プロセス制御

化学システム工学プログラム
清水忠明

この講義の方針

●理解すること(＝知識を実際の現場で使えること)

→頭で覚えない。腕で覚える。本を読んだだけで身に付く技術は無い!　頭で覚えた(暗記した)ものはすぐなくなる。自分で手を使って計算して身に付けた技能は残る。繰り返し自分で行うこと。

この講義の方針

●ある方法で出した計算結果を別の方法でCross Checkすること。計算機は入力ミスや計算方法の間違いを指摘してくれない。

同じ結果を与える(はずの)方法が2つあれば、両者を試して本当に同じ結論になるかを見る。例えば、微分方程式の解を、近似解(数値解)と式の導出(厳密解、解析解)の両方で得て、ほぼ同じ結果になるかどうかを確認する。

この講義の方針

●1つの科目の知識だけでデザインはできない。
複数の科目の知識を統合して初めてデザイン
ができる。この講義を受けるにあたっては、
他の講義の内容を復習したり予習したりする
必要がある。

科目の内容

最終的な目的：プロセス(反応器)の状態を予測したり、希望した状態にするための手法の確立。

中間過程

プロセスの動特性を解析する方法

On-Off 制御、PID制御の計算方法

安定性判別

道具としてのラプラス変換とフーリエ変換

到達目標

(1)各種プロセスの入力を変化させたときの出力の時間変化を与える微分方程式を導けること。

(2)オンオフ制御器の動作を理解すること。

(3)PID制御の動作を実時間で計算できること。

(4)PID制御の安定性を判定すること。

(5)ラプラス変換、フーリエ変換ができること。

講義の成果が卒業研究などで具体的に利用できるケース

1)実験装置の制御(温度制御など)

2)周期的変動のあるデータから代表的な値を得る方法(高周波ノイズの低減の仕方等)

