

プロセス制御工学

7. 多変数プロセスの制御

京都大学 加納 学

Division of Process Control & Process Systems Engineering
Department of Chemical Engineering, Kyoto University

manabu@cheme.kyoto-u.ac.jp

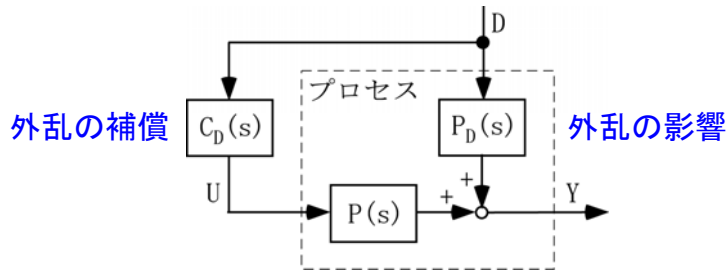
<http://www-pse.cheme.kyoto-u.ac.jp/~kanol/>



フィードバック制御とフィードフォワード制御

2

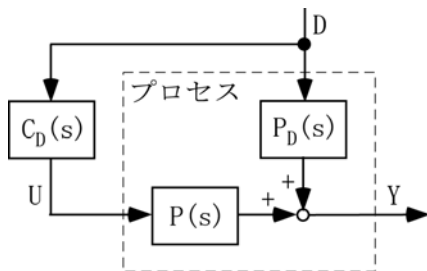
- **フィードバック制御**
外乱抑制や設定値追従に有効であるが、偏差を検出してからしか操作を行わないため、特にむだ時間が大きなプロセスでは、制御性能が低くなってしまう。
- **フィードフォワード制御**
外乱が測定可能であり、かつ対象プロセスのモデルが利用可能であれば、制御性能を改善できる。



フィードフォワード制御

外乱の影響が制御変数に現れないように操作変数を調節する

$$C_D P + P_D = 0 \quad \Rightarrow \quad C_D = -\frac{P_D}{P}$$



$$P(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-Ls}$$

$$P_D(s) = \frac{K_D}{T_D s + 1} e^{-L_D s}$$

$$C_D = -\frac{P_D}{P} = -\frac{K_D(Ts + 1)}{K(T_D s + 1)} e^{-(L_D - L)s}$$

理想的なフィードフォワードコントローラが常に実現できる
とは限らない。(むだ時間の逆数を用いることに注意)

