

# プロセス制御工学

## 1. プロセス制御の概要

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/~kano/>



- プロセス制御の役割
- フィードバック制御
- フィードバック制御系の構成
- フィードバック制御系の設計問題
- 計装

- **制御**  
機械や設備が目的通り動作するように操作すること
- **プロセス**  
石油, 化学, 鉄鋼, 食品などに代表されるプロセス産業の製造工程(組立産業の製造工程とは特徴が異なる)
- **プロセス制御**  
プロセスを対象とした制御  
各種装置における温度, 圧力, 液レベル, 流量, さらには物質の性質の制御



- **安全性**  
安全に運転することが何よりも重要である。
- **製品仕様(スペック)**  
指定された品質の製品を指定された量だけ生産しなければならない。
- **環境基準**  
排水や排煙などプラントから排出される物質は法律などで定められた基準を満たさなければならない。
- **経済性**  
利益を追求するため, 常に最適な運転状態を実現しておく必要がある。



**■ 外乱抑制**

原料の特性, 冷却水や加熱蒸気などのユーティリティの特性, 外気温などの外部環境, 触媒活性などが変化すれば, プロセス制御なしに仕様を満たす製品を生産し続けることはできない. したがって, 外部環境などの変化 (**外乱**) が対象プロセスに与える影響を軽減することが必要になる.

**■ 設定値追従**

最適な運転を実現するためには, 温度や流量などを指定された値 (**設定値**) まで速やかに変化させたり, プロセスの状態を指定されたプロファイルに従って変化させなければならない.

**■ 分布定数系**

温度, 濃度, 圧力など, プロセスの状態を表す変数が空間的に分布している (値が位置によって異なる) プロセス

例) 連続攪拌槽型反応器, 管型反応器, ...

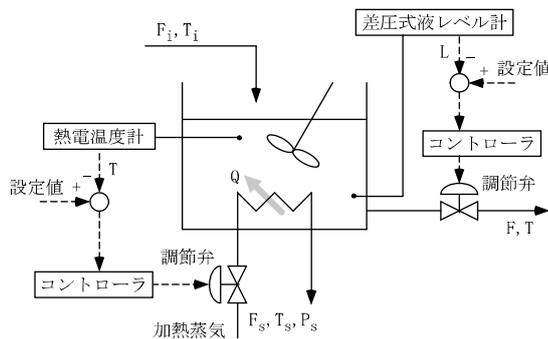
**■ 集中定数系**

状態を表す変数が空間的に分布していない (値が位置に依存しない) プロセス

ほとんどのプロセスが分布定数系であるが, 簡単のため, 集中定数系に近似して取り扱う.

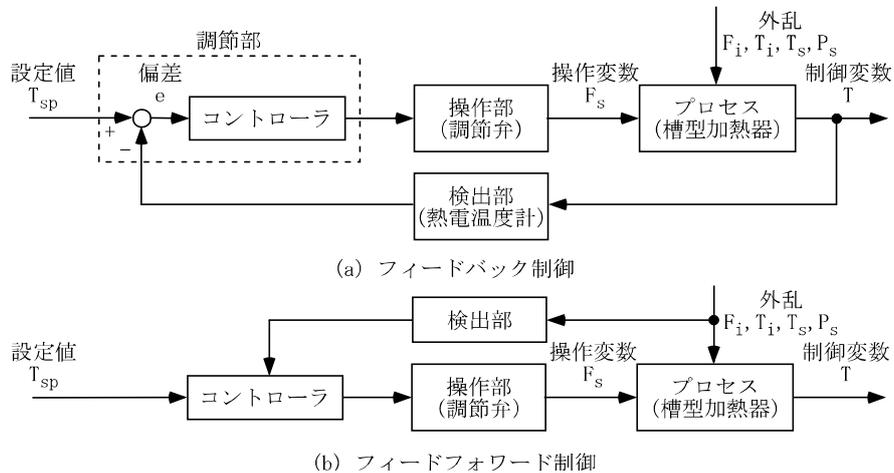


- プロセス制御の役割
- **フィードバック制御**
- フィードバック制御系の構成
- フィードバック制御系の設計問題
- 計装



攪拌槽型加熱器の制御

- **コントローラ(調節器)**
- **センサ(検出部)**  
熱電温度計
- **操作端(操作部)**  
調節弁
- **制御変数(制御量)**  
槽内温度
- **操作変数(操作量)**  
加熱蒸気流量
- **外乱**  
原料の流量や温度
- **設定値**  
槽内温度目標値



