

## プロセス制御工学教育における 講義, 演習, 実験の連携




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

**京都大学 加納 学**

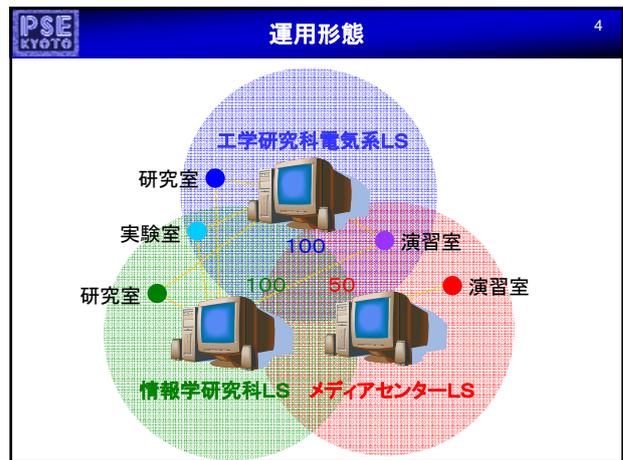
manabu@cheme.kyoto-u.ac.jp  
<http://www-pse.cheme.kyoto-u.ac.jp/~kano/>

### Outline 2

- 京都大学MATLABユーザーズグループの紹介
- プロセス制御・システム工学関連カリキュラム
- プロセス制御工学 (学部3回生)
- 学生実験 (学部3回生)
- プロセス制御論 (大学院修士課程)
- 化学工学特別セミナー (大学院博士課程)
- 課題(悩み)

### 京都大学MATLABユーザーズグループ 3

- 1995年発足当時
  - 11研究室 + 大型計算機センター
  - MATLAB/Simulink 150ライセンス
  - Toolbox 6種類
- 2005年現在
  - 30研究室 + 情報学研究科 + 学術情報メディアセンター
  - MATLAB/Simulink 250ライセンス
  - Toolbox 16種類以上
- グループ概要(問題点)
  - 京都大学の公的な組織ではなく、有志によるボランティア活動である。このため、グループやサーバの管理者に負担が皺寄せされている。



### グループ・ウェブサイト 5



<http://matlab.chase-dream.com/>

### 本題に入る前に... 6

- 与えられたお題  
『理論と実践(モノ), ツールの連携』
- このカンファレンスの内容  
技術者教育におけるツールを活用した授業や研究事例など、教育現場の現状と将来展望について紹介
- 何を話したら良いの?  
授業の紹介? 大学の現状?  
現状把握は大切だが、...

経験から感じていることを最初にお話します

PSE KYOTO 7

### 研究履歴

- 研究テーマ
  - 操業データに基づく製品品質改善
  - 多変量統計のプロセス管理(異常検出・診断)
  - ソフトセンサー開発
  - マイクロ化学プロセスの最適設計と操作
  - モデル予測制御などプロセス制御全般
- 産業界との連携(五十音順)
  - オムロン, オリパス, シャープ, 昭和電工, 住友化学, 住友金属, 古河電工, 三菱化学, JFE, SUMCO
  - その他, 日本学術振興会や学会を通じての連携

PSE KYOTO 8

### 技術者教育

- キーワードは『ツール』だが...

“MATLAB EXPO”ですから, MATLAB/Simulinkに代表されるツールの有効性を余すところなく語ることが節度ある大学人の務めだと認識しています。

しかし, その前に, 本来の目的を明確にしておきましょう。

PSE KYOTO 9

### 技術者と教育

- 『技術者』とは  
技術を職業とする人。  
(技術=科学を実地に応用して自然の事物を改変・加工し、人間生活に利用するわざ)
- 『教育』とは  
教え育てること。  
人を教えて知能をつけること。  
人間に他から意図をもって働きかけ、**望ましい姿**に変化させ、価値を実現する活動。