3)過渡的な現象を測定する測定器に必要とされる特性

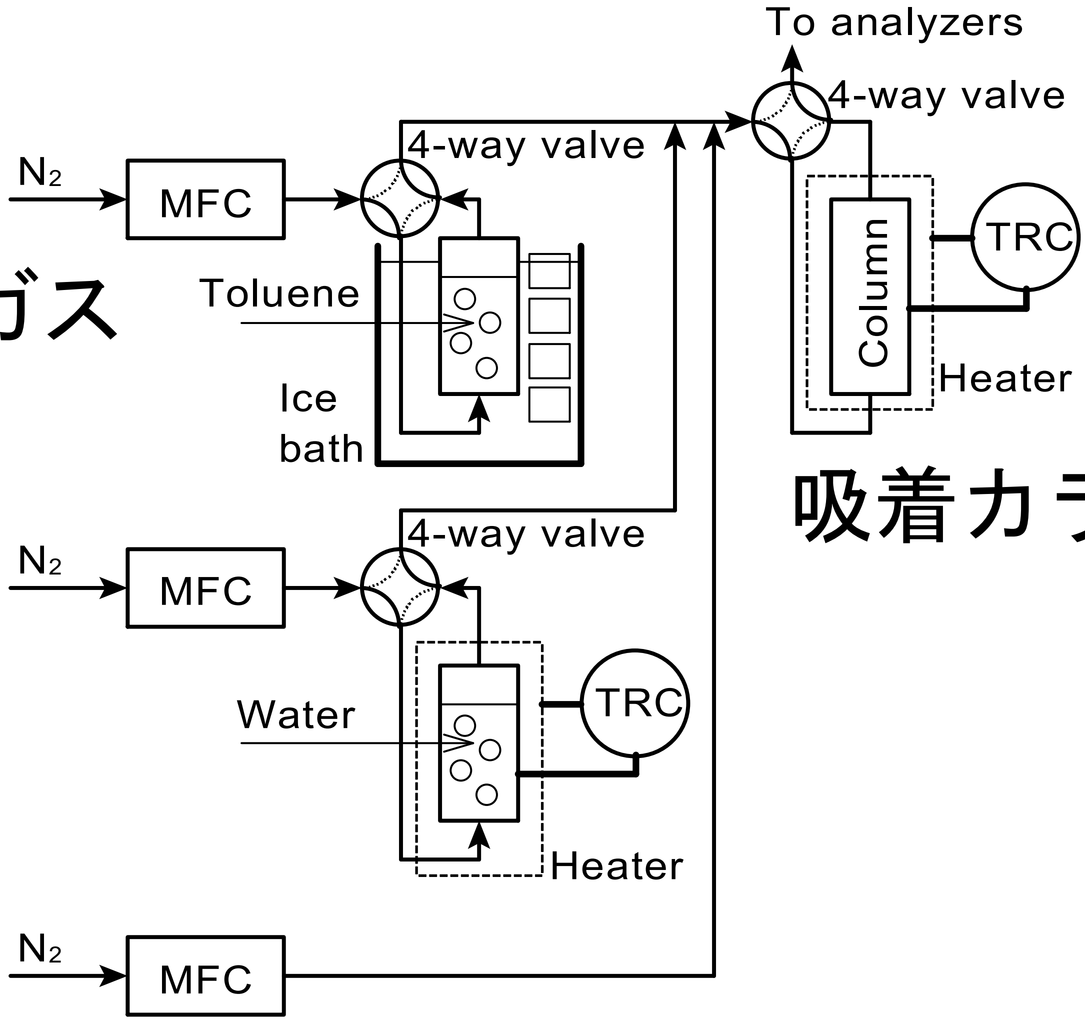
4)時間とともに変化する系の微分方程式の立て方と数値解法

5)過渡現象を解析するのに必要な数学的手法

具体的に利用できるケース

1)実験装置の制御(温度制御など)　有害な有機物ガスを活性炭で吸着除去する実験の例

有機物ガス発生



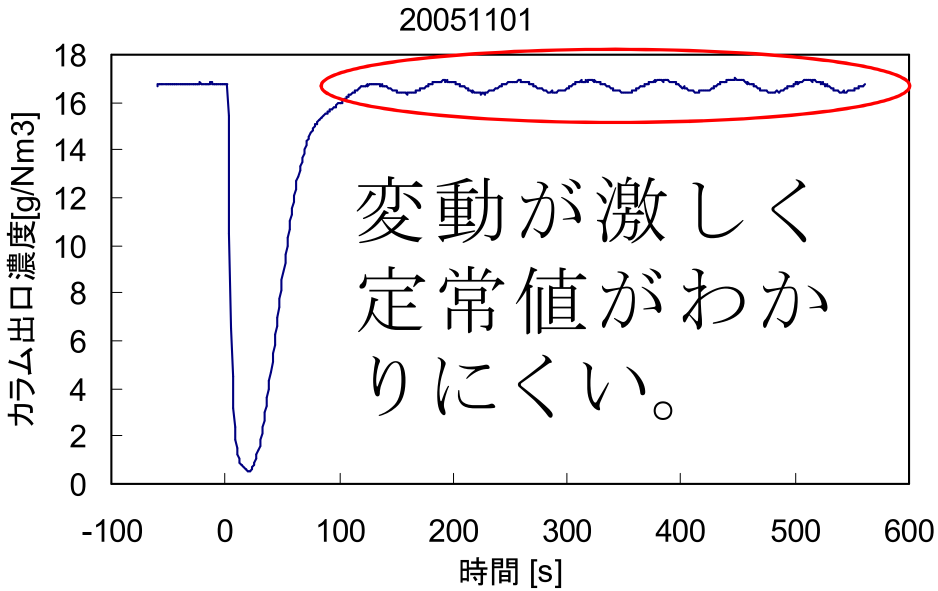
温度制御

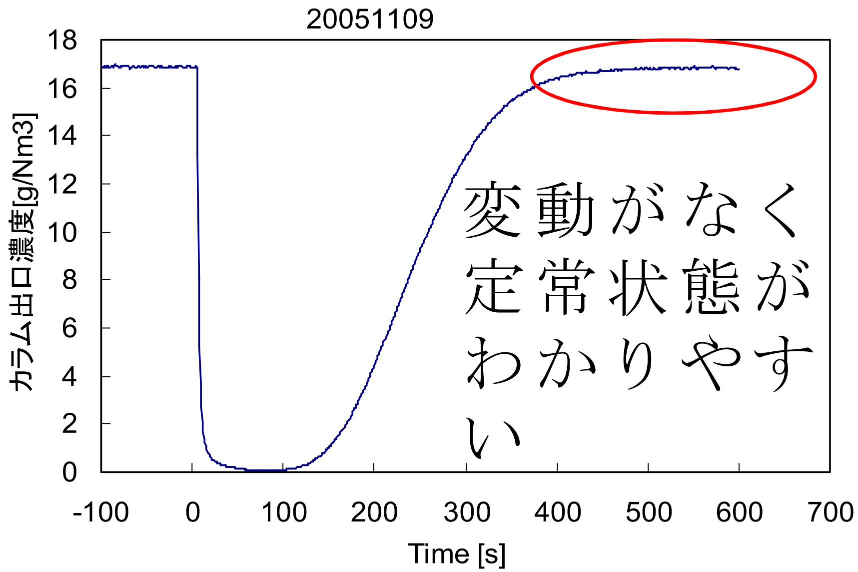
吸着カラム

具体的に利用できるケース

吸着カラム温度制御と出口ガス中有機物濃度

下の例では同じ制御器、ヒーターを使っている。





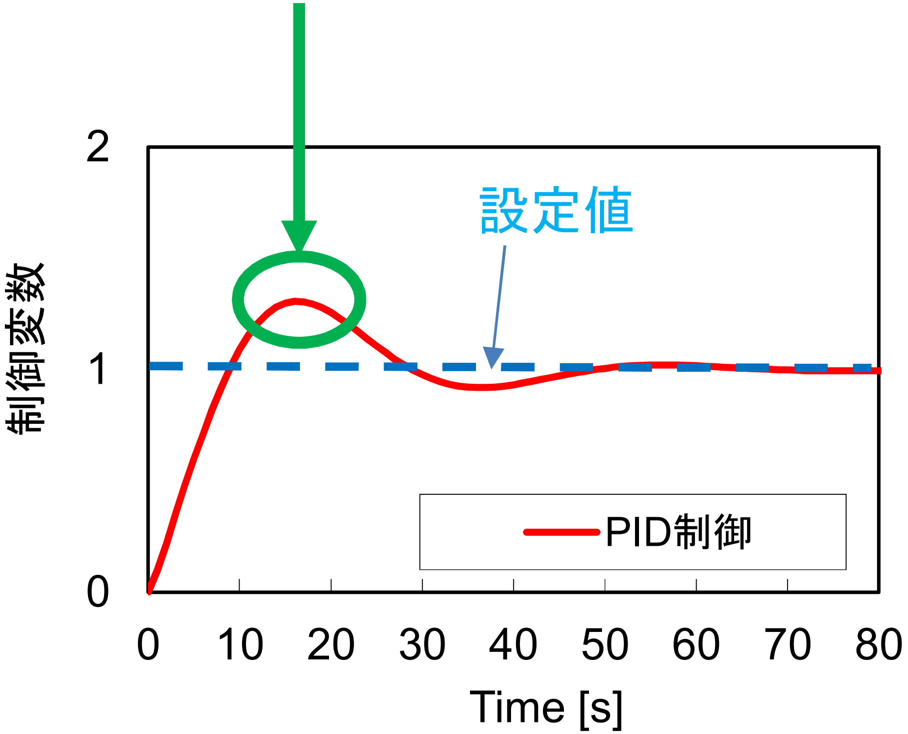
制御器の中のロジックの変更で変動を抑制

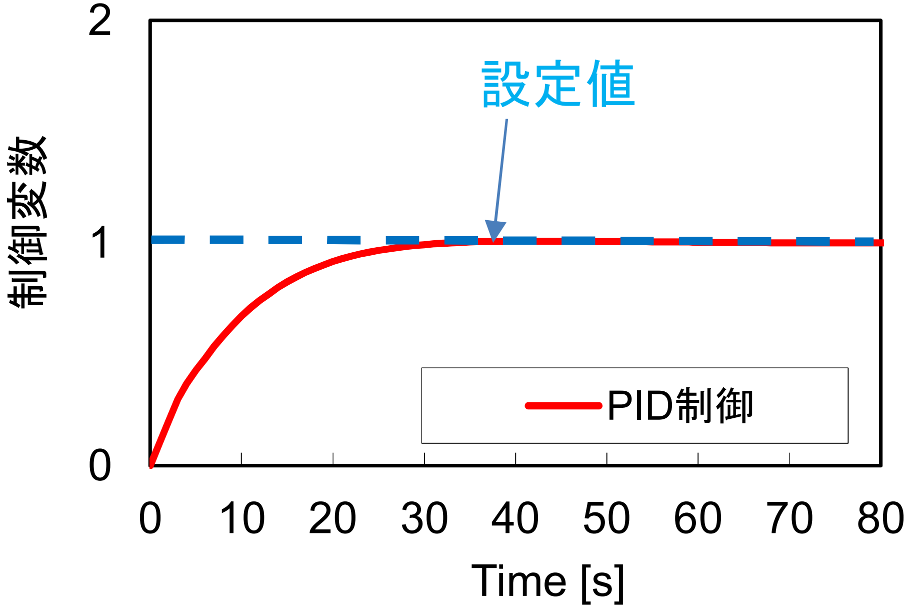
具体的に利用できるケース

1)実験装置の制御(温度制御など)