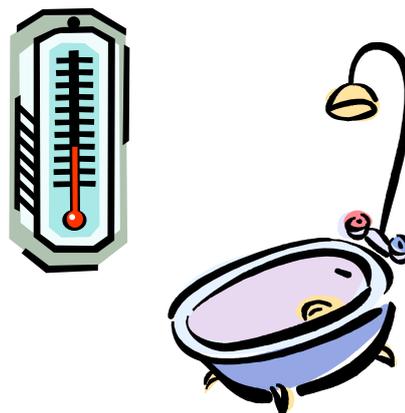
- **フィードバック制御 (閉ループ制御)**  
 制御変数を利用する。  
 外乱に起因する制御変数の変動を抑制できると同時に、設定値を変更することで様々な状態を実現できる。
- **フィードフォワード制御 (開ループ制御)**  
 制御変数を利用しない。  
 制御結果 (偏差) に基づく修正が行われなため、すべての外乱が正確に測定でき、かつモデルが正確でなければ、制御変数がその設定値からずれてしまう。
- 現実にはフィードフォワード制御のみを利用するのではなく、**フィードフォワード制御とフィードバック制御を併用**する場合が多い。

- 制御変数？
- 操作変数？
- 外乱？
- 設定値？



- フィードフォワード制御は利用できるだろうか？
- 利用する場合, 何が必要になるだろうか？

- 制御変数？
- 操作変数？
- 外乱？
- 設定値？



- フィードフォワード制御は利用できるだろうか？
- 利用する場合, 何が必要になるだろうか？

- 自動制御

制御装置によって自動的に行われる制御

例) エアコンによる室温制御



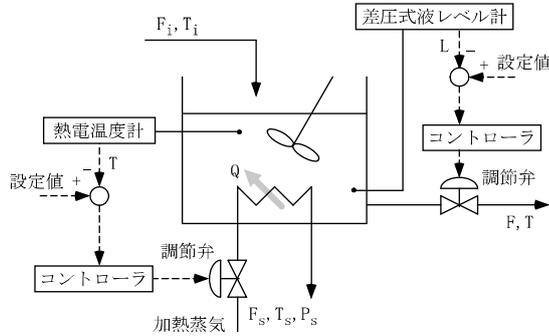
- 手動制御

人間が手作業で行う制御

例) アクセルとブレーキによる車速制御



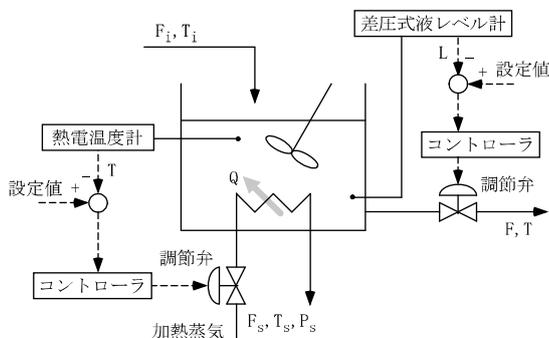
- プロセス制御の役割
- フィードバック制御
- **フィードバック制御系の構成**
- フィードバック制御系の設計問題
- 計装



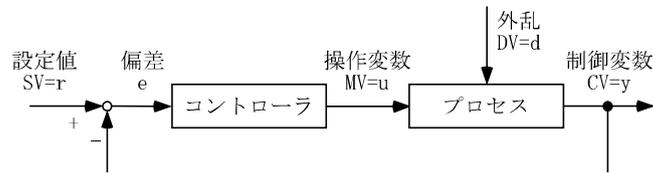
攪拌槽型加熱器の制御

- コントローラ(調節器)
- センサ(検出部)  
熱電温度計
- 操作端(操作部)  
調節弁
- 制御変数(制御量)  
槽内温度
- 操作変数(操作量)  
加熱蒸気流量
- 外乱  
原料の流量や温度
- 設定値  
槽内温度目標値

- 入力変数  
外界からプロセスへの影響
- 出力変数  
プロセスから外界への影響



- 入力変数?
- 出力変数?
- 流出流量はどちらだろうか?



■ **コントローラ**

入力変数: 偏差 (設定値と制御変数)  
出力変数: 操作変数

■ **プロセス**

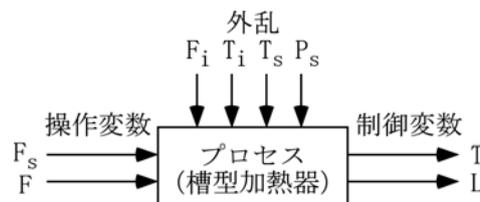
入力変数: 操作変数, 外乱  
出力変数: 制御変数

■ **多変数 (多入力多出力, MIMO) プロセス**

操作変数と制御変数がそれぞれ複数存在するプロセス

■ **1入力1出力 (SISO) プロセス**

操作変数と制御変数がそれぞれ1つであるプロセス



- プロセス制御の役割
- フィードバック制御
- フィードバック制御系の構成
- **フィードバック制御系の設計問題**
- 計装

- 制御目的の設定
- 制御すべき変数の選択
- 操作すべき変数の選択
- 制御構造の選択
- 制御手法の決定
- 制御パラメータの調整
- 制御性能の評価と監視