$$C_D = -\frac{K_D(Ts+1)}{K(T_Ds+1)} e^{-(L_D-L)s}$$

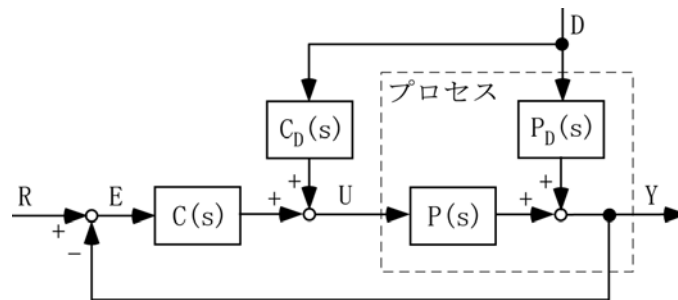
進み遅れ要素

$$C_D = -\frac{K_D(Ts+1)}{K(T_Ds+1)}$$

定常状態フィードフォワード制御

$$C_D = -\frac{K_D}{K}$$

プロセスと外乱の動特性が大きくは変わらないような場合には、十分により制御性能を実現できる。

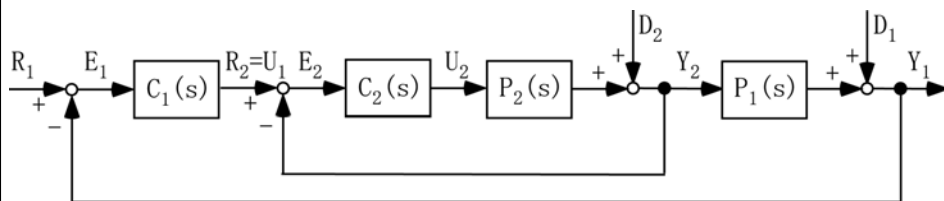
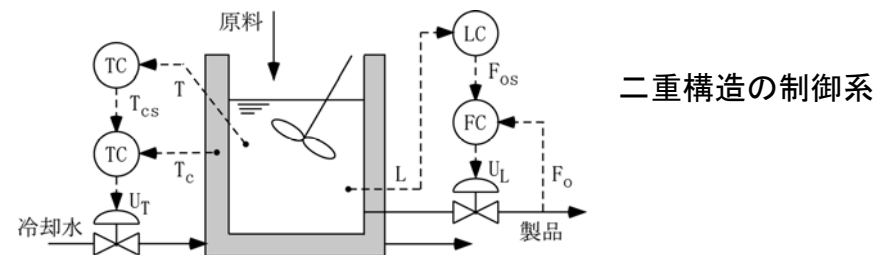
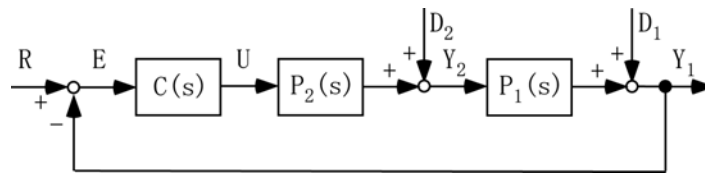
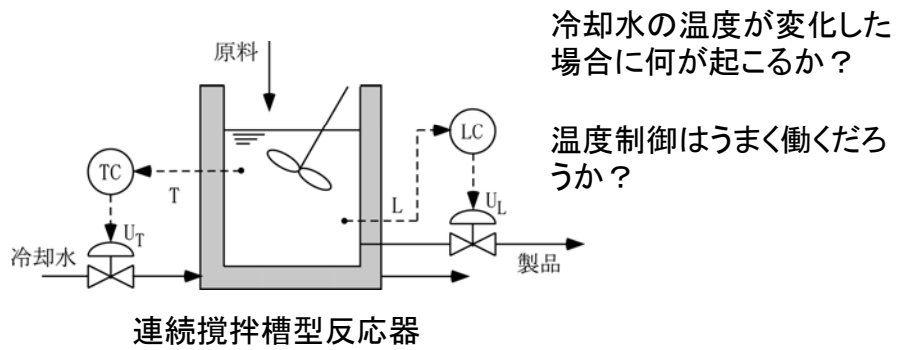


