

07. ソフトセンサー(推定モデル)

京都大学 加納 学

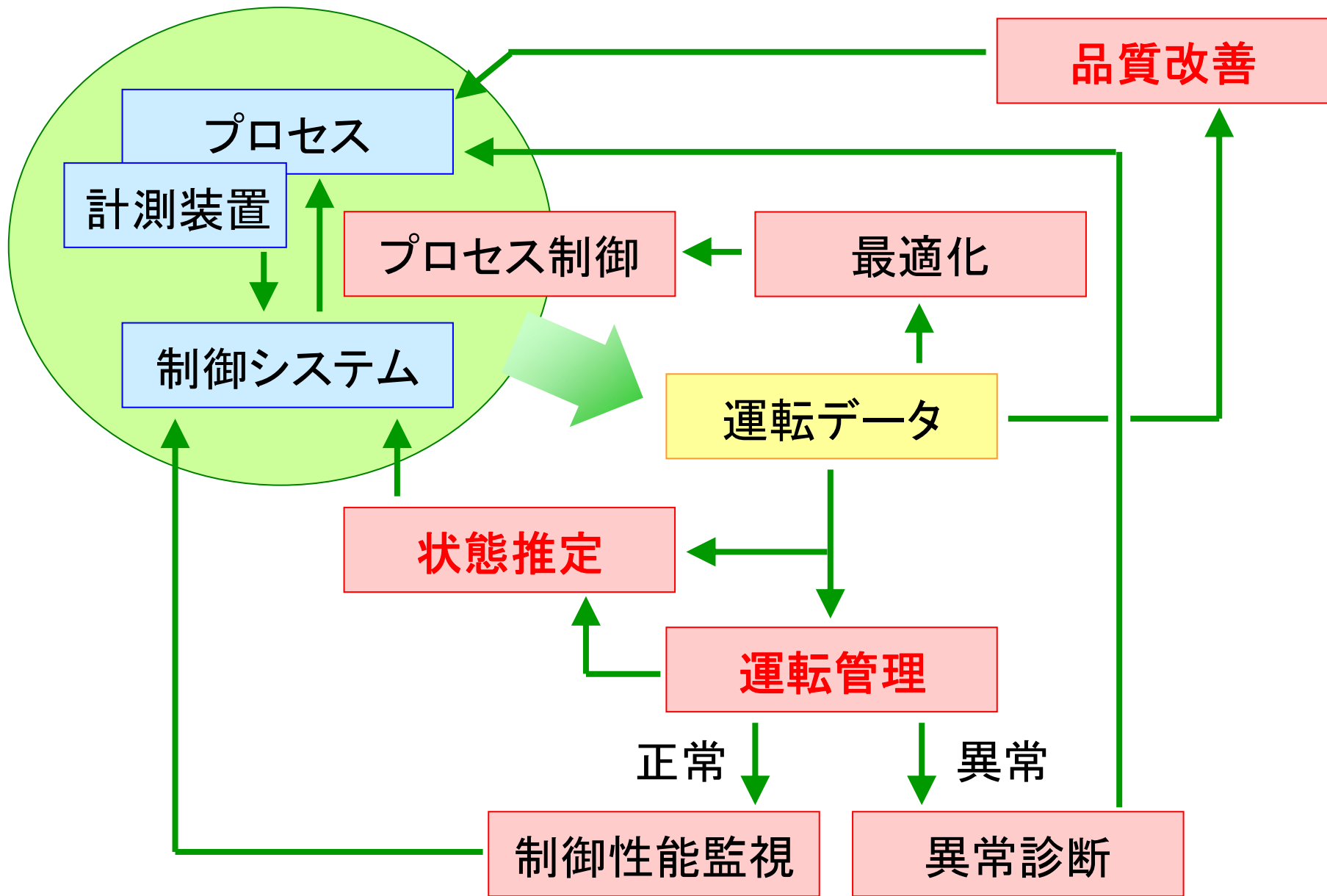
*Division of Process Control & Process Systems Engineering
Department of Chemical Engineering, Kyoto University*



manabu@cheme.kyoto-u.ac.jp

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

- ソフトセンサ概要
- ソフトセンサの適用事例(昭和電工, PLS)
- ソフトセンサの適用事例(Dofasco, PLS)
- ソフトセンサの性能保証(MSPCとの統合)
- 相関型Just-In-Timeモデリング



状態推定(ソフトセンサー)

オンラインで測定されていない製品品質を推定する

プロセス制御

製品品質や運転状態を希望通りに操る

運転管理(異常検出)