必要とされる条件に合わせた制御

微生物培養など：ある温度を超えてはいけない(微生物死滅、触媒失活等の問題があるとき)

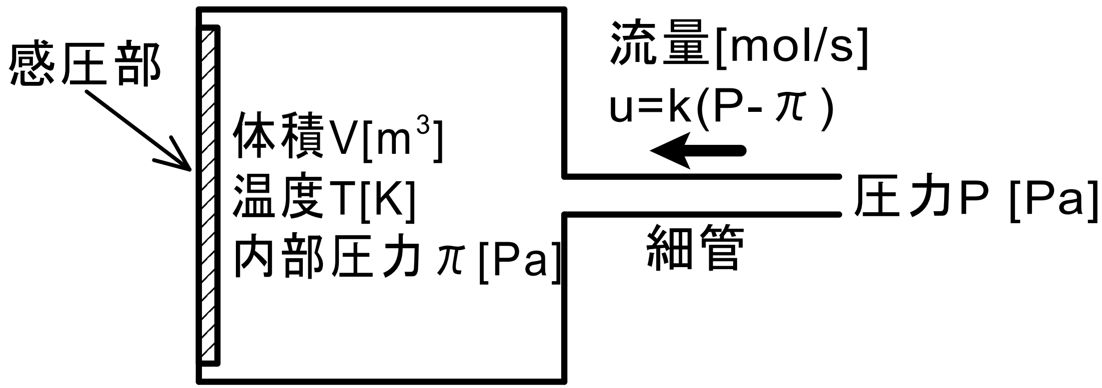




具体的に利用できるケース

2)周期的変動のあるデータから代表的な値を得る方法(高周波ノイズの低減の仕方等)

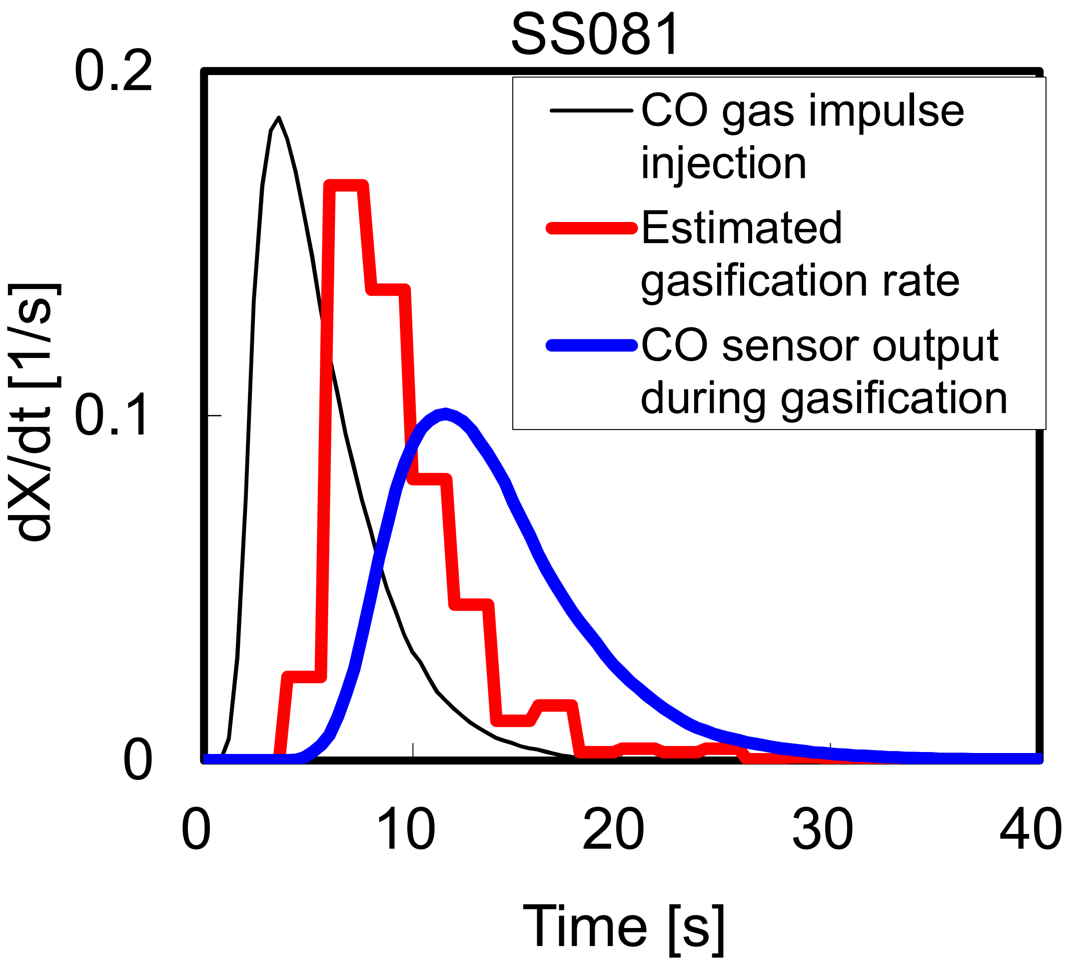
変動のある圧力から代表値を実験的に求める



マノスターゲージ
(カタログより)

具体的に利用できるケース

3)過渡的な現象を測定する測定器に必要とされる特性(計測器出力は応答特性の影響を受ける)



具体的に利用できるケース

4)時間とともに変化する系の微分方程式の立て方と数値解法

5)過渡現象を解析するのに必要な数学的手法

フィードバック制御とは(教科書第1章)