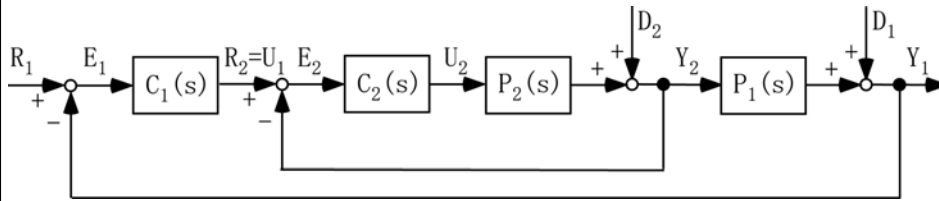
例題7.2

$$Y = \frac{CP}{1+CP} R + \frac{C_D P + P_D}{1+CP} D$$

C 設定値追従

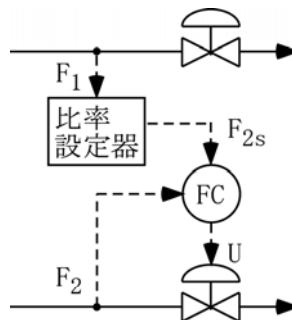
C_D 外乱抑制





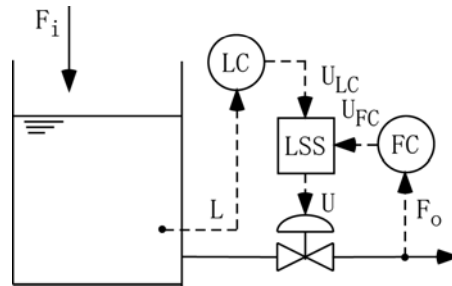
- プロセスP1に比べてプロセスP2の動特性が十分に速い（むだ時間や時定数が小さい）場合にのみ、カスケード制御は有効である。
- まず2次制御ループを設計し、次に1次制御ループを設計する。なお、2次制御ループは比例制御でもよい（積分制御を利用しなくても、重要な制御変数Y1に定常偏差は残らない）。

複数の変数の比をある値に保持する制御



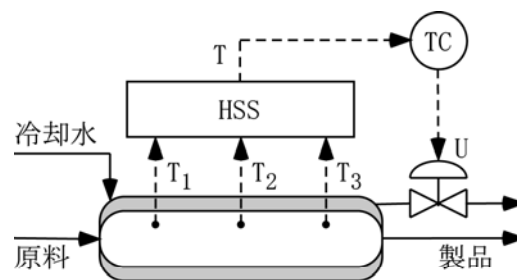
- 蒸留塔において、還流比を一定に保つ。
- リサイクル流量とパーズ流量の比を一定に保つ。
- 炉において、燃料流量と空気流量の比を一定に保つ。

プロセスの危険回避や装置保護を目的として利用される制御



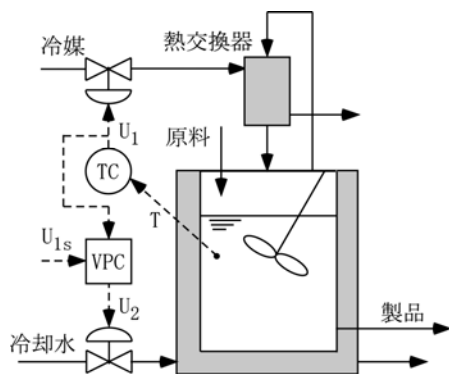
- 下流側プロセスへの供給流量を一定に保つ.
- 貯留タンクが空になってはいけない.
- 通常は流量制御を行い、液レベルが設定値を下回ると液レベル制御に切り替える.

同種の制御変数から1つを選択して制御する手法



- 触媒や反応器材料を保護するため、反応器内最高温度が上限値を超えないように制御したい.
- 管型反応器内の温度分布は条件によって変化する.
- ハイセクタスイッチを利用し、最高温度を制御する.