早期に異常を検出する

制御性能監視

制御系が満足のいく性能を発揮しているか監視する

異常診断

異常の原因を究明する

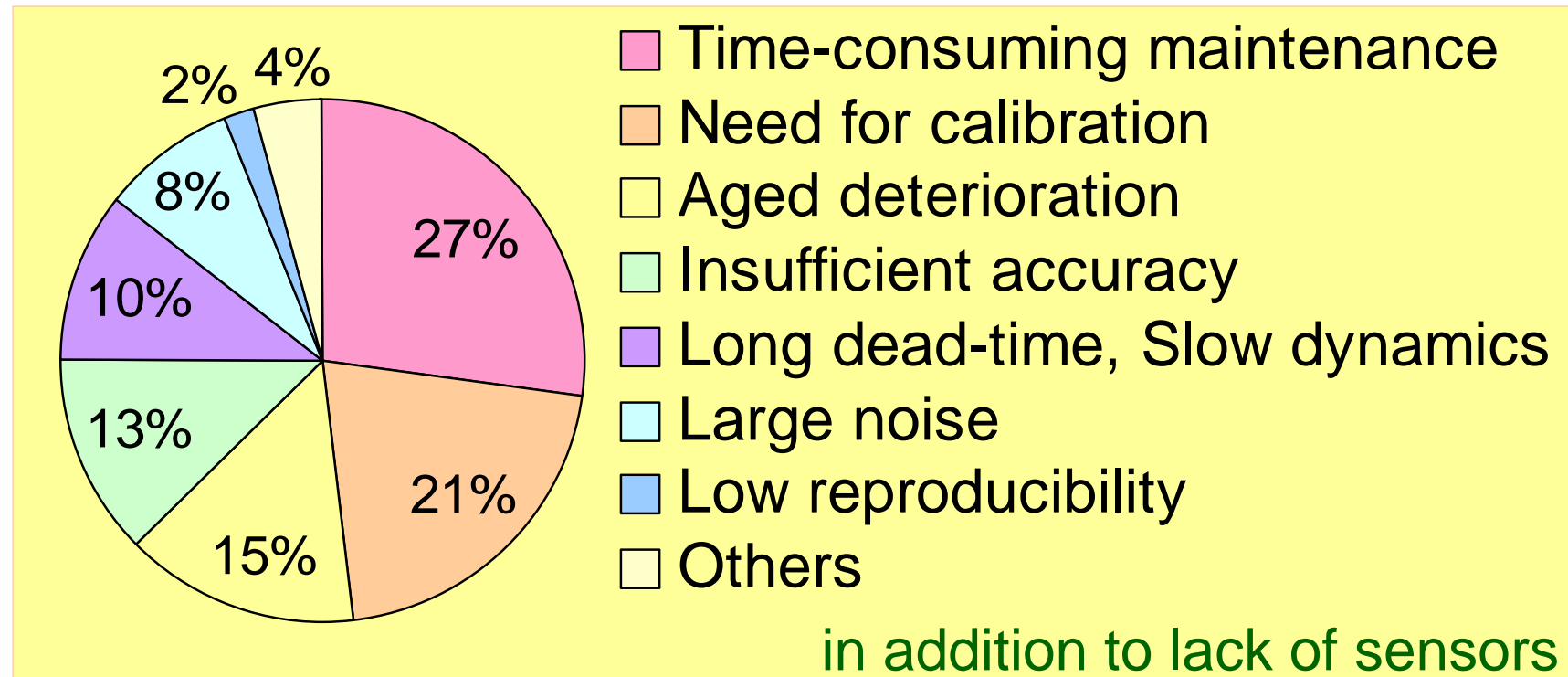
最適化

最適な運転条件を求める

品質改善

製品品質や歩留りを改善する

対象のモデル化



“Soft-sensor is a remedy?”

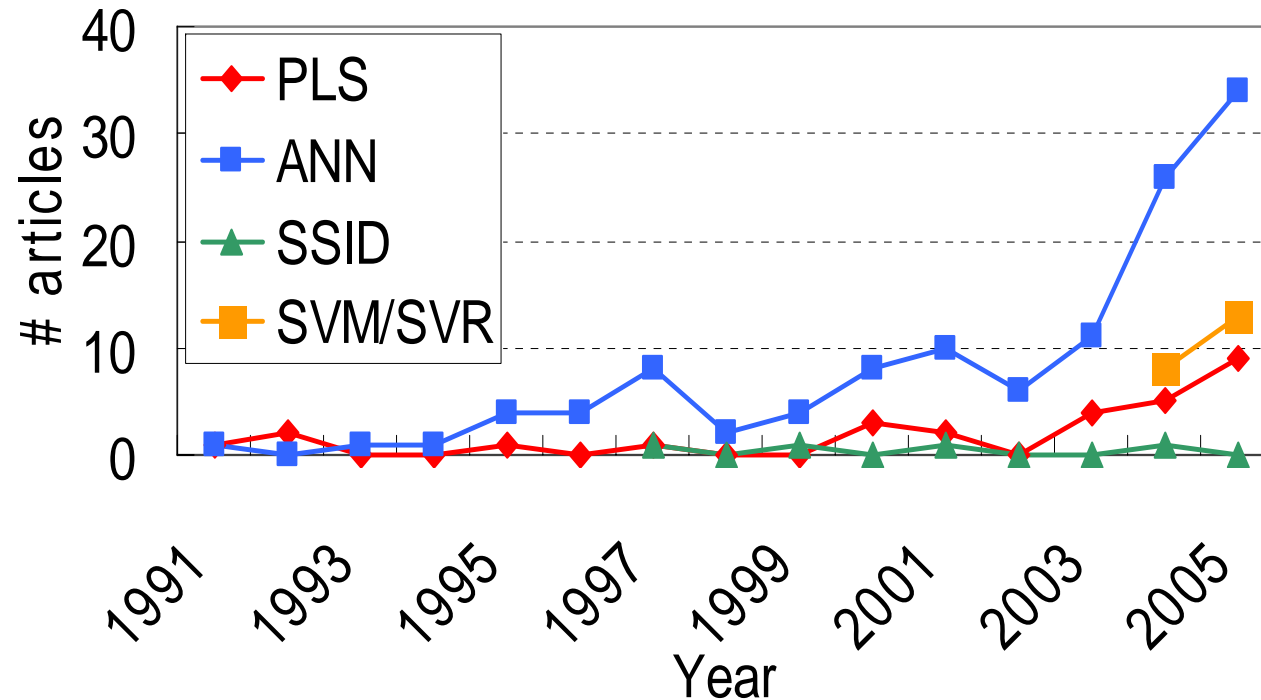
“Yes, 21 of 26 companies had used soft-sensors.”