あるプロセスの出力(制御量)を測定し(検出器)、その出力が希望した値(設定値、目標値)とずれている場合は、希望した値になるように入力(操作量)を調整する制御方法。

フィードバックでない制御：あらかじめ決められた手順通りに動かす制御

フィードバック制御とは(教科書第1章)

フィードバック制御の例：湯沸し器で高級な物

水温が変わっても出口温度が一定になっている

フィードバック制御とは(教科書第1章)

フィードバック制御の例：エアコンの室内温度制御スイッチ

フィードバック制御とは(教科書第1章)

フィードバックでない制御：古い湯沸し器

ガスの燃焼量は一定で、ダイヤルを回すと水量を変えて水の温度を変える。

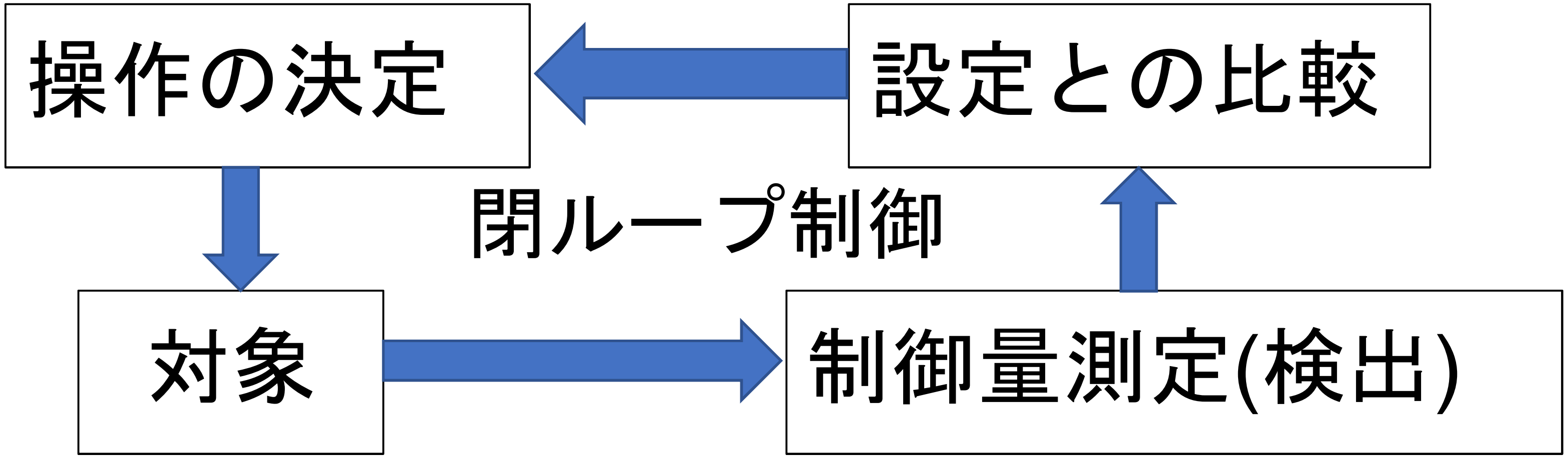
フィードバック制御とは(教科書第1章)

フィードバック制御に必須なもの：検出器、制御量、操作量

●望ましい状態を外部から与える(設定値)

●制御量を検出できる装置・機器が必要

●操作をすることで制御量を変えることができることが必要

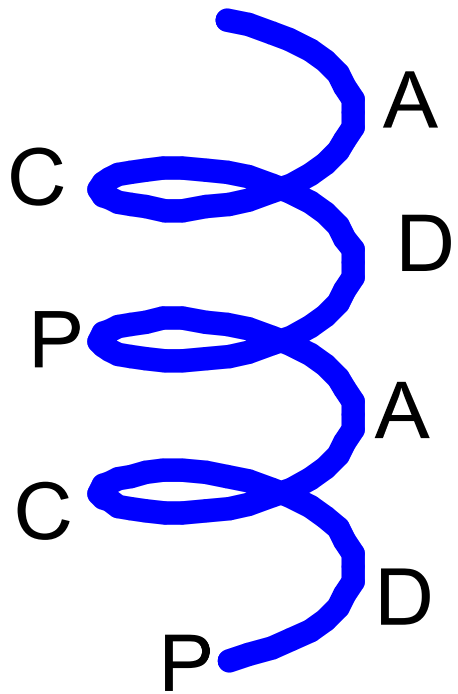


フィードバック制御とは（教科書第1章）

化学システム工学プログラム教育フィードバック制御の例(JABEE)

PDCAサイクル

- Plan
- Do
- Check
- Action



フィードバック制御とは(教科書第1章)

フィードバック制御：

3年1学期が終わって成績表を見たら4年進級に必要な単位数が足りなくなりそうだったので、3年2学期には一生懸命勉強した。

成績表：検出

制御変数：単位数

操作量：勉強

フィードバック制御とは(教科書第1章)

新型コロナ対策もフィードバック制御を使っている

制御量：感染者発生数

検出器：PCR検査

操作：ロックダウン、マスク義務化、飲食店営業短縮、遠隔講義　(逆に感染者が減ったらGOTOで経済回復を目指す)

良い制御とは(*注)

平均的な状態が目標とする状態からのずれが少ない

いつでも目標からのずれが少ない(変動がない)