PSE KYOTO 10

### 技術者と技述者

- 『技術者』とは  
英語の辞書でエンジニア「engineer」を引くと、ご承知のように「技術者」という訳がでている。この訳語の中にある「術」という字だが、この字をよく見ると、「行」の間に「求」がはいつている。「行動」が要求されているのが「術」なのではあるまいか。  
(中略)  
「技術」も(剣術と)同様に、行動が要求される。実際にやるに限るのである。「述」もジュツと読む。最近「技術者」ならぬ「技述者」のほうが多いのではないか。気になることである。

大野耐一, トヨタ生産方式—脱規模の経営をめざして  
ダイヤモンド社(1978)

PSE KYOTO 11

### 技術者教育に必要なもの

- 『技術者教育』を行うために
  - 第一に、「技術者の望ましい姿」を明確にしておく必要がある。
  - これができているのに、「技術者教育」ができるわけがない。
  - これは教育をする側の課題である。
  - 効果的な教育とか、そういうレベルの問題を議論する前に、きちんと考えておかなければならない。
- 最近の若い者は...
  - 古代ギリシャの時代から言われているらしい。

PSE KYOTO 12

### 大学の一研究室にて

- 私が学生に要求していること(基礎編)
  1. 徹底的に考え抜く
  2. 論理的な文章を正しい日本語で書く
- 私が学生に望むこと(実践編)
  1. 取り組むべき課題を明らかにできる
  2. 必要な知識を身に付けることができる
  3. 問題解決のためのアプローチを提示できる
  4. 全力を尽くして課題に取り組むことができる
  5. 成否に関わらず、報告書を書くことができる
  6. 魅力的なプレゼンテーションができる
- 必要な知識を身に付けることができる  
「必要な知識を身に付けること」ではない。

**PSE KYOTO** **モチベーションの重要性** 13

- 『技術者教育』を意味のあるものにするために
 

モチベーションを与える
- 企業人対象の制御&データ解析講習での経験
  - 目先の業務に直結していないと効果がない
  - ある大企業での定期的な講義と演習
  - あるベンチャー企業での演習
- 制御&データ解析の基本は線形代数だが、...
  - 大学1, 2回生の頃に、ちゃんと勉強したか？
  - なぜ、しなかったのか？
  - どのような状況なら、勉強したか？

**PSE KYOTO** **ツールの活用** 14

- モチベーションだけで十分か？
  - 興味を持ってもらう必要がある。
  - 理論を知るだけでなく、実地で応用できるようにならないといけない。
  - 効果的であることが望まれる。
  - 今の世の中、紙と鉛筆だけでは無理。

ツールの活用

**PSE KYOTO** **Outline** 15

- 京都大学MATLABユーザーズグループの紹介
- プロセス制御・システム工学関連カリキュラム
- プロセス制御工学(学部3回生)
- 学生実験(学部3回生)
- プロセス制御論(大学院修士課程)
- 化学工学特別セミナー(大学院博士課程)
- 課題(悩み)

**PSE KYOTO** **化学工学特別セミナー(大学院)** 16

- テーマ  
データ解析の基礎と応用
- 内容  
膨大な操業データを有効に活用して、いかに製造プロセスの安定化と効率化を実現するか、製品品質や歩留りを改善するかが、様々な産業において重要な課題となっている。本セミナーでは、統計や多変量解析の基礎について解説すると共に、産業界で数多くの適用事例が報告されている統計手法について、その解説と演習を行い、**受講者が統計手法を現実の問題に適用できるだけの技術を身に付けることを目的とする。**

**PSE KYOTO** **化学工学特別セミナー(大学院)** 17

- テーマ  
データ解析の基礎と応用
- 授業計画
  - プロセスデータ解析の産業応用事例紹介(共同研究成果を含む)
  - 重回帰分析(最小二乗法)と分散分析
  - 多重共線性, リッジ回帰
  - 主成分分析, 主成分回帰
  - 多変量統計的プロセス管理(Multivariate SPC)
  - 部分最小二乗法(PLS), 判別分析
  - ソフトセンサー開発

