

## 平成16年度 プロセス制御工学試験問題

図1に示す連続蒸留塔がある。この蒸留塔では、低沸成分Aと高沸成分Bの混合液を原料として供給し、塔頂から成分Aを、塔底から成分Bを製品として抜き出している。原料流量は生産計画に従って決定されるため、流量制御が行われている。留出液中のA成分モル分率 $x_D$ および缶出液中のB成分モル分率 $x_B$ は共に98%以上でなければならない。この製品仕様が満たされていることを確認するため、留出液側にはオンライン組成分析装置が設置されており、還流量Rを操作変数とする組成制御が実施されている。一方、缶出液側にはオンライン組成分析装置は設置されておらず、製品組成の代わりに塔内温度Tが制御されている。この温度制御系の操作変数は熱媒流量 $F_H$ である。還流槽と塔底部の液レベル $L_D$ と $L_B$ は、それぞれ留出液流量Dと缶出液流量Bで制御されている。また、塔頂圧力Pは冷媒流量 $F_C$ によって制御されている。以下の問いに答えよ。

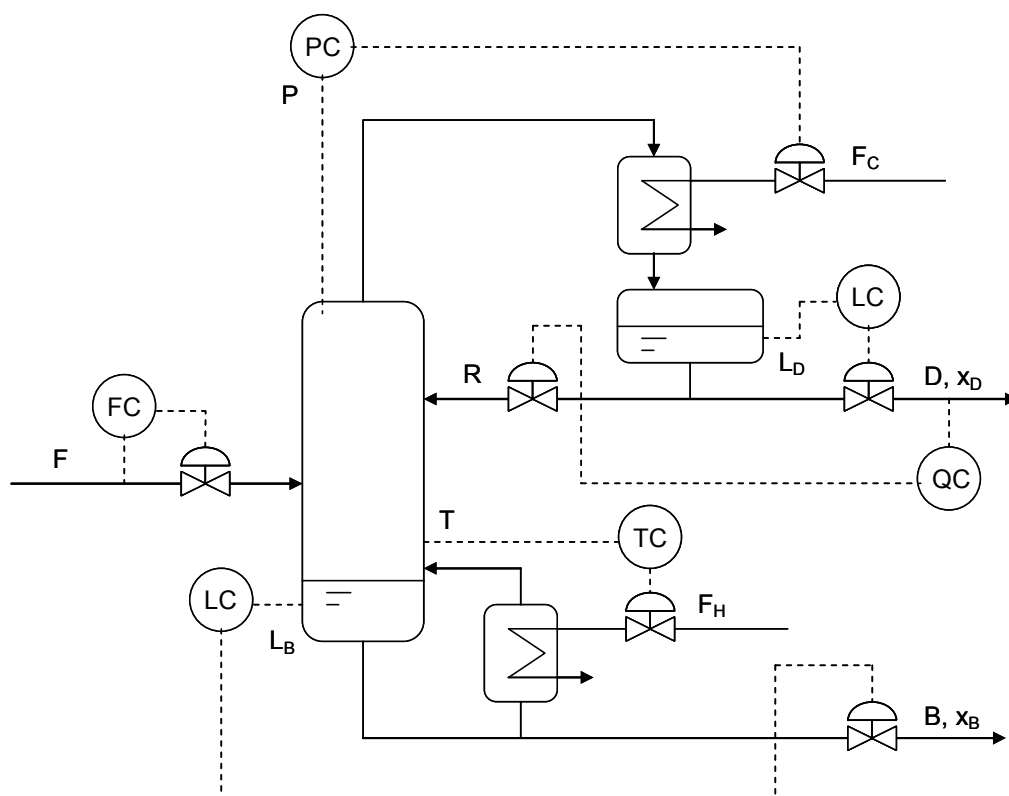


図1 連続蒸留塔

問題1 図1に示した制御系について、以下の問いに答えよ。

- (1) 制御変数と操作変数がそれぞれ6つあるが、制御変数と操作変数は1対1に対応づけられている。このような制御を何制御と呼ぶか。その名称を答えよ。
- (2) 還流槽の液レベル $L_D$ は、留出液流量Dの代わりに還流量Rを操作変数としても制御可能である。液レベル $L_D$ を還流量Rで制御しないのはなぜか。この蒸留塔の下流に位置するプロセスへの影響も考慮して、その理由を答えよ。
- (3) 缶出液中のB成分モル分率 $x_B$ を直接制御する代わりに、塔内温度Tを制御しているのはなぜか。塔内温度制御が組成制御の代用となる理由を答えよ。