早く目標の状態に到達する

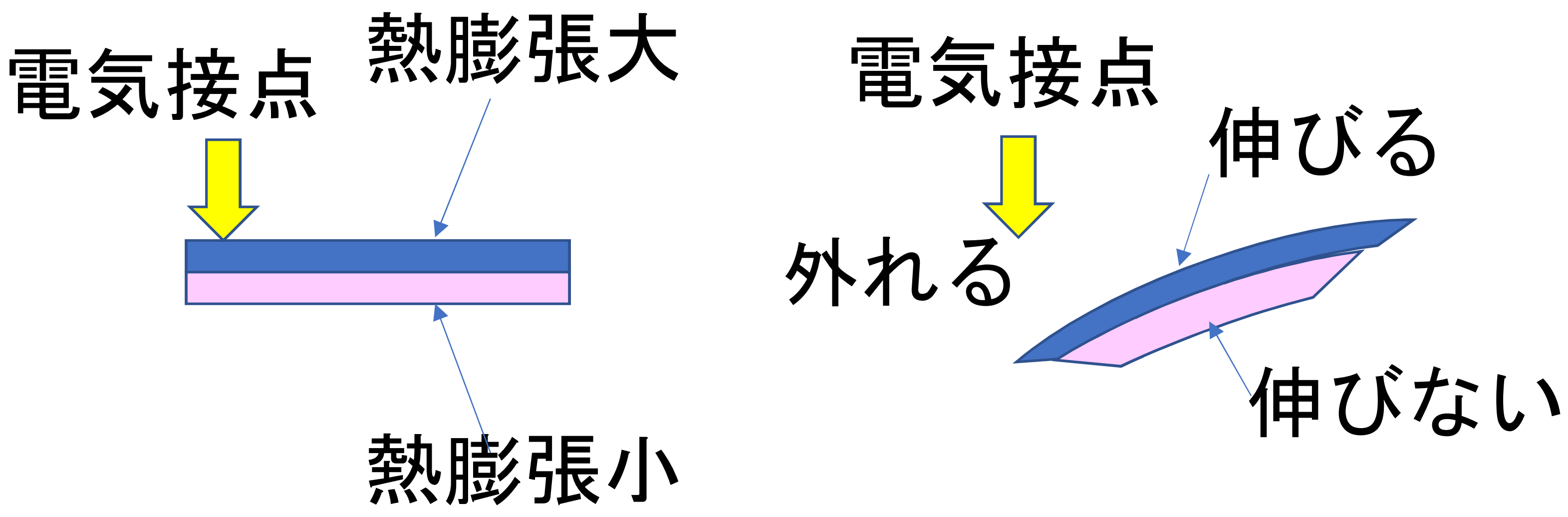
行き過ぎ(オーバーシュート)が大きすぎない

*注:制御対象となるものに必要とされるものの要求から良い制御とは何かを考える。(例えば生物の飼育・培養では加熱する時、温度のオーバーシュートで生物が死ぬことがある。)

よく使われるフィードバック制御

On-Off制御：機構が簡単。機械的に構成可能な場合もある。

温度制御にOn-Offを使った例：バイメタル。



よく使われるフィードバック制御

<u>PID制御</u>

数学的なバックグラウンドがある

安定・不安定など挙動予測ができる(AIは何をしだすかわからないこともまだある)

フィードバック制御の設計・挙動予測

<u>数学的な動特性のモデル</u>

微分方程式で、その時点の状態と操作から変化の方向を定量的に予測する。

プロセス制御
第2回

化学システム工学プログラム

清水忠明

注意：本PDFの内容を印刷物、電子的方法のいずれを問わず、第3者に開示することを禁じます。ただし、新潟大学工学部2021年度T3の「プロセス制御」受講者(聴講許可を得た者)への開示は可とします。

過渡現象の微分方程式の立て方

1. ある瞬間の状態(濃度、温度など、これをXと表す)が与えられている。
2. 検査面を作る
3. その瞬間の検査面での物質、熱の流入・流出速度を求める
4. 非常に短い時間Δtの間、物質、熱の流入・流出速度は一定であると仮定する
5. その短い時間Δtの間に検査面内部に蓄積した物質、熱の量Δqを求める
6. Δqの物質、熱の蓄積に伴う濃度、温度の変化ΔXを体積、熱容量などから計算する。
7. ΔXをΔtで割って、Δt→0の極限をとると微分方程式dX/dt=・・・が得られる

過渡現象の微分方程式の立て方

例1)完全混合槽のトレーサー濃度変動を表す微分方程式(トレーサー：反応で変化しない)

1. ある瞬間の状態が与えられている。

ある瞬間の濃度 (ここではCと表す)

2. 検査面を作る

完全混合槽を取り囲む仮想検査面を考える

3. その瞬間の検査面での物質、熱の流入・流出速度を求める

流入速度=流入濃度×体積流量=FC_{IN} [mol/s] (1)

流出速度=流出濃度×体積流量=FC_{OUT}=FC [mol/s](2)

過渡現象の微分方程式の立て方

4.非常に短い時間Δtの間、物質、熱の流入・流出速度は一定であると仮定する

蓄積速度= 流入速度 - 流出速度 = $FC_{IN} - FC = F(C_{IN} - C)$

5.短い時間Δtの間に検査面内部に蓄積した物質、熱の量Δqを求める

蓄積量Δ q = 蓄積速度 × $\Delta t = F(C_{IN} - C)\Delta t$ [mol]

6.Δqの物質の蓄積に伴う濃度変化ΔCを体積から計算する。

濃度変化ΔC =蓄積量／体積= $F(C_{IN} - C)\Delta t / V$ [mol/m^3]

過渡現象の微分方程式の立て方

7. ΔCをΔtで割って、Δt→0の極限をとると微分方程式dC/dt=・・・が得られる

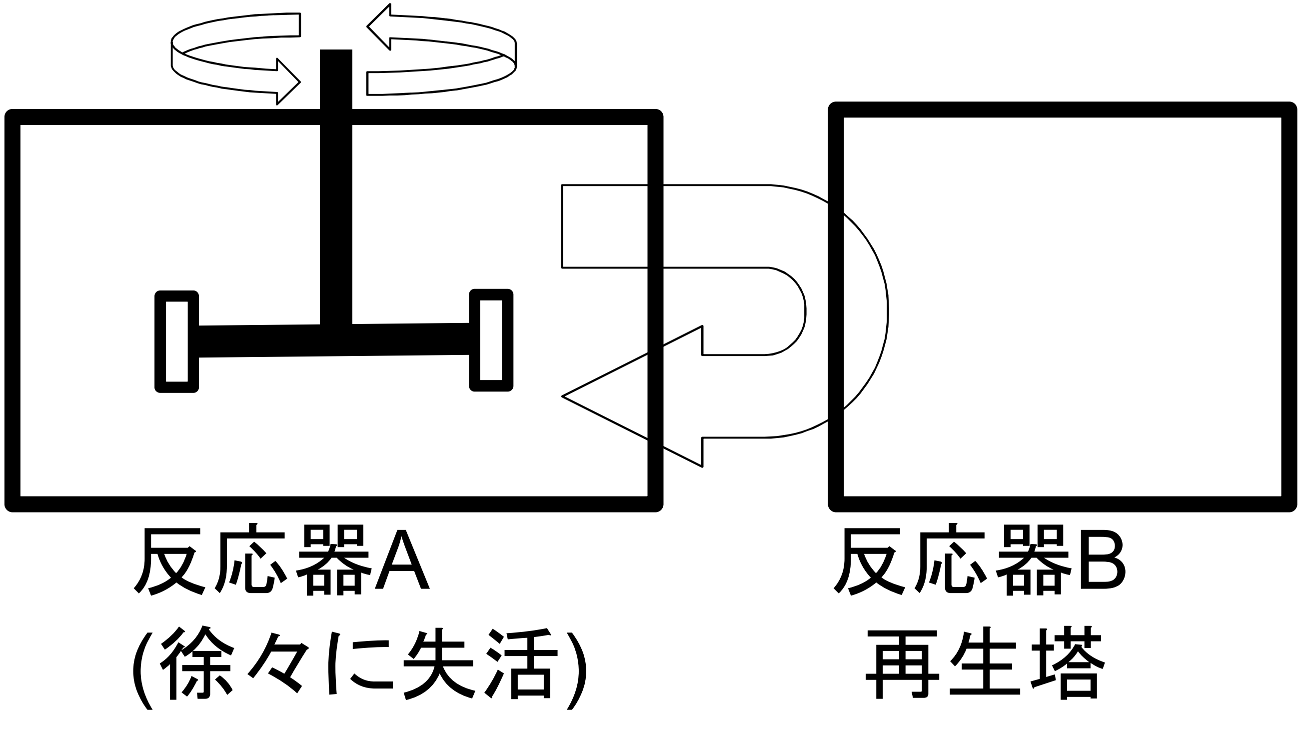
$$\frac{dC}{dt} = \frac{C_{IN} - C}{\tau}$$

