

プロセスシステム

【問1】以下の文章を読み、設問に答えよ。解答が数値を含む場合は有効数字を3桁とし、導出過程も記述すること。

加熱・冷却を伴う、あるプロセスシステムにおいて、熱交換器を追加することで生産コストを削減したい。追加前の反応器のまわり（図1）をみると、ストリーム1（S1）が加熱器によって200°Cまで加熱され、同じく200°Cで他のユニットから供給されるS2と共に、反応器に投入されている。反応後の生成物はS3として反応器から取り出され、冷却器で冷却されて次の操作へと送られている。S1, S2, およびS3の質量流量とS1, S3の加熱・冷却前後の温度、および平均の定圧熱容量は、図1中に示す条件で一定と見なすことができる。

- 1) 熱交換器追加前（図1）における、加熱器と冷却器の用役 [kW] をそれぞれ答えよ。
- 2) 加熱前の S1 と、冷却前の S3 をそれぞれ受熱流体、与熱流体とする熱交換器を導入し、プロセスの加熱・冷却用役を低減することを考える（図2）。ピンチ解析における与熱流体、受熱流体間の最低温度差 ΔT_{\min} [°C] を 0 とできる場合、最小の加熱用役 [kW], 冷却用役 [kW] をそれぞれ求めよ。その際、与熱流体に関する情報が書き込んである熱複合線図（温度-伝熱量図, 図3）を用いてもよい。
- 3) 加熱用役、冷却用役ともに、 1.00×10^6 ¥·kW⁻¹ の年間用役費用がかかる。 ΔT_{\min} [°C] と年間用役費用 C_{util} [¥] の関係を式で示せ。
- 4) 加熱器と冷却器、熱交換器の年間設備費用 (C_H [¥], C_C [¥], C_{HEX} [¥]) は伝熱面積 A [m²] の関数として、それぞれ式(1), (2)で表される。

$$C_H \text{ (または } C_C) = (5 + A) \times 10^6 \quad (1)$$

$$C_{\text{HEX}} = (10 + A) \times 10^6 \quad (2)$$

総括伝熱係数 U はすべて $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$ とするとき、 ΔT_{\min} [°C] と年間熱関連機器費用合計 C_{equip} [¥] との関係式を記せ。ここで、 A の導出には式(3)を用いるものとする。式(3)において、加熱器における温度差 ΔT は 60 °C, 冷却器における温度差 ΔT は 30 °C とし、熱交換器における伝熱温度差 ΔT を ΔT_{\min} とせよ。

$$A = \frac{Q}{U \Delta T} \quad (3)$$

- 5) 年間総熱費用 C_{tot} [¥] は、設問3) で求めた年間用役費用 C_{util} [¥] と、設問4) で求めた年間熱関連機器費用合計 C_{equip} [¥] の総和とする。横軸を ΔT_{\min} [°C], 縦軸を年間費用 C_i ($i = H, C, \text{HEX}, \text{util}, \text{equip}, \text{tot}$) [$10^6 \cdot \text{¥}/\text{年}$] とした平面上に、 $C_H, C_C, C_{\text{HEX}}, C_{\text{util}}, C_{\text{equip}}, C_{\text{tot}}$ の ΔT_{\min} に対する変化を、それぞれの直線または曲線の特徴がわかるように描け。
- 6) 年間総熱費用 C_{tot} を最小にする ΔT_{\min} を答えよ。