Questionnaire to 26 companies (*JSPS PSE 143 committee, 2003*)



- ◆ Distillation is the main application object of soft-sensors.
 - ▶ Many distillation columns in plants.
 - ▶ Easy to model.
- ◆ Most soft-sensors were developed through Partial Least Squares (PLS).

Which method for soft-sensor?



- ◆ ANN is dominant in the literature while PLS is popular in industry.
- ◆ SVM/SVR is emerging.
- ◆ The number is increasing markedly.

(keyword search in SCOPUS database)

- ソフトセンサ概要
- ソフトセンサの適用事例(昭和電工, PLS)
- ソフトセンサの適用事例(Dofasco, PLS)
- ソフトセンサの性能保証(MSPCとの統合)
- 相関型Just-In-Timeモデリング

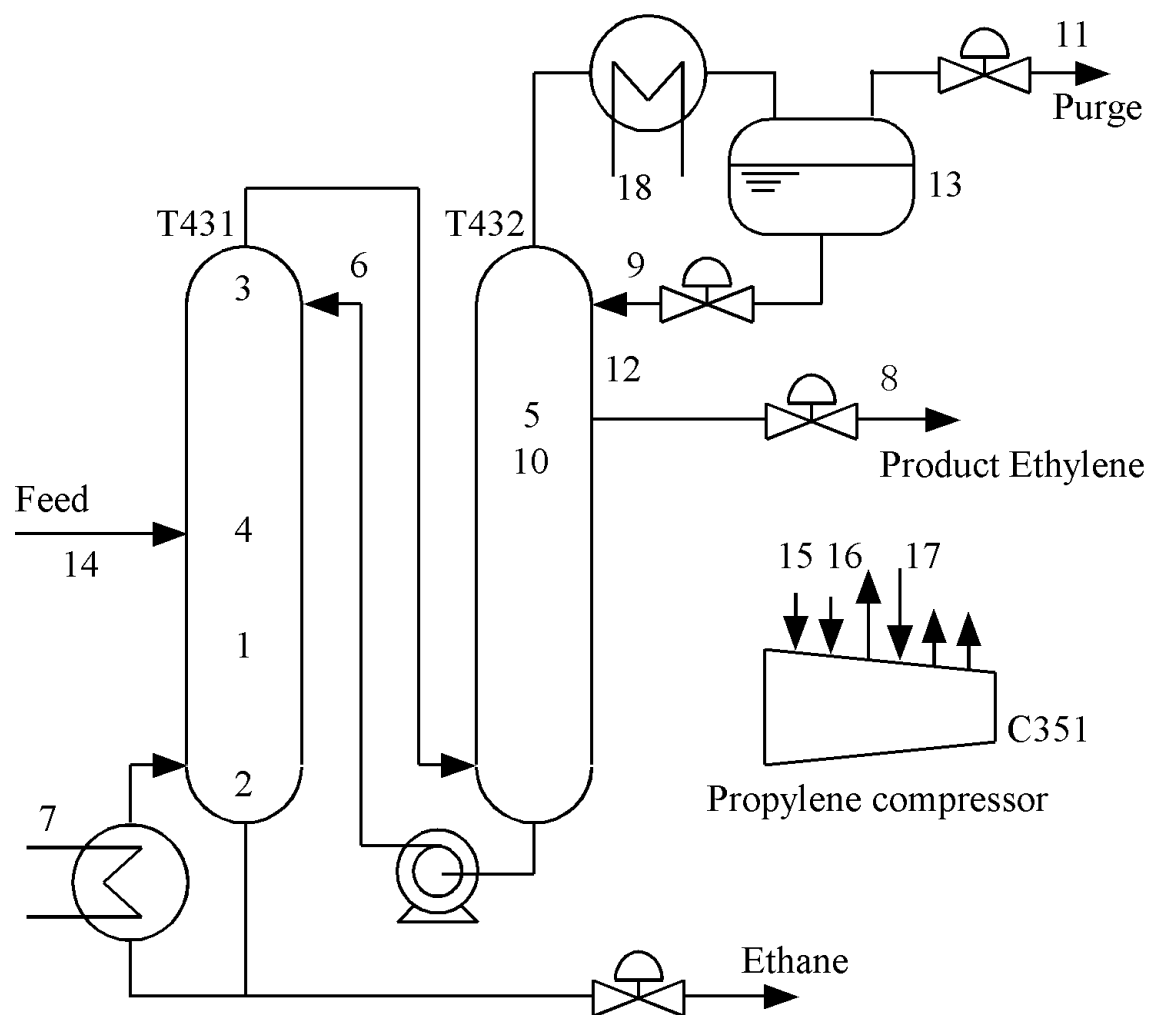
昭和電工との共同研究プロジェクト

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。推定値はオペティマイザおよびモデル予測制御システムで利用する。

"Product Quality Estimation and Operating Condition Monitoring for Industrial Ethylene Fractionator"
J. Chem. Eng. Japan, Vol.37, No.3, pp.422-428 (2004)





1. T431 tray #29 temp.
2. T431 bottom temp.
3. T431 top temp.
4. T431 tray #37 temp.
5. T432 tray #129 temp.
6. Flow rate from T432 to T431
7. T431 reboiler flow rate
8. Product ethylene flow rate
9. T432 reflux flow rate
10. T432 internal reflux flow rate
11. T432 purge flow rate
12. T432 reflux ratio
13. T432 top pres.
14. T431 feed ethane conc.
15. C351 #2 discharge pres.
16. C351 #2 discharge temp.
17. C351 #4 suction pres.
18. V359 level (cooling propylene)