τ ＝V/F：平均滞留時間(反応工学)、時定数(制御)

時間の次元を持つ

より高度な応用

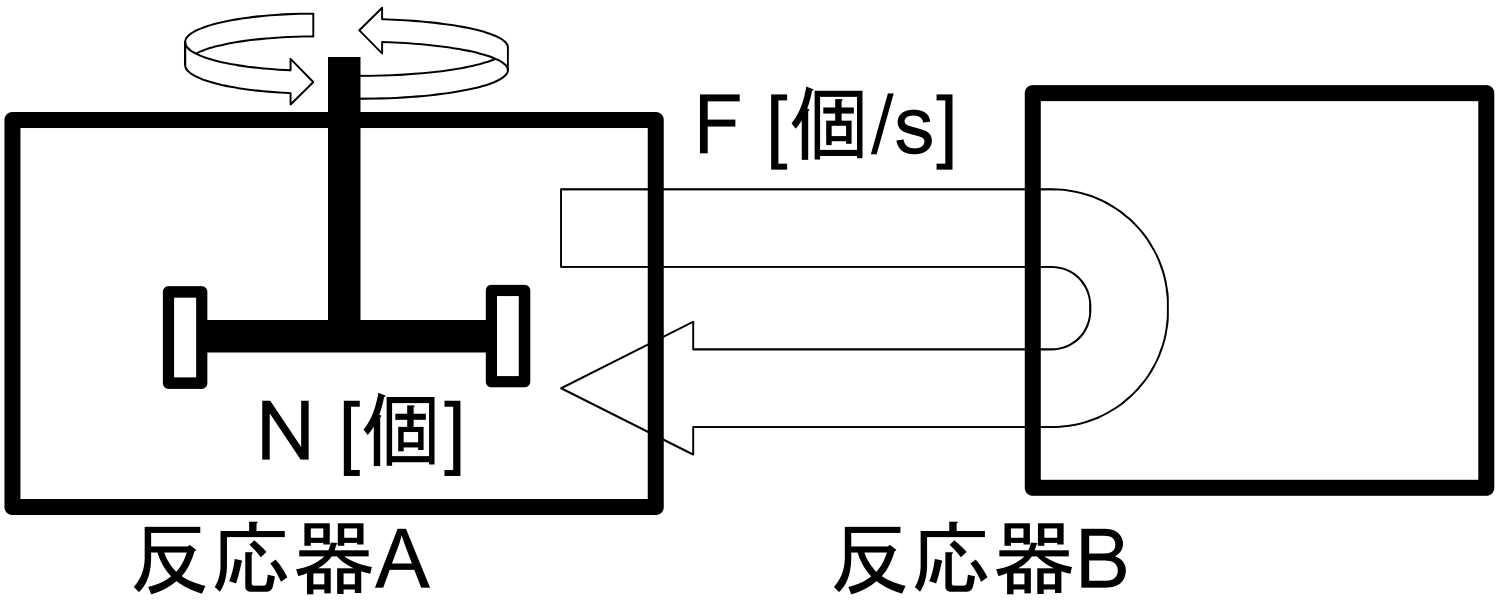
反応器Aでは固体触媒粒子が完全混合しながら反応するとともに、徐々に失活する。反応器Bでは失活した触媒を再生してAに戻す。A中の粒子が再生を受けた回数の分布を計算せよ。反応器Bでの滞留時間は極めて短い(ゼロに近い)とする。



より高度な応用

反応器A中の粒子個数をN [個]、単位時間当たり
反応器Bへ送られる粒子個数をF [個/s]とすると、

A内の滞留の時定数 τ =N/F [s]