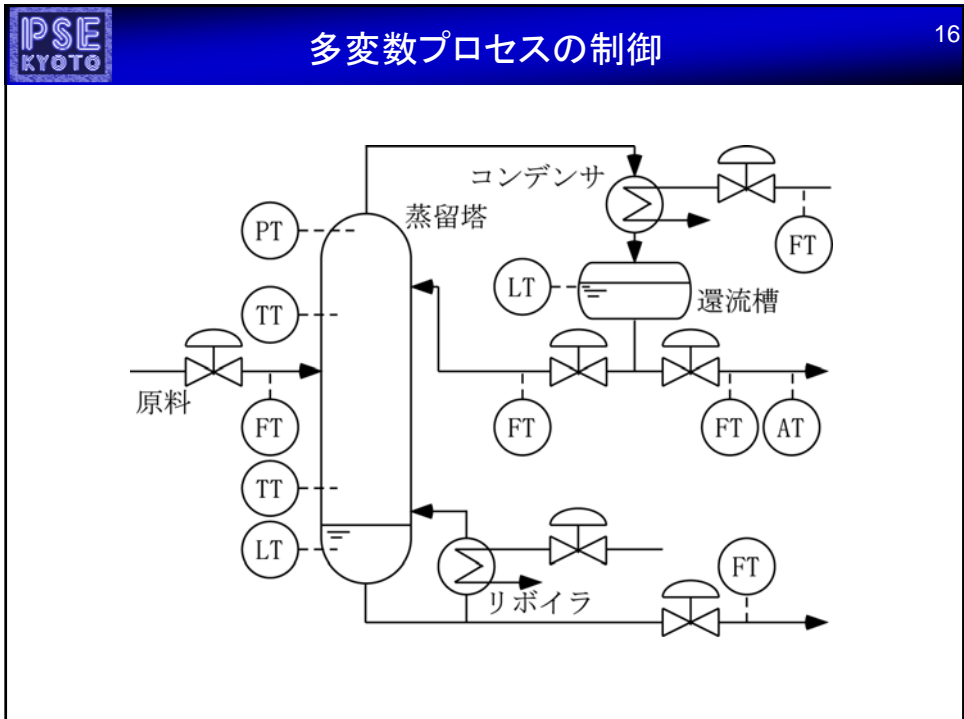
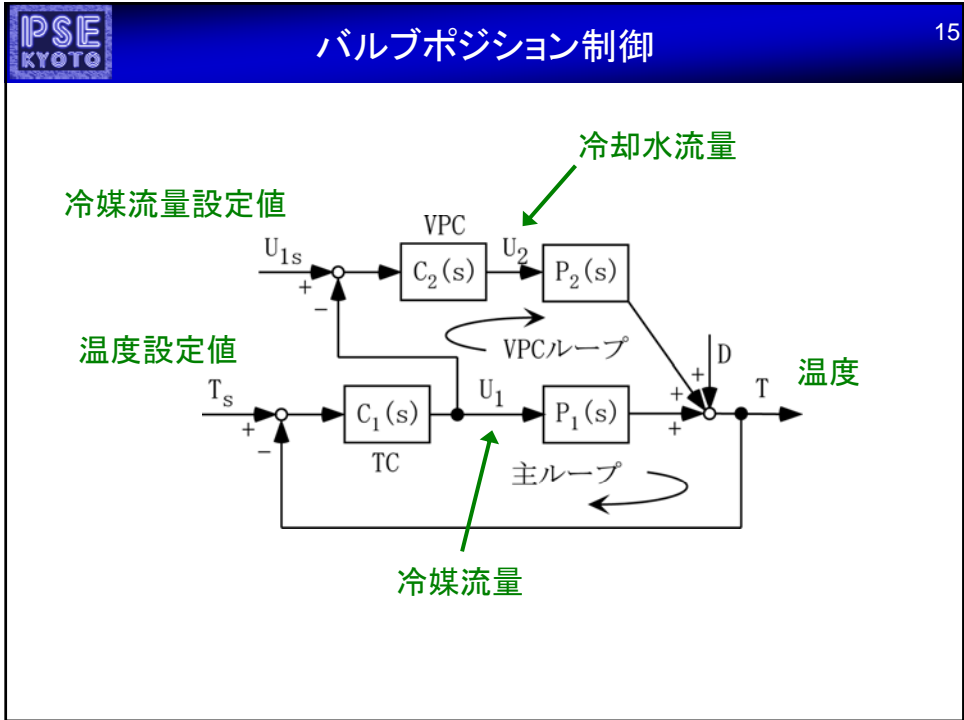
- 貯留タンクは何のために存在するのか？
- 貯留タンクの液レベルはどのように制御されるべきか？
- 下流側装置の運転を安定させるためには、供給流量を一定に保つことが重要であり、貯留タンクの液レベルは上下限の範囲内にあればよい。
- 個々の制御ループを最適に調整するのではなく、プロセス全体を考慮して制御系を設計する必要がある。