同様の講習を企業の技術者向けにも実施

**PSE KYOTO** **昭和電工との共同研究プロジェクト** 18

エチレン精留塔における製品中不純物濃度の推定

製品品質をオンラインで推定できるソフトセンサーを開発し、プロセスの限界運転を実現する。推定値は最適化およびモデル予測制御システムで利用する。

品質推定値の信頼性を評価し、最適化およびモデル予測制御システムにおける品質推定値の利用の是非を判断できるシステムを開発する。

- 適用手法
  - 部分最小二乗法(PLS)
  - 多変量統計的プロセス管理(Multivariate SPC)

**PSE KYOTO** **三菱化学との共同研究プロジェクト** 19

モノマープラントにおけるポリマー閉塞の早期発見

運転状態(ロード変動)にかかわらず、ポリマーによる装置の部分的閉塞を早期に検出できるシステムを開発する。

- 適用手法
  - 主成分分析
  - 外部分析
  - 多変量統計のプロセス管理(Multivariate SPC)

**PSE KYOTO** **住友金属との共同研究プロジェクト** 20

鉄鋼製品の品質モデリングと歩留り改善

製品品質と操作条件を関連付けるモデルを構築し、製品歩留りを改善する。

- 適用手法
  - 主成分分析
  - 判別分析
  - 部分最小二乗法(PLS)

**PSE KYOTO** **化学工学特別セミナー(大学院)** 21

- テーマ
  - データ解析の基礎と応用
- 実施形態
  - 演習を重視するため、通常の講義(90分)では中途半端になってしまう。そこで、土曜日の午後(13時から17時)に**集中講義形式で実施**している。
  - 上記実施形態は、社会人ドクターの要望にも応えうるものである。
  - 単位認定されない修士課程の学生も含めて、予想を超える学生が受講している。
  - **MATLAB本体と自作ツールボックス**を利用している。

同様の講習を企業の技術者向けにも実施

**PSE KYOTO** **化学工学特別セミナー(大学院)** 22



**PSE KYOTO** **化学工学特別セミナー(大学院)** 23

- 演習テーマ
  - 蒸留塔の製品組成を推定するソフトセンサーを構築する。
- 蒸留塔およびデータの説明
  - Kano et al., *Journal of Process Control* (2000)
- 課題
  - 温度、圧力、流量などオンライン測定されているデータから、製品組成(不純物濃度)を推定するモデルを、部分最小二乗法(PLS)を用いて構築する。
- 趣旨
  - PLS、多重共線性、入力変数の選択、動特性の役割について理解する。

**PSE KYOTO** **ツール利用のメリット** 24

- 演習を伴わなければ、身に付かない！
  - データ解析の基礎や手法は講義で解説できる。
  - 適用事例の紹介もできる。
  - (教員として)教えたつもりになることも、(学生として)分かったつもりになることもできる。
  - しかし、それで身に付くのか。現実の問題に対して、実際に適用できるようになるのか。
  - MATLABは、実践力を養う上で強力なツールである。

**Outline** 25

- 京都大学MATLABユーザーズグループの紹介
- **プロセス制御・システム工学関連カリキュラム**
- プロセス制御工学(学部3回生)
- 学生実験(学部3回生)
- プロセス制御論(大学院修士課程)
- 化学工学特別セミナー(大学院博士課程)
- 課題(悩み)

**関連カリキュラム** 26

- 3回生 **プロセス制御工学**  
プロセスシステム工学  
学生実験
- 4回生 プロセス設計
- 大学院 **プロセス制御論**  
プロセスシステム工学論  
その他, **特別セミナー**, 特論

**Outline** 27

- 京都大学MATLABユーザーズグループの紹介
- プロセス制御・システム工学関連カリキュラム
- **プロセス制御工学(学部3回生)**
- 学生実験(学部3回生)
- プロセス制御論(大学院修士課程)
- 化学工学特別セミナー(大学院博士課程)
- 課題(悩み)