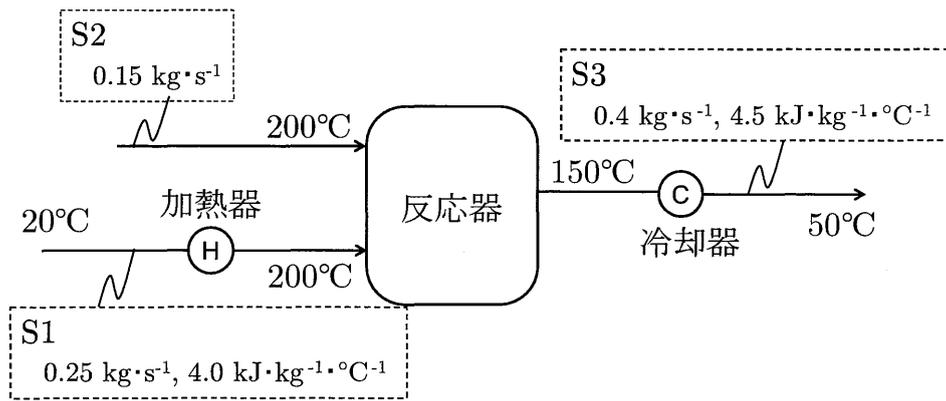


図 1

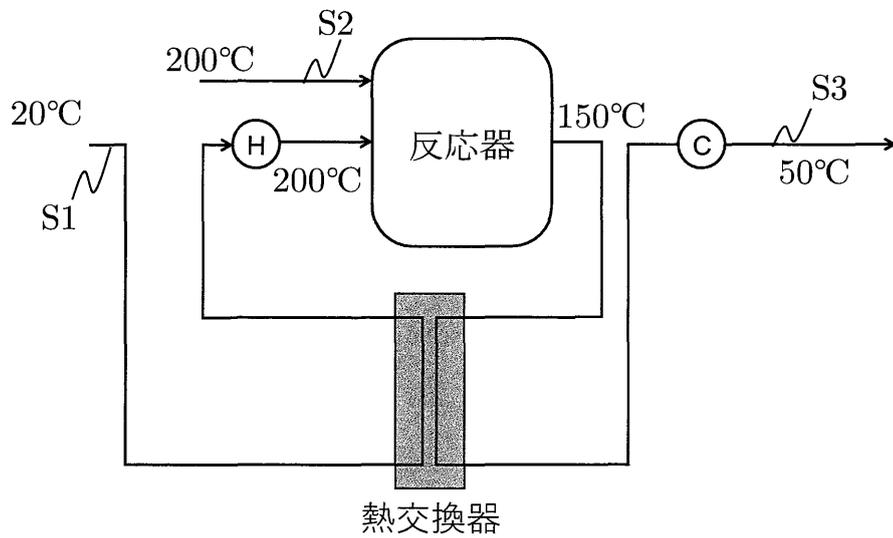


図 2

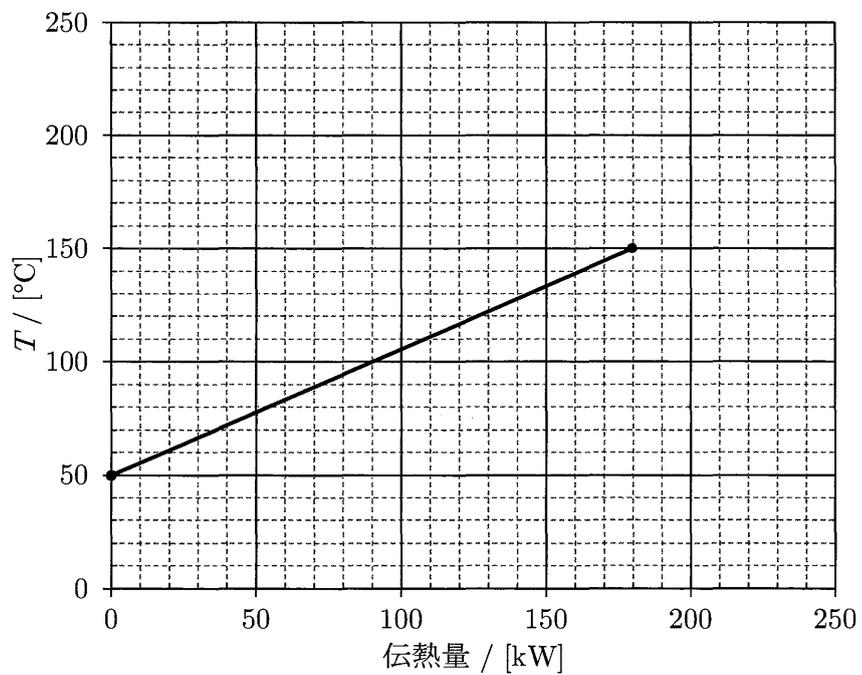


図 3

【問2】以下の文章を読み、設問1)～4)に答えよ。

図4に示す体積 V [m³]の連続攪拌槽型反応器を用いて原料 A から製品 B を製造する。流出溶液中の A の濃度を検出器 D で計測し、コントローラ C を用いて供給溶液の流入量を制御することで B の生産量を制御する。