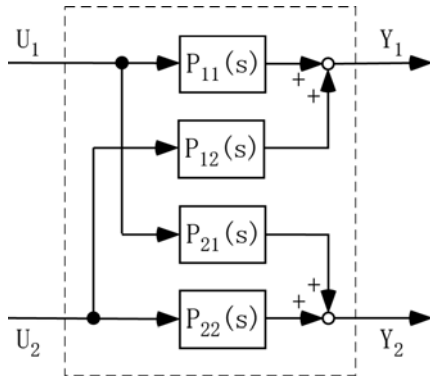


<2入力1出力系>

- 反応器内温度の制御に、冷却水と冷媒が利用可能
- 冷却水
低い速応性, 低いコスト
- 冷媒
高い速応性, 高いコスト

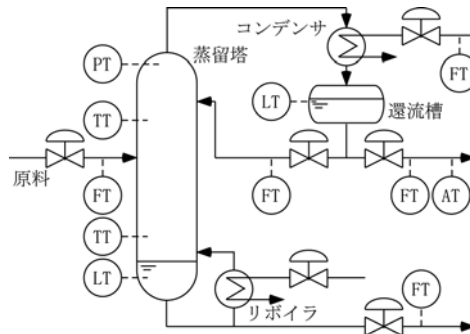
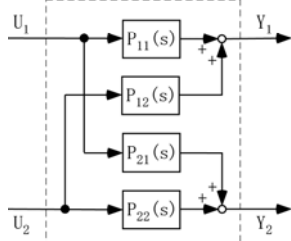
- 反応器内温度を設定値に一致させると同時に、冷媒使用量を最小限に抑える制御系を実現したい。
- 迅速な温度制御に加えて、ゆっくりとした冷媒流量制御を行う。





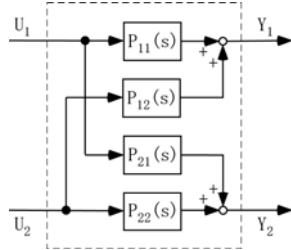
$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$$

- マルチループ制御では、制御変数と操作変数の組み合わせ(ペアリング)が重要である.
- ペアリング選択の基本原則
 - 制御変数に直接かつ迅速に大きな影響を与える操作変数を選択する.
 - 他の制御変数や操作変数への影響が小さくなるようなペアリングを選択する.
- 干渉を小さくする.



■ 相対ゲイン = 干渉の指標

他のループを開ループにした場合の伝達関数と閉ループにした場合の伝達関数の比. 1に近ければ干渉は弱く, そのペアリングは適切と判断できる.



$$\lambda_{11}(s) = \frac{\left. \frac{Y_1(s)}{U_1(s)} \right|_{open}}{\left. \frac{Y_1(s)}{U_1(s)} \right|_{closed}} = \frac{P_{11}P_{22}}{P_{11}P_{22} - P_{12}P_{21}}$$

$$\lambda_{11} = \frac{K_{11}K_{22}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & 1 - \lambda_{11} \\ 1 - \lambda_{11} & \lambda_{22} \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{11} = \frac{K_{11}K_{22}}{K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21}}$$

- 各行および各列の要素の和は1となる.
- 相対ゲインは無次元であり, 変数の単位やスケールングには依存しない.

- $\lambda_{11}=1$
干渉はない. このペアリングを採用する.
- $\lambda_{11}=0$
開ループゲインが0であり, 制御不能. このペアリングを採用してはならない.
- $\lambda_{11}<0$
開ループゲインと閉ループゲインの符号が異なり, 他のループの開閉により, 制御応答が反転する. このペアリングを採用してはならない.
- $0<\lambda_{11}<1$
干渉がある. 1に近いペアリングを採用する.
- $\lambda_{11}>1$
大きいほど干渉が強い.

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-2.2e^{-1.0s}}{8.5s+1} & \frac{1.3e^{-0.3s}}{7.1s+1} \\ \frac{-2.8e^{-1.8s}}{8.3s+1} & \frac{4.3e^{-0.4s}}{9.0s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{11} = \frac{(-2.2)(4.3)}{(-2.2)(4.3) - (-2.8)(1.3)} = 1.63$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1.63 & -0.63 \\ -0.63 & 1.63 \end{bmatrix}$$

Niederlinski Index

- マルチループ制御系が安定であるための必要条件.
- マルチループ制御系内の各コントローラは積分動作を含み, 個々の制御ループは他の任意の制御ループが開かれた場合に安定であると仮定する.