問題2 還流槽液レベル制御系について、以下の問いに答えよ。

- (4) 還流槽への流入流量を $W$  [ $\text{m}^3/\text{min}$ ], 還流量を $R$  [ $\text{m}^3/\text{min}$ ], 留出液流量を $D$  [ $\text{m}^3/\text{min}$ ]とする。また, 還流槽の断面積は $A$  [ $\text{m}^2$ ]で一定であり, 液レベルは $L_D$  [ $\text{m}$ ]である。液体の密度は濃度や温度に関係なく一定であるとして, 物質収支式を導出せよ。
- (5) ある変数 $X$ の基準とする定常状態での値を $X_0$ とし, 変数 $X$ の定常値 $X_0$ からのずれを $\Delta X$ で表す。この表記法を用いて, 先に求めた物質収支式を, 各変数の定常値からのずれで表現せよ。
- (6) 物質収支式をラプラス変換して, 留出液流量 $\Delta D$ から液レベル $\Delta L_D$ への伝達関数を求めよ。
- (7) 比例制御 (比例ゲイン $K_p$ )を用いて留出液流量による液レベル制御を行うとき, ステップ状の設定値変更に対してオフセット (定常偏差) は残るか。理由と共に答えよ。

問題3 塔内温度制御系について、以下の問いに答えよ。

- (8) 熱媒流量 $F_H$ から塔内温度 $T$ への伝達関数を求めるために, ステップ応答実験を行った。その結果を図2に示す。なお, 蒸留塔が定常状態であることを確認した後, 時間0において熱媒流量 $F_H$ をステップ上に+2だけ変化させた。図2の結果から伝達関数を求めよ。

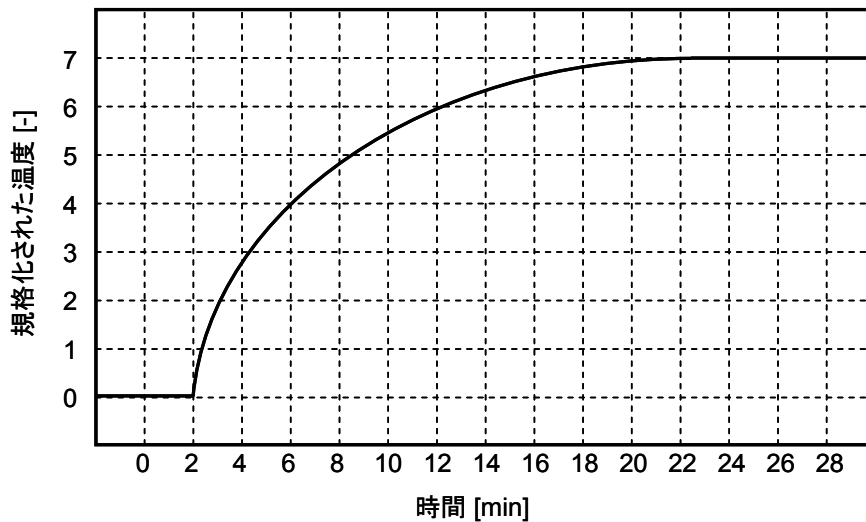


図2 温度制御ループのステップ応答実験結果

- (9) 塔内温度制御にPI制御を利用する。一次のIMCフィルタ

$$F(s) = \frac{1}{\lambda s + 1}$$

を用いて, IMC法に従ってPIコントローラを設計したい。プロセス伝達関数のむだ時間を無視して (1次遅れ要素のみに着目して), IMC法に従ってPIコントローラを設計せよ。

- (10) 設計したPIコントローラの比例ゲイン $K_p$  [-]と積分時間 $T_i$  [min]の値を答えよ。
- (11) 適当にIMCフィルタ時定数 $\lambda$ を調整した。このときの開ループ伝達関数のボード線図を図3に示す。塔内温度制御系のゲイン余裕と位相余裕を求めよ。
- (12) 一般的に, ゲイン余裕は3~10dBに設定することが望ましいとされる。そこで, 比例ゲインのみを変化させて, ゲイン余裕が10dBになるようにしたい。調節後の比例ゲインを求めよ。