まず最初に設計者が決めなければならないのは制御目的である。

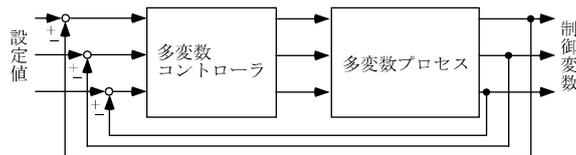
- 外乱の抑制
- プロセスの安定化
- 最適な操作の実現
- . . .

- 制御目的を達成するために制御すべき変数を選ぶ必要がある。
- 加熱器の例では、槽内温度を希望温度に一致させることが制御目的であるから、槽内温度を制御すべきである。
- 制御したい変数が測定できない場合には、適切な代替変数を探さなければならない。例えば、蒸留塔において製品組成のオンライン測定機器が利用できない場合、製品組成の代わりに塔内温度を制御変数として利用することが多い。
- 測定可能な変数から製品組成を推定できるモデル(ソフトセンサー)を構築し、得られた推定値を制御量とする場合もある。このような制御は**推定制御**と呼ばれる。

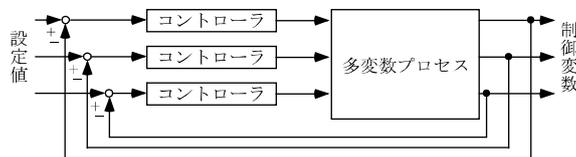
- 制御目的を達成するために相応しい操作変数を選ぶ必要がある。
- 制御変数に直接かつ迅速に影響する操作変数を選択する。
- 加熱器の例では、槽内温度を制御するためには加熱蒸気流量を操作変数に、液レベルを制御するためには流出流量を操作変数にすべきである。

- 制御目的の設定
- 制御すべき変数の選択
- 操作すべき変数の選択
- 制御構造の選択
- 制御手法の決定
- 制御パラメータの調整
- 制御性能の評価と監視

- 一般的な化学プロセスでは、制御すべき変数と操作可能な変数がともに複数存在する。
- 多変数系を制御対象とする場合には、プロセス全体を同時に考慮する**多変数制御**を利用するのか、あるいは複数のSISO制御系からなる**マルチループ制御**を利用するのかを判断する必要がある。



(a) 多変数制御

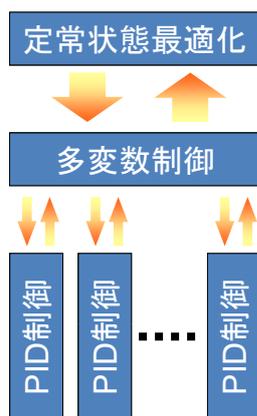
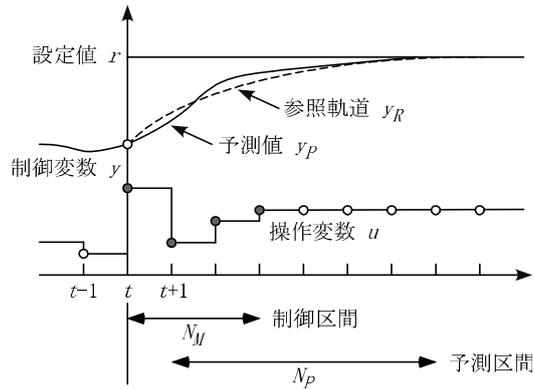


(b) マルチループ制御

- **多変数制御**  
高い制御性能を実現できる反面、複雑なプロセスの動特性を表現できるモデルが必要になる。
- **マルチループ制御**  
どの制御変数をどの操作変数で制御するかという組み合わせ(ペアリング)を決めなければならない。