**プロセス制御工学(学部3回生)** 28

- **内容**  
化学プロセスの動的な特性とその数学的表現法について講述し, 次いでプロセスの挙動を望ましいものにするために, どのような制御系を構築する必要があるか, その設計法を含めて解説する.
- **授業計画**
  - プロセス制御の概要
  - モデル構築とラプラス変換
  - 伝達関数と過渡応答
  - PID制御と制御系の設計
  - 周波数応答と制御系の特性
  - カスケード制御とフィードフォワード制御
  - **制御系の設計と評価(2回)**  
MATLAB/Simulinkを利用した演習

**プロセス制御工学: 昔と今** 29

- **昔(私が学生だった頃)**  
計算機を利用した演習はなく, 手計算でできる範囲で, ラプラス変換等を用いて微分方程式を解き, 制御応答を求めるなどしていた.
- **今(私が担当教員になってから)**  
MATLAB/Simulinkを利用した演習を実施している.
  - MATLAB/Simulinkの基礎
  - 物理モデルの構築とシミュレーション
  - PID制御等の制御シミュレーション
  - 周波数応答線図の描画

**物理モデルの構築とシミュレーション** 30

貯留タンク

$$A \frac{dL}{dt} = F_{in} - k_f \sqrt{L}$$

**PID制御等の制御シミュレーション** 31

PID制御系

PID制御

**PID制御等の制御シミュレーション** 32

微分先行型PID制御

I-PD制御

**PID制御等の制御シミュレーション** 33

スミス補償型PID制御

**PID制御等の制御シミュレーション** 34

アンチリセットウィンドアップ  
(自動整合PID制御)

**ツール利用のメリット** 35

- PID制御等の制御シミュレーション
  - PID制御パラメータと制御応答の関係を体感できる。
  - モデル誤差を考慮した制御シミュレーションを通して、ロバスト性の重要性を体感できる。
- 周波数応答線図の描画
  - ボード線図やベクトル線図を実際に描画できる。

テキスト内の面白くも何ともない理屈ではなく、目の前で起きている現象を通して、プロセス制御に不可欠なモデル構築や制御系設計の基礎を身に付けることができる。

**Outline** 36

- 京都大学MATLABユーザーズグループの紹介
- プロセス制御・システム工学関連カリキュラム
- プロセス制御工学(学部3回生)
- 学生実験(学部3回生)
- プロセス制御論(大学院修士課程)
- 化学工学特別セミナー(大学院博士課程)
- 課題(悩み)

**学生実験** 37

**■ プロセスの動特性(液レベル制御)**

- ステップ応答からのモデル構築
- PID制御
- スミス補償型PID制御

**■ 考察内容**

- A/D, D/A変換の仕組み
- プロセスモデルの構築
- PID制御パラメータと制御応答の関係
- モデル誤差の原因

**■ 講義(前期)と実験(後期)の連携**

- 講義で対象とした貯留タンクの液レベル制御を、実際の実験装置で実施する。

**学生実験** 38

**■ 手動制御 (非常に人気がある)**

- 実験装置: 制御の難しさを体感

**■ ステップ応答からのモデル構築**

- 実験装置: ステップ応答実験
- MATLAB: 伝達関数モデルの同定

**■ PID制御**

- Simulink: 制御パラメータの調整と制御シミュレーション
- 実験装置: 制御実験

**シミュレーション vs. 実験** 39

**■ シミュレーションのメリット**

- 効率的に試行錯誤を行える。特に、PID制御のパラメータ調整で威力を発揮する。Simulinkを導入するまでは、実験時間中に2~3回の試行錯誤が精一杯だったが、現在は気が済むまで試行錯誤ができる。