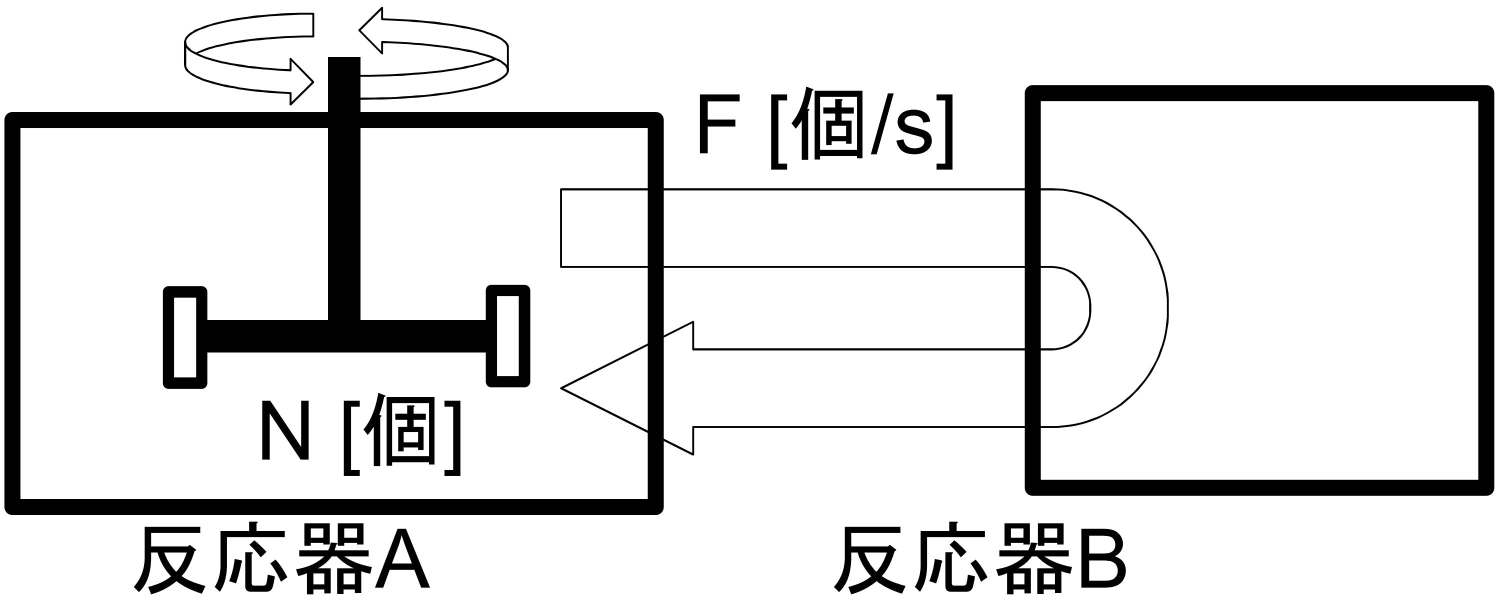
より高度な応用

時刻tにおいてA中の粒子でi回再生を受けた粒子の割合を$p_i(t)$とする。

短い時間Δtの間にAから抜き出されてBに行く粒子の割合$=F\Delta t/N=\Delta t/\tau$

Bから戻ってきた粒子は再生回数がi+1になる

$p_i(t+\Delta t) - p_i(t) = \{p_{i-1}(t) - p_i(t)\} \times (\Delta t/\tau)$

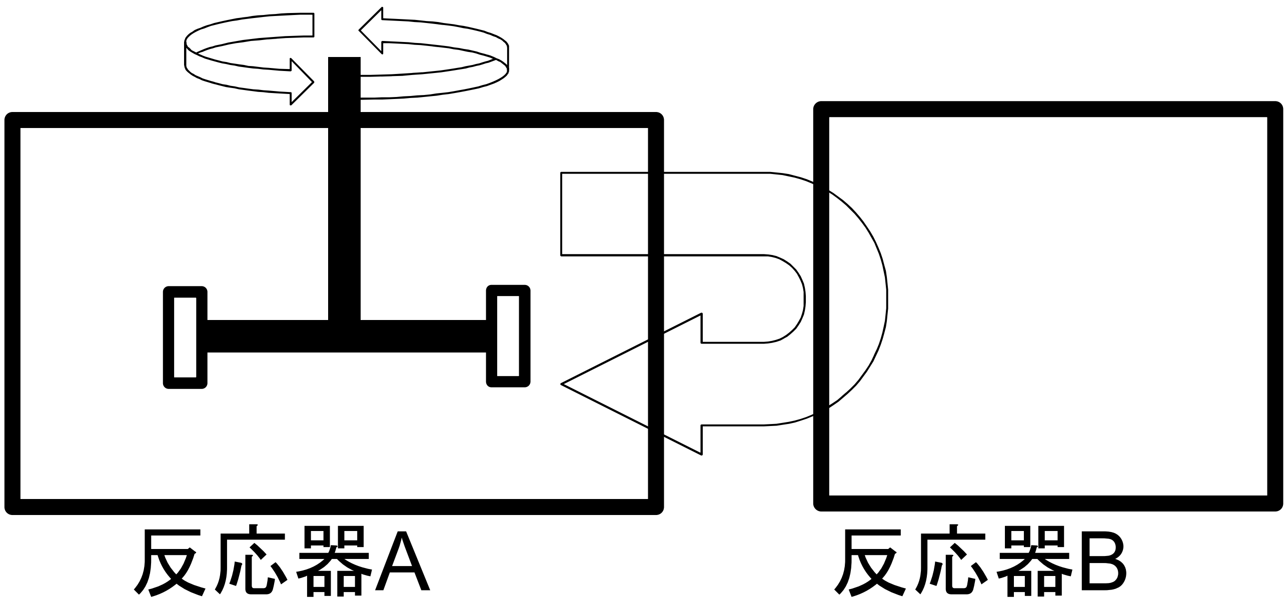


より高度な応用

両辺をΔtで割って、微分方程式に直すと次式になる。

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \frac{p_{i-1}(t) - p_i(t)}{\tau}$$