製品エチレン中の不純物エタン濃度を推定する

ソフトセンサー構築における問題点

1. 多重共線性

入力変数の多くは強い相関(相互相関)を持つ。

2. 動特性

プロセスの動特性を考慮する必要がある。

自己相関によって、新たな多重共線性が発生する。



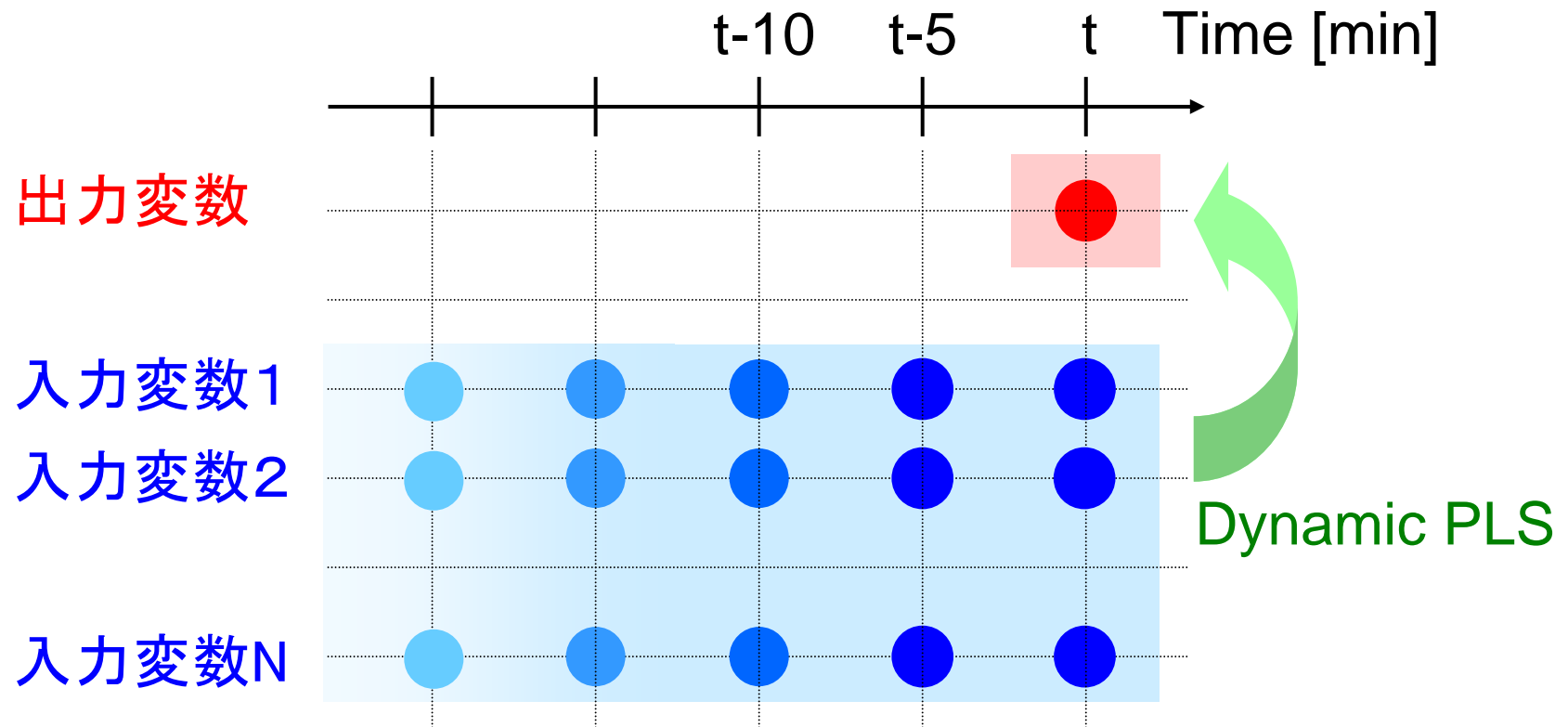
Dynamic PLS

1. 温度や圧力以外の操作変数も入力変数とする。

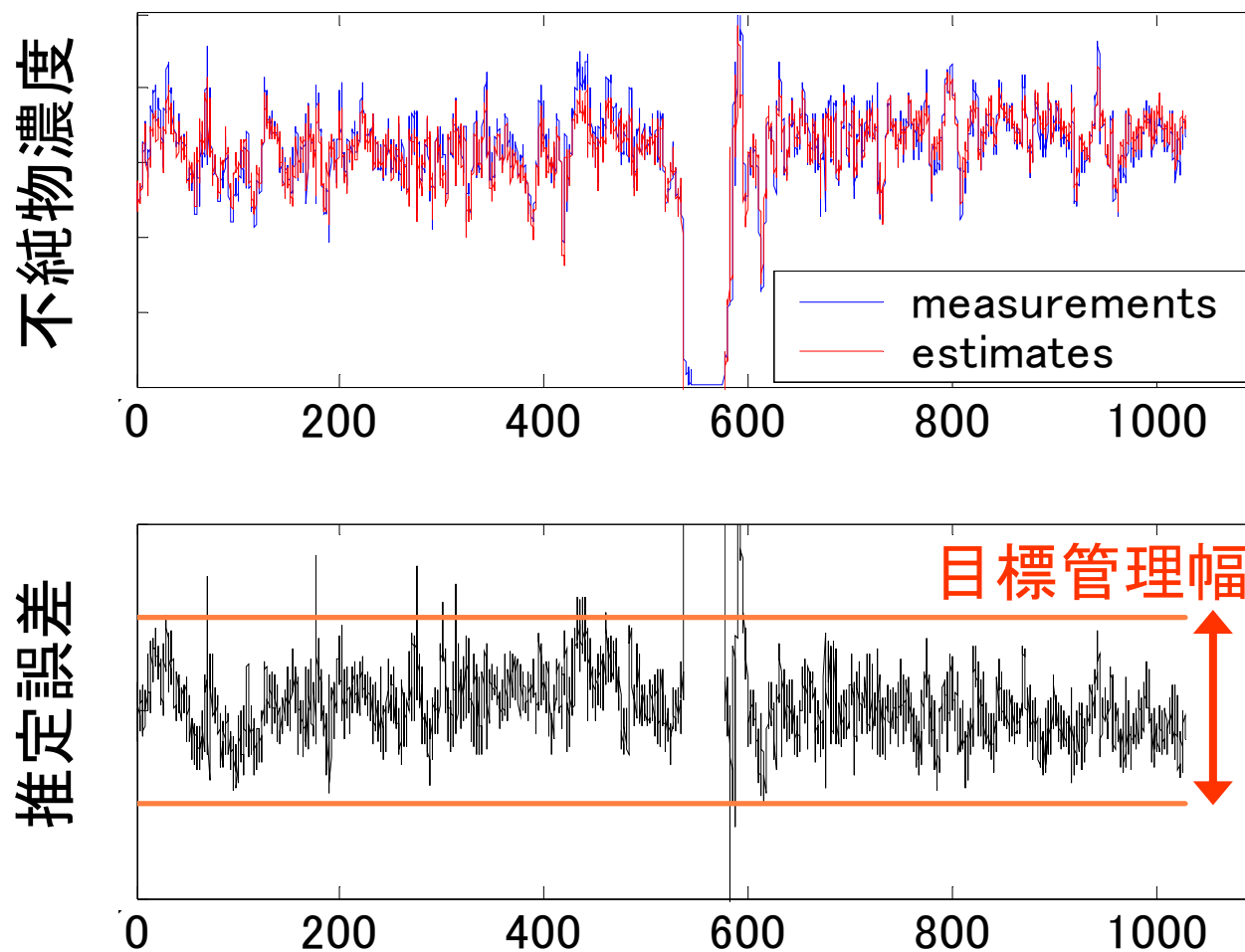
2. 動特性を考慮するために、動的モデルを構築する。