**■ 実験のメリット**

- プロセス制御に必要な機器(差圧伝送器、調節弁、ポジションナ、変換器、パソコンなど)を、目で見て、手で触って確認することができる。
- トラブルも体験できて(？)、印象に残る。

シミュレーションと実験のメリットを活かし、相補的に利用することで、理論と実践を効率的にバランス良く学習することができる。

**Outline** 40

- 京都大学MATLABユーザーズグループの紹介
- プロセス制御・システム工学関連カリキュラム
- プロセス制御工学(学部3回生)
- 学生実験(学部3回生)
- **プロセス制御論(大学院修士課程)**
- 化学工学特別セミナー(大学院博士課程)
- 課題(悩み)

**プロセス制御論(大学院)** 41

**■ 内容**

化学プロセスのモデリングと制御の多変数系としての取り扱いの基礎、特に時系列データによるモデリング、プロセス内の干渉の評価法、モデル予測制御などのアドバンスなデジタル制御法について講述する。

**■ 授業計画**

- プロセスモデルの構築
- プラントワイド制御
- 干渉とマルチループ制御
- 多変数制御
- システム同定、閉ループ同定
- モデル予測制御
- 制御性能監視

**物理モデルの構築とシミュレーション** 42

**攪拌槽型熱交換器**

流入流体  $F_{in}$  [m³/min],  $T_{in}$  [°C]

流出流体  $F_{out}$  [m³/min],  $T_{out}$  [°C]

液容量  $V$  [m³]

冷却(入口)  $F_{c,in}$  [m³/min],  $T_{c,in}$  [°C]

冷却(出口)  $F_{c,out}$  [m³/min],  $T_{c,out}$  [°C]

**制御シミュレーション** 43

マルチループ制御系

RGAIによる干渉評価  
ペアリングの選定  
非干渉制御

**制御性能監視** 44

制御性能診断ツール  
LoopDiag

日本学術振興会 プロセスシステム工学第143委員会 ワークショップ No.25  
「制御性能監視 ～プロセス産業での実用化を目指して～」最終報告書  
<http://ws25.chase-dream.com/>

**ツール利用のメリット** 45

- 実践的な演習による理解度の向上
  - 例えば、モデル予測制御について解説する場合、以前はアルゴリズムの説明しかできなかったが、現在は個々の学生が制御シミュレーションを実施できる環境にある。理解度と実践力の向上に役立っている。
- プロジェクト型講義の実現
  - 学生自身が対象プロセスを選定し、Simulink上での物理モデルの構築、MATLABを利用したプロセスのモデル化と制御系設計を行う。さらに、検討内容のプレゼンテーションを行い、全員で議論するというプロジェクト型講義が実現できるようになった

**Outline** 46

- 京都大学MATLABユーザーズグループの紹介
- プロセス制御・システム工学関連カリキュラム
- プロセス制御工学(学部3回生)
- 学生実験(学部3回生)
- プロセス制御論(大学院修士課程)
- 化学工学特別セミナー(大学院博士課程)
- 課題(悩み)

**課題(悩み)** 47

- 非常に高度なツールであるが故に...
  - 理論を理解していなくても、マニュアルの例を参考に数行プログラミングをすれば、結果が得られてしまう。
- どこまで理解しておく必要があるか
  - 当該分野の基礎を理解する必要があることに同意が得られたとして、基礎とは何か。どこまで基本に戻ればよいのか。(線形代数の公理まで戻る?)
  - 研究と講義のギャップをどのように埋めるか。

**その他のツール** 48

- プロセスシミュレータ
 

化学工学分野では、プロセス設計などに広く利用されている。多くの大学で導入されている。

PSE  
KYOTO

まとめ 49

- 技術者の望ましい姿を明確にする.
- モチベーションを高める.
- ツールを活用する.
- 大学評価や授業評価という外圧も、ツールを利用して効果的な講義を行うことの追い風となるだろう.
- ノウハウの共有？

PSE  
KYOTO

おしまい 50