反応は液相一次不可逆反応であるため、反応速度は反応速度定数 k [1/s]を用いて A の濃度の一次で表される。溶液の流入量を F [m³/s]、時刻 t における供給溶液中の A の濃度を $C_{Ai}(t)$ [mol/m³]、反応器内の A の濃度を $C_A(t)$ [mol/m³]とする。溶液の流出量は流入量に等しく F [m³/s]である。温度は一定とする。

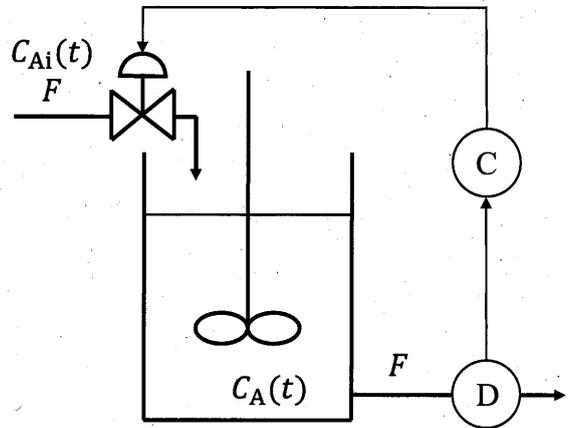


図4

制御対象プロセスの動的モデルは、原料 A に関する物質収支より、次式で与えられる。

$$\boxed{\text{ア}} = \frac{F}{V} C_{Ai}(t) - \frac{F}{V} C_A(t) - k C_A(t) \quad (1)$$

ここで、 F 、 k 、 V からなる文字式を $U = F/(F + kV)$ 、 $T = V/(F + kV)$ とおくと、

$$\boxed{\text{ア}} = \boxed{\text{イ}} \quad (2)$$

次に、初期条件、すなわち時刻 0 ($t = 0$) における供給溶液中および反応器内の A の濃度は 0 ($C_{Ai}(0) = C_A(0) = 0$) として、式(2)をラプラス変換すると次式を得る。ただし、 $C_{Ai}(s)$ 、 $C_A(s)$ は $C_{Ai}(t)$ 、 $C_A(t)$ をラプラス変換したものである。

$$C_A(s) = \boxed{\text{ウ}} C_{Ai}(s) \quad (3)$$

1) 空欄 $\boxed{\text{ア}} \sim \boxed{\text{ウ}}$ に当てはまる適切な文字式を答えよ。

2) 図5のブロック線図に示す、調節計の制御則が比例制御 (比例ゲイン K_P) の制御系を考える。 $G(s)$ は $\boxed{\text{ウ}}$ として求めた伝達関数である。目標値 C_{Aset} から制御量への伝達関数 $H_P(s)$ を求めよ。

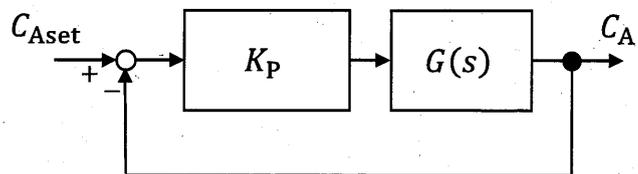


図5

3) 伝達関数 $H_P(s)$ に対して、目標値を C_{Aset} とした場合のオフセットを求めよ。

4) 設問3)のオフセットをゼロにするためには、調節計の制御則をどのようにすればよいか。調節計の制御則を文字式で答えよ。必要に応じて、適宜、定数を定義せよ。さらに、その制御則を用いた場合にオフセットがゼロになることを示せ。