$$NI = \frac{\det(\mathbf{K})}{\prod_{i=1}^n K_{ii}} > 0$$

$\det(\mathbf{K})$ は定常ゲイン行列 \mathbf{K} の行列式

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-2.2e^{-1.0s}}{8.5s+1} & \frac{1.3e^{-0.3s}}{7.1s+1} \\ \frac{-2.8e^{-1.8s}}{8.3s+1} & \frac{4.3e^{-0.4s}}{9.0s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$$

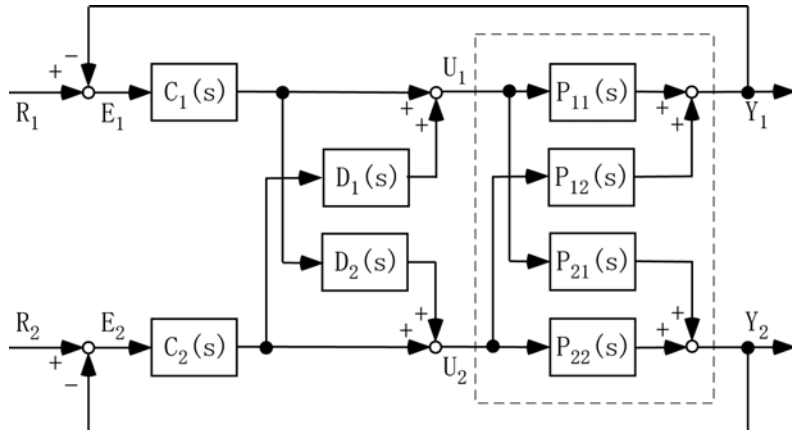
U1-Y1, U2-Y2

$$NI = \frac{(-2.2)(4.3) - (-2.8)(1.3)}{(-2.2)(4.3)} = 0.62$$

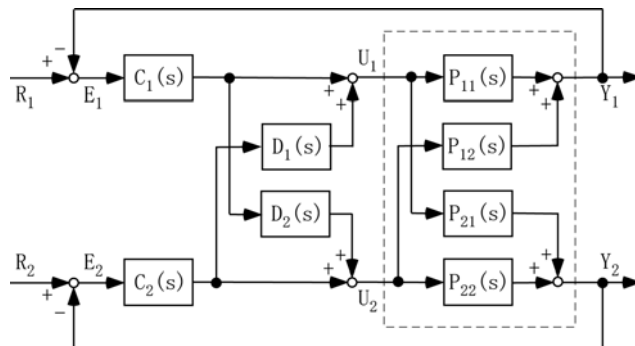
U1-Y2, U2-Y1

$$NI = \frac{(-2.8)(1.3) - (-2.2)(4.3)}{(-2.8)(1.3)} = -1.6$$

- マルチループ制御系に、干渉を除去するための補償器 (デカップラ) を導入する.



$$D_1 P_{11} + P_{12} = 0 \quad \Rightarrow \quad D_1 = -\frac{P_{12}}{P_{11}}$$



$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-2.2e^{-1.0s}}{8.5s+1} & \frac{1.3e^{-0.3s}}{7.1s+1} \\ \frac{-2.8e^{-1.8s}}{8.3s+1} & \frac{4.3e^{-0.4s}}{9.0s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$$

$$D_1 = \frac{0.59(8.5s+1)}{7.1s+1} e^{0.7s} \quad \text{物理的に実現不可能 (未来の予測)}$$



$$D_1 = \frac{0.59(8.5s+1)}{7.1s+1}$$

- モデル誤差の影響に注意しなければならない.
- **定常状態非干渉化**
 - プロセスの定常ゲインのみを利用する.
 - 過渡状態で干渉が残るが, 動特性が類似している場合には, 十分な制御性能を実現できる.
- **部分非干渉化**
 - 一方のデカップラのみを利用する.
 - 一方の制御変数が他方の制御変数よりも重要である場合や, 一方の干渉が小さい場合に有効である.

■ 宿題？