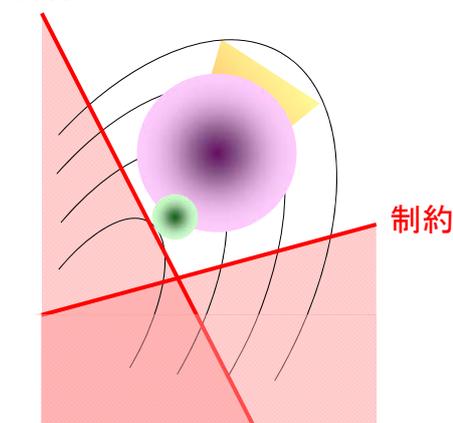
■ モデル予測制御

プロセスの動的モデルに基づいて、未来の制御変数の変化を予測し、制御変数と設定値ができるだけ一致するような操作変数を求める。



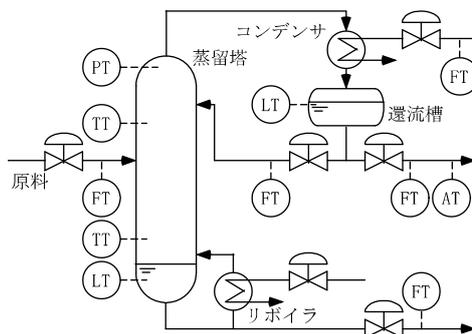
階層的制御構造

バラツキを抑えることで、より良い(制約に近い)運転を実現できる。



- 制御変数に直接かつ迅速に影響す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組み合わせを選択する.
- ある制御ループが別の制御ループに与える影響のことを**干渉**という. 多変数プロセスを制御対象とする場合, この干渉の大きさを評価し, 干渉が小さくなるように制御系を設計する必要がある.

- 留出製品組成は還流量(還流比)で制御すべきか？



- 常識が正しいとは限らない. RGA等を用いて, 適切なペアリングを選択する必要がある.

- 制御目的の設定
- 制御すべき変数の選択
- 操作すべき変数の選択
- 制御構造の選択
- 制御手法の決定
- 制御パラメータの調整
- 制御性能の評価と監視

- 制御量から操作量を決定する仕組み(制御則)を決定し、コントローラを設計する必要がある。
- 現在までに様々な制御則が提案されているが、最も基本的かつ重要な制御則は比例積分微分(PID)制御則である。
- モデル予測制御などの高度制御が広く普及した現在でも、PID制御の重要性は変わらない。それは、PID制御が単純であり、かつ制御に不可欠な基本要素を備えているからである。

- 制御目的を達成するためには、適切な制御パラメータの調整が不可欠である。
- 分散型制御システム(DCS)導入時の標準設定のまま制御しているなんてことはないか？
- 勘と経験だけに頼って調整していないか？

プロセスの運転に影響を与えることなく、数多くの制御ループの性能を評価・監視したい。もちろん、運転員や制御エンジニアに負荷をかけたくはない。

日常の運転データだけから制御性能を評価できないだろうか？



制御システム



プロセス

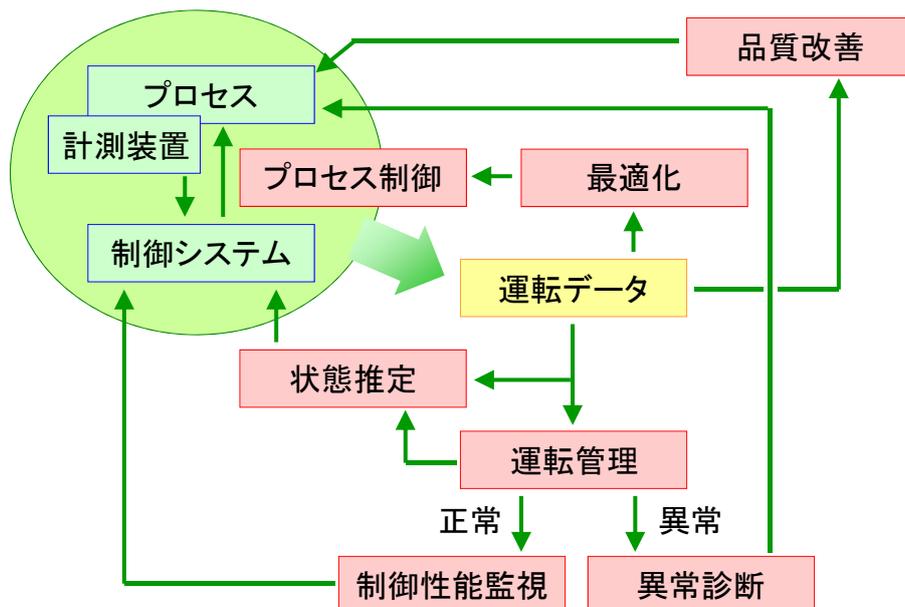
- プロセス制御の役割
- フィードバック制御
- フィードバック制御系の構成
- フィードバック制御系の設計問題
- 計装

- 計装  
計器や分散型制御システム(DCS)の選定から制御系設計までを含む広範な技術の総称

- P&ID (Piping & Instrumentation Diagram)  
計測機器や調節弁の配置, さらに制御構造をまとめた図

P	圧力	C	制御
T	温度	I	指示
L	レベル	R	記録
F	流量		
Q	品質(濃度など)		
LIC	レベル指示制御器		
QIR	濃度指示記録計		

- プロセス制御の役割
- フィードバック制御
- フィードバック制御系の構成
- フィードバック制御系の設計問題
- 計装



■ 宿題？