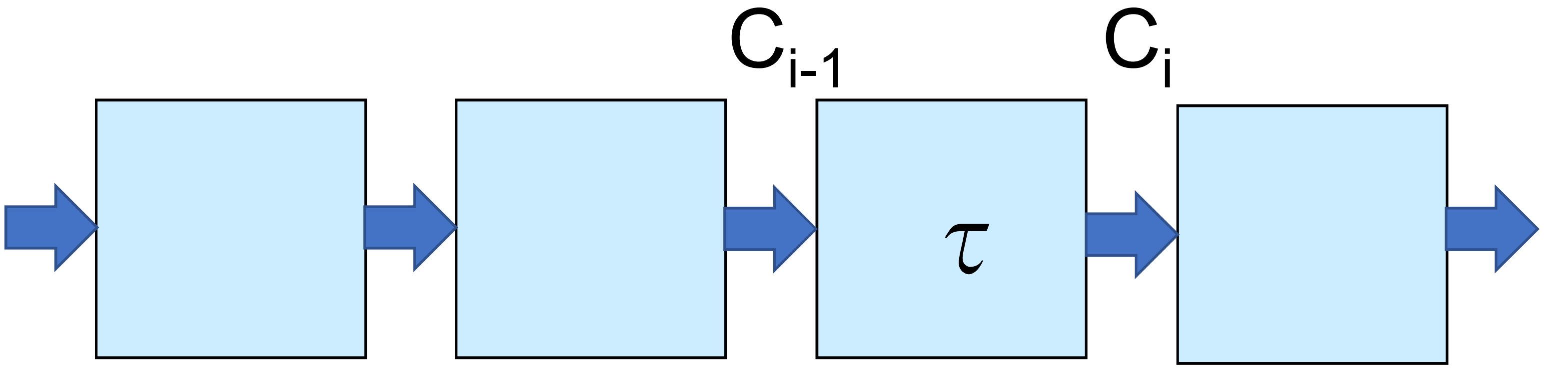
これが再生回数の分布を与える微分方程式になる。



同じ微分方程式が別の系でもある

実は、この式は、多段完全混合槽のトレーサー濃度変化と同じ式になっている

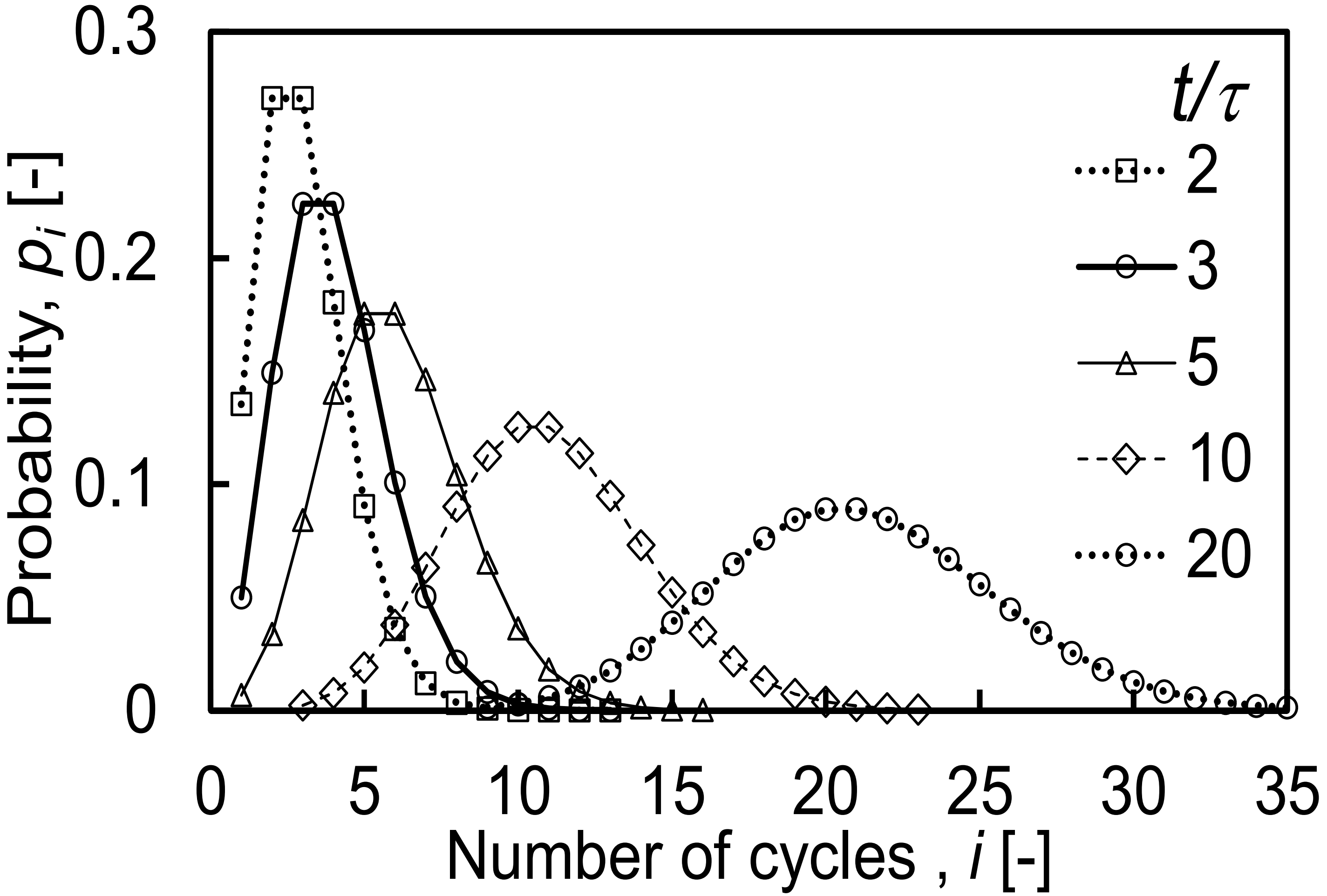
$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \frac{p_{i-1}(t) - p_i(t)}{\tau}$$



$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{C_{i-1}(t) - C_i(t)}{\tau}$$

この微分方程式は解析解がある

この式の解析解： $$p_i(t) = \frac{t^{i-1}}{\tau^i (i-1)!} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

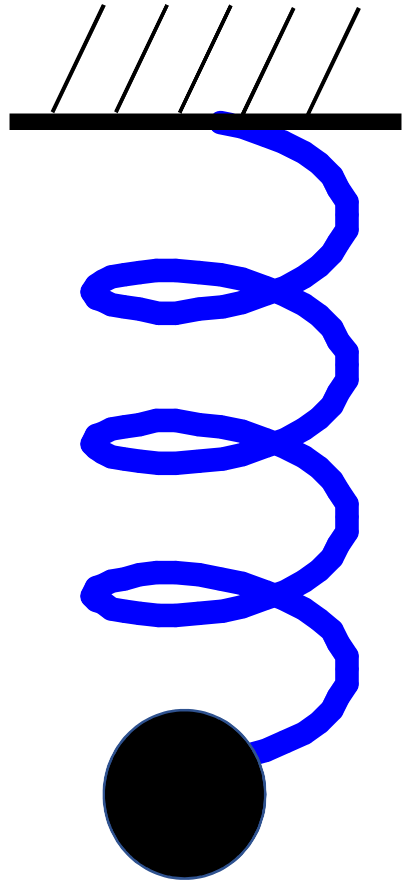


現象を微分方程式で表す

2階の微分方程式は2変数の1階の微分方程式

例: ばねの先端におもりが付いた単振動

$$\frac{d^2X}{dt^2} = -\omega^2 X$$



Xの1階微分をY→2つの式にする

$$\frac{dX}{dt} = Y$$

$$\frac{dY}{dt} = -\omega^2 X$$