この結果、推定精度および制御性能を向上させられる。

(Kano et al., *J. Proc. Cont.*, 2000)



製品組成ソフトセンサー

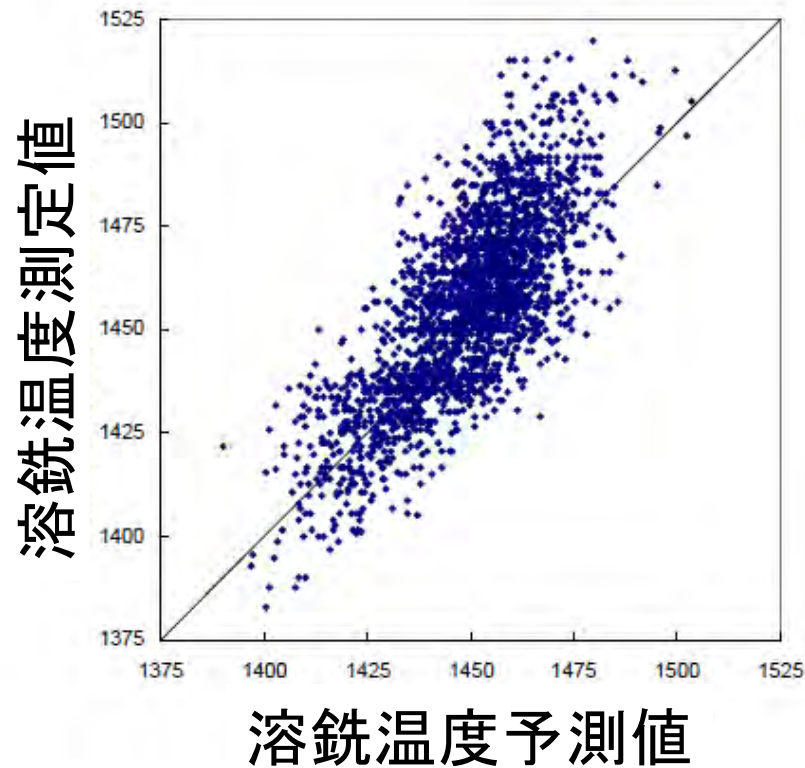


極めて高い推定精度を実現！

- ソフトセンサ概要
- ソフトセンサの適用事例(昭和電工, PLS)
- ソフトセンサの適用事例(Dofasco, PLS)
- ソフトセンサの性能保証(MSPCとの統合)
- 2段階部分空間同定
- 相関型Just-In-Timeモデリング