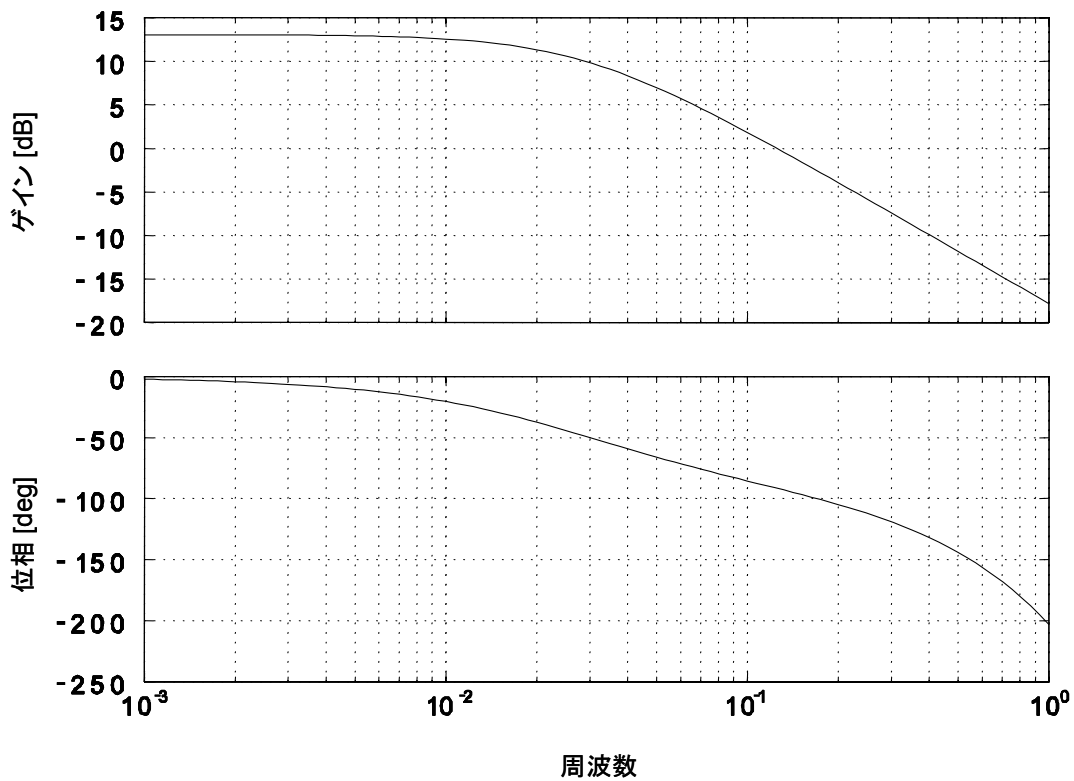


図3 開ループ伝達関数のボード線図

問題4 塔内温度制御系について、より詳細に検討する。ここまで、操作変数は熱媒流量 $F_H$ であるとしてきたが、実際の操作変数はバルブ開度 $U$ である。以下の問いに答えよ。

(13) 熱媒流量制御系のブロック線図を図4に示す。ここで、 $C_H$ はコントローラ、 $P_H$ はバルブの伝達関数、 $Z$ は外乱である。設定値 $F_{Hset}$ から熱媒流量 $F_H$ への閉ループ伝達関数を求めよ。

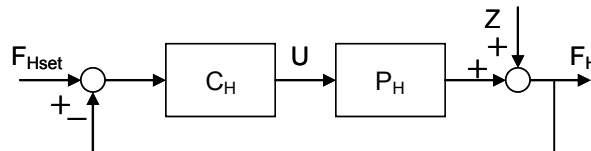


図4 熱媒流量制御系のブロック線図

(14)  $F_{Hset}$ を定常値 ( $F_{Hset}=F_H=0$ ) から $\Delta F_H$ だけステップ状に変化させた場合のオフセット (定常偏差) を求めよ。なお、コントローラとプロセスの伝達関数はそれぞれ次式で与えられる。ここで、 $K_{CH}$ ,  $K_{PH}$ ,  $T_{PH}$ はいずれも定数である。

$$C_H = K_{CH}, \quad P_H = \frac{K_{PH}}{T_{PH}s + 1}$$

(15) 先に設計した塔内温度制御系では、操作変数を熱媒流量 $F_H$ とした。しかし、現実には $F_H$ の制御系が存在し、塔内温度制御系全体のブロック線図は図5のようになる。このブロック線図に基づいて、設定値 $T_{set}$ から塔内温度 $T$ への閉ループ伝達関数を求めよ。

- (16) 外側ループのコントローラ $C_T$ にPI制御を、内側ループのコントローラ $C_H$ にP制御を用いるとする。設定値 $T_{set}$ をステップ状に変化させた場合、塔内温度 $T$ にオフセット（定常偏差）は残るか。理由と共に答えよ。
- (17) 塔内温度制御の操作変数をバルブ開度とすると、図6に示すような塔内温度制御系も実現可能であることがわかる。図5の制御系と比較すると、図6の制御系ではコントローラが1つだけでよいため、制御系の設計と実装が簡単であると考えられる。では、図5の制御系を利用するメリットは何であるか。具体的に答えよ。
- (18) 図5のような二重構造になった制御を何制御と呼ぶか。その名称を答えよ。

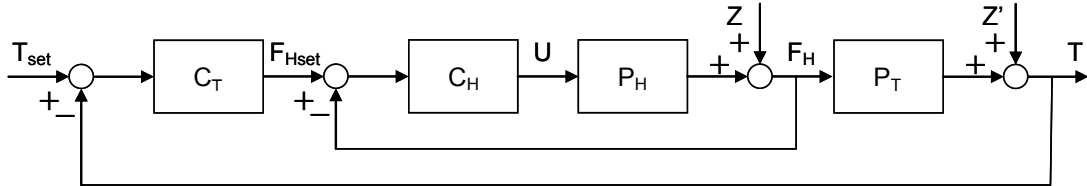


図5 塔内温度制御系全体のブロック線図

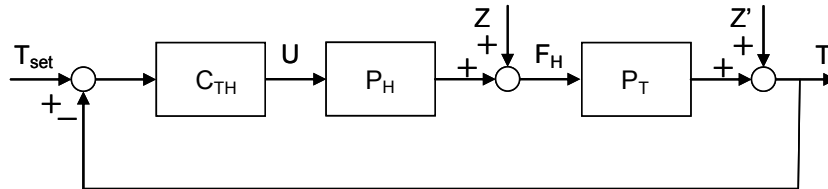


図6 別の塔内温度制御系のブロック線図

以上