定常状態が達成されていると仮定する。新鮮培地をポンプにて一定流量で供給するとともに、同じ流量で培養液を抜き出している。下部より圧縮空気を通気することで、バイオリアクター内における培養液が完全混合状態と仮定できる。以下の問いに関して解答は、化学工学(その9)の解答欄に記入しなさい。

問1 以下の文章中の番号①~⑩に適切な語句もしくは式を埋めなさい。

図1の様に培地を一定流量で供給する連続培養において、培養器内の菌体および増殖制限基質に関する収支式は、 $F$  (体積流量)、 $X$  (菌体濃度)、 $V$  (培養容積)、 $S$  (増殖制限基質濃度)、 $S_0$  (供給培地の増殖制限基質濃度)、 $\mu$  (比増殖速度)、 $Y_{x/s}$  (菌体収率)を用いて表すと、それぞれ次式(1)、(2)となる。

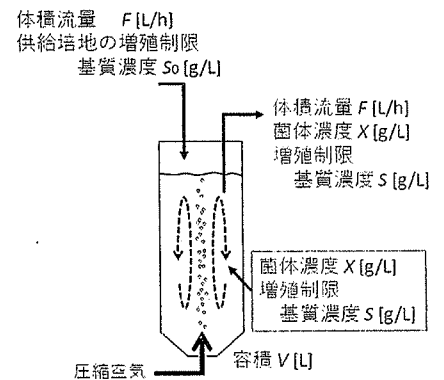


図1 バイオリアクターにおける連続培養

$$V \left( \frac{dX}{dt} \right) = \left[ \begin{array}{c} \text{流入項} \\ 0 \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{流出項} \\ \text{①} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{変動項} \\ \text{②} \end{array} \right] \quad (1)$$

$$V \left( \frac{dS}{dt} \right) = \left[ \begin{array}{c} \text{③} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{④} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{⑤} \end{array} \right] \quad (2)$$

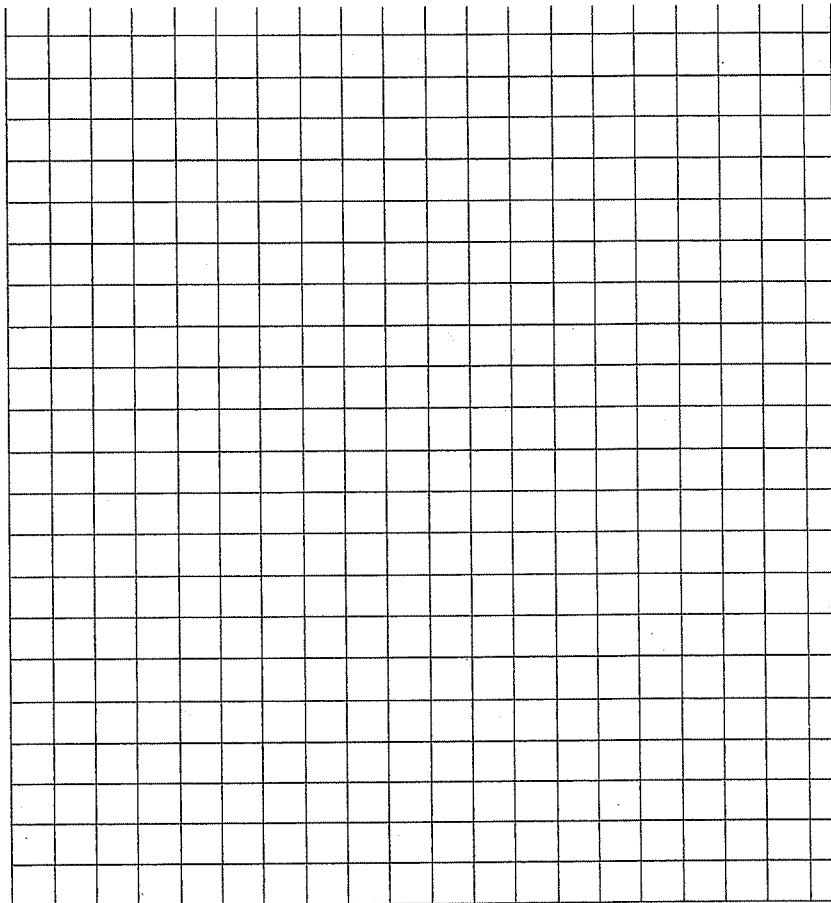
定常状態であれば、式(1)において $\mu$ と $D (=F/V)$  (希釈率)の関係は( ⑥ )で表せる。 $\mu$ がMonodの式に従うものとし、⑥の関係を利用すると、 $S$ を $K_s$  (飽和定数)、 $D$ 、 $\mu_{max}$  (最大比増殖速度)で表すことができ、 $S = ( \text{⑦} )$ が得られる。式(2)により、 $X$ は $Y_{x/s}$ 、 $S_0$ 、 $K_s$ 、 $D$ 、 $\mu_{max}$ で表すことができ、 $X = ( \text{⑧} )$ が得られる。なお、希釈率 $D$ がある限界値より高くなると、槽内の菌体濃度は急激に低下し最終的に微生物がすべて排出される。この現象は( ⑨ )と呼ばれ、このときの希釈率を限界希釈率 $D_{crit}$ といい、 $S_0$ 、 $K_s$ 、 $\mu_{max}$ で表すと、 $D_{crit} = ( \text{⑩} )$ となる。

- 問2 図1に示すバイオリアクターを用いて酵母の連続培養を行い、抜き取り培地中の酵母の菌体濃度 $X$ を10 [g-dry-cell/L]としたい。培地供給および培地抜き取りの体積流量 $F$ は8.0 [L/h]、供給培地中の増殖制限基質濃度 $S_0 = 24$  [g/L]、酵母の菌体収率 $Y_{x/s} = 0.50$  [g-dry-cell / g-glucose]、飽和定数 $K_s = 0.50$  [g/L]、最大比増殖速度 $\mu_{max} = 0.30$  [h<sup>-1</sup>]とする。酵母の増殖速度はMonodの式に従うとすると、抜き取り出口での増殖制限基質濃度 $S$ 、必要な培養液の体積 $V$ 、そして希釈率 $D$ はいくらになるか計算し、単位も併せて答えなさい(有効数字2桁)。

|                    |  |
|--------------------|--|
| 専門科目（三）： 化学工学（その8） |  |
|--------------------|--|

V 解答欄

- 問1 以下のグラフ用紙に増殖曲線を作図し、必要な情報を記載しなさい。  
問2 問1の増殖曲線を6分割し、それぞれの増殖期が判るように区切りを図示し、それぞれの増殖期の名称を記載しなさい。



2022年度 神戸大学大学院工学研究科博士課程前期課程一般入試（応用化学専攻）試験問題

|                    |  |
|--------------------|--|
| 専門科目（三）： 化学工学（その9） |  |
|--------------------|--|

V 解答欄

|    |                                   |
|----|-----------------------------------|
| 問3 |                                   |
| 問4 | 比増殖速度の最大値 $\mu_{\max} =$ [      ] |
|    | 倍加時間 $t_d =$ [      ]             |

VI 解答欄

|    |                          |   |
|----|--------------------------|---|
| 問1 | ①                        | ② |
|    | ③                        | ④ |
|    | ⑤                        | ⑥ |
|    | ⑦                        | ⑧ |
|    | ⑨                        | ⑩ |
| 問2 | 増殖制限基質濃度 $S =$ [      ]  |   |
|    | 必要な培養液の体積 $V =$ [      ] |   |
|    | 希釈率 $D =$ [      ]       |   |