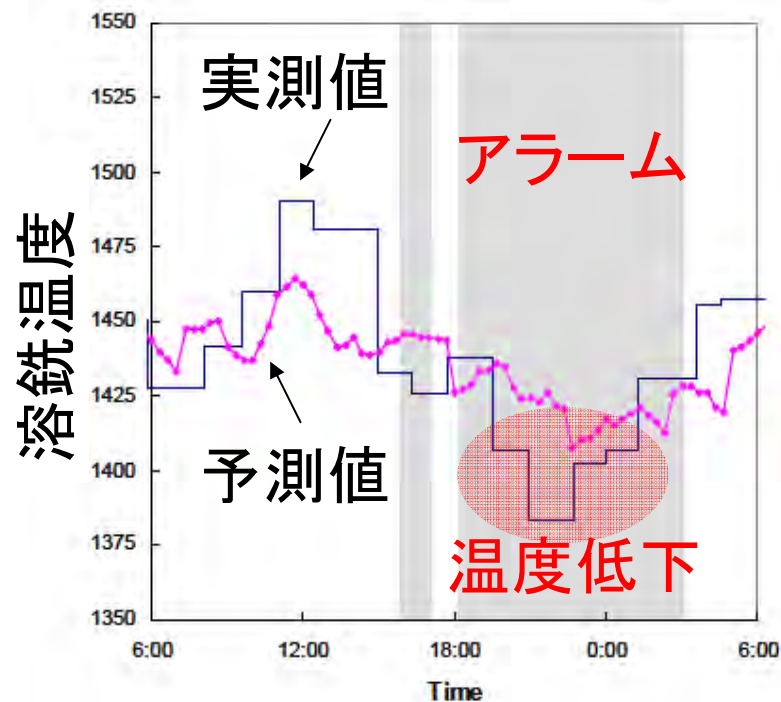
BLAST FURNACE DISASTER AVOIDANCE SYSTEM

- ◆ 高炉安定操業 (hearth chill 予防) 実現のため,
2時間先の溶銑温度を予測
- ◆ PLSモデルを利用
 - ▶ 溶銑温度推定には>35変数を利用.
 - ▶ 入力特性 (coke, iron ore, flux, fuel, and hot blast) および出力特性 (hot metal, slag, and waste gases) を利用.
 - ▶ 遅れを考慮 (dynamic PLS).
 - ▶ 低温領域での推定精度を重視.
- ◆ 信頼性指標の算出
 - ▶ 欠損値の重要性と量に応じて, 予測値の信頼性を算出.



予測誤差: 14.3°C
1430°C以下の領域では10.5°C

推定値の信頼性を評価できるシステムを実現!



- ◆ 20分ごとに予測値を計算.
- ◆ 予測値が 1430°C 以下になるとアラームを発報.
- ◆ 左の例では, 3.5時間前に発報. ただし, バックグラウンドでの検証結果のため, 実際には発報させていない.

Performance Criteria Value

Total number of faults	10
Faults detected with >1 hour notice	7
Faults detected with <1 hour notice	2
Faults not detected	1

- ソフトセンサ概要
- ソフトセンサの適用事例(昭和電工, PLS)
- ソフトセンサの適用事例(Dofasco, PLS)
- ソフトセンサの性能保証(MSPCとの統合)
- 相関型Just-In-Timeモデリング

推定誤差 = 測定値 - 推定値

- ◆ 原因はソフトセンサーか、それとも分析機器か？
 - ▶ 分析機器
 - サンプリングラインの閉塞等のトラブル
 - ▶ ソフトセンサー
 - 入力変数選択の失敗
 - 運転条件の変動
 - 触媒劣化や装置汚れなど、プロセスの経時変化

推定誤差の原因を突き止めることはできるか？

昭和電工との共同研究プロジェクト

エチレン精留塔における製品中不純物濃度の推定

品質推定値の信頼性を評価し、オプティマイザ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。

"Product Quality Estimation and Operating Condition Monitoring for Industrial Ethylene Fractionator"
J. Chem. Eng. Japan, Vol.37, No.3, pp.422-428 (2004)

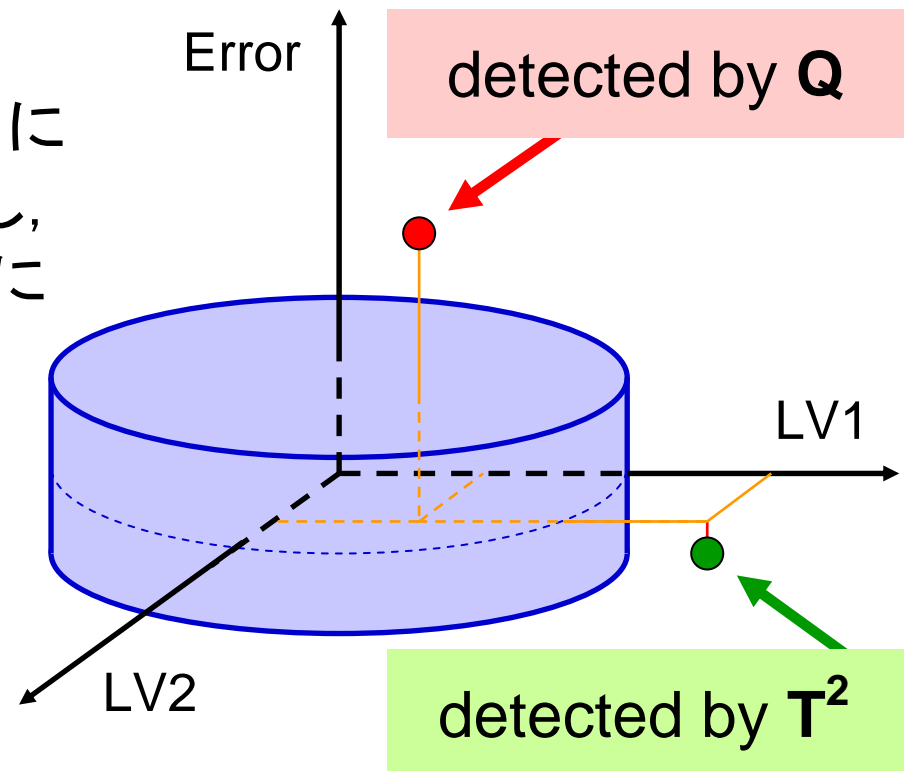
入力変数が張る多次元空間において、モデル構築に利用した
運転データが存在する部分空間内でのみ、推定モデルおよび
その推定値を信頼できる。



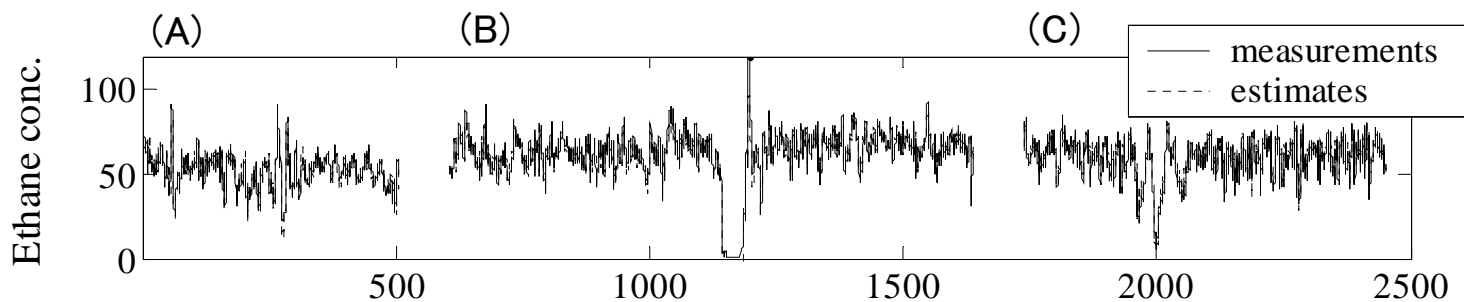
現在の運転状態が部分空間内に
あるかどうかをオンライン監視し、
なければ推定値を制御目的等に
利用しない。

分析機器の異常も検出可能。

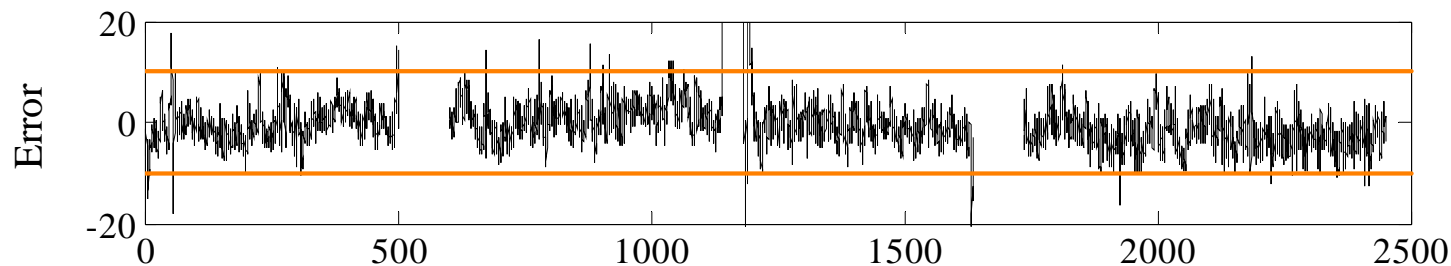
PLS-based SPC



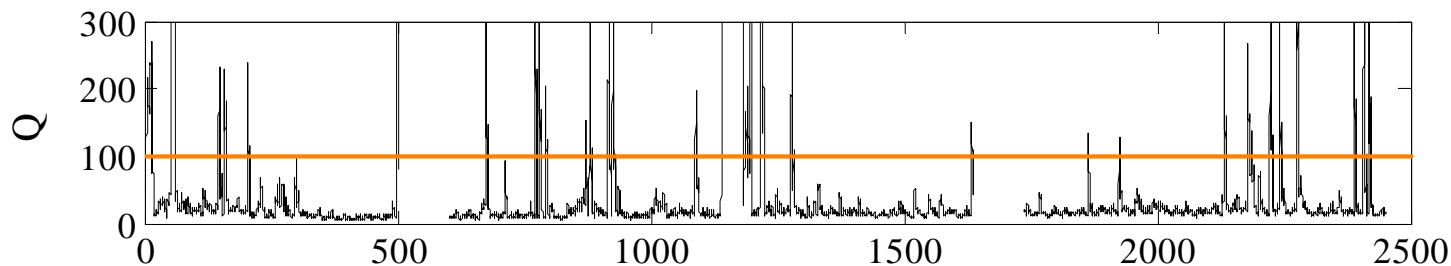
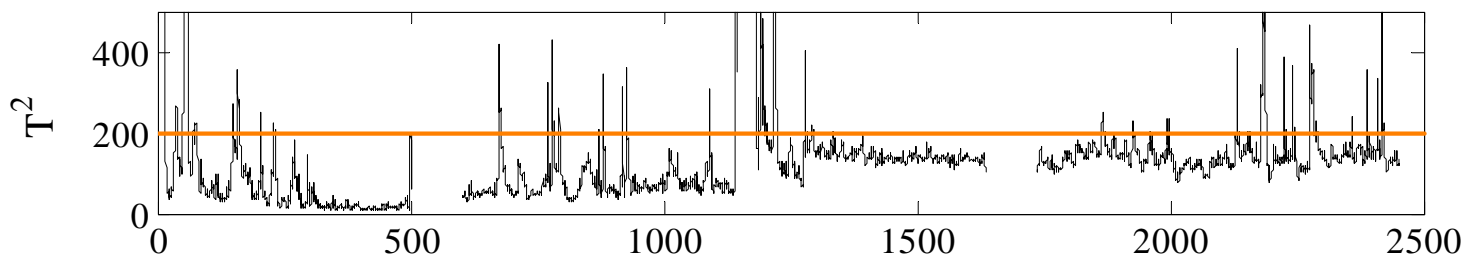
濃度



誤差




監視指標



推定値の信頼性を評価できるシステムを実現！

- ソフトセンサ概要
- ソフトセンサの適用事例(昭和電工, PLS)
- ソフトセンサの適用事例(Dofasco, PLS)
- ソフトセンサの性能保証(MSPCとの統合)
- 相関型Just-In-Timeモデリング

保守負荷の低減を目指して

- Dynamic PLS
 - 部分空間同定・二段階部分空間同定
 - ニューラルネットワーク
 - 十分に満足できる精度のモデルを構築することができたとして、その精度を維持できているかが産業応用上の深刻な問題である。
 - 技術者不足もあり、モデルの再構築は事実上困難。
- 
- Recursive PLS
 - 逐次的にモデルを更新するため、直近の運転状態に過度に適応してしまう。
 - Just-In-Timeモデル
 - データベース型モデルであり、測定値が得られる毎にデータベースを更新し、そのデータベースに基づいて、必要に応じて局所的なモデルを構築する。

データ行列の更新

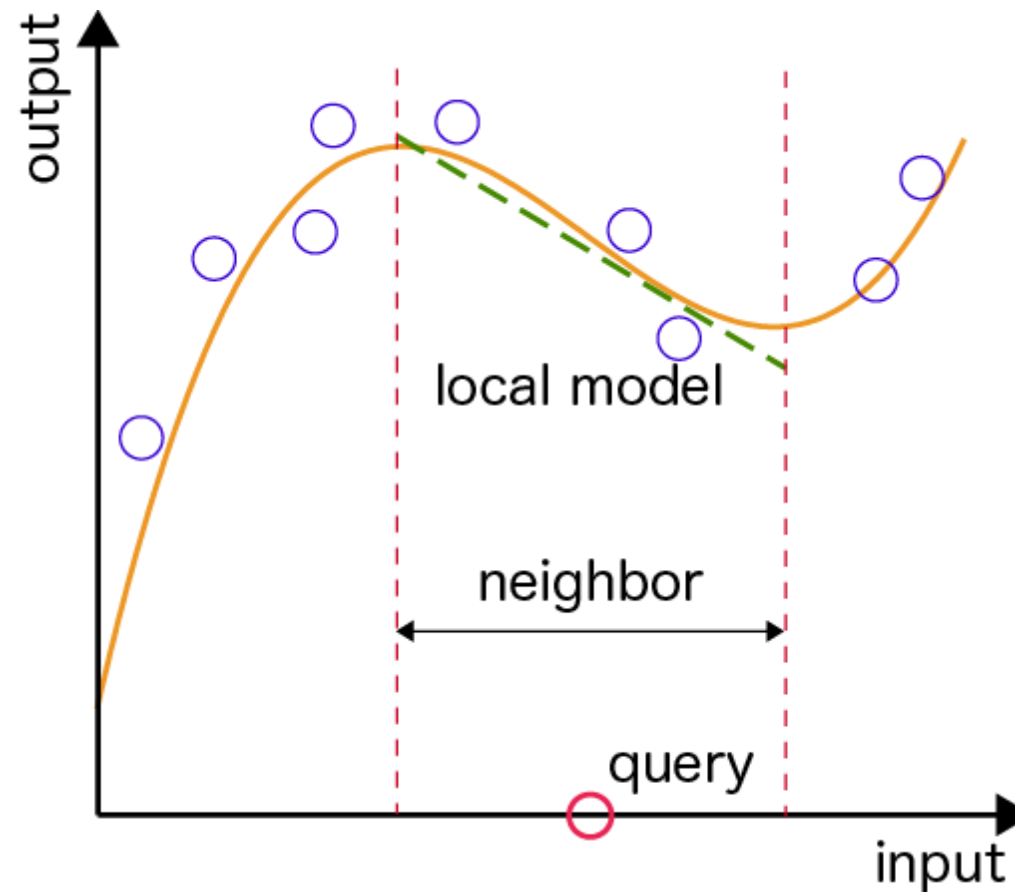
$$\begin{aligned} X_{new} &= \begin{bmatrix} X \\ \mathbf{x}_{new}^T \end{bmatrix} & Y_{new} &= \begin{bmatrix} Y \\ \mathbf{y}_{new}^T \end{bmatrix} & X, Y &: \text{入出力データ行列} \\ & & & & \mathbf{x}_{new} &: \text{新たな入力} \\ & & & & \mathbf{y}_{new} &: \text{新たな出力} \\ X_{new} &= \begin{bmatrix} P^T \\ \mathbf{x}_{new}^T \end{bmatrix} & Y_{new} &= \begin{bmatrix} Q^T \\ \mathbf{y}_{new}^T \end{bmatrix} & P, Q &: \text{潜在変数行列} \end{aligned}$$

忘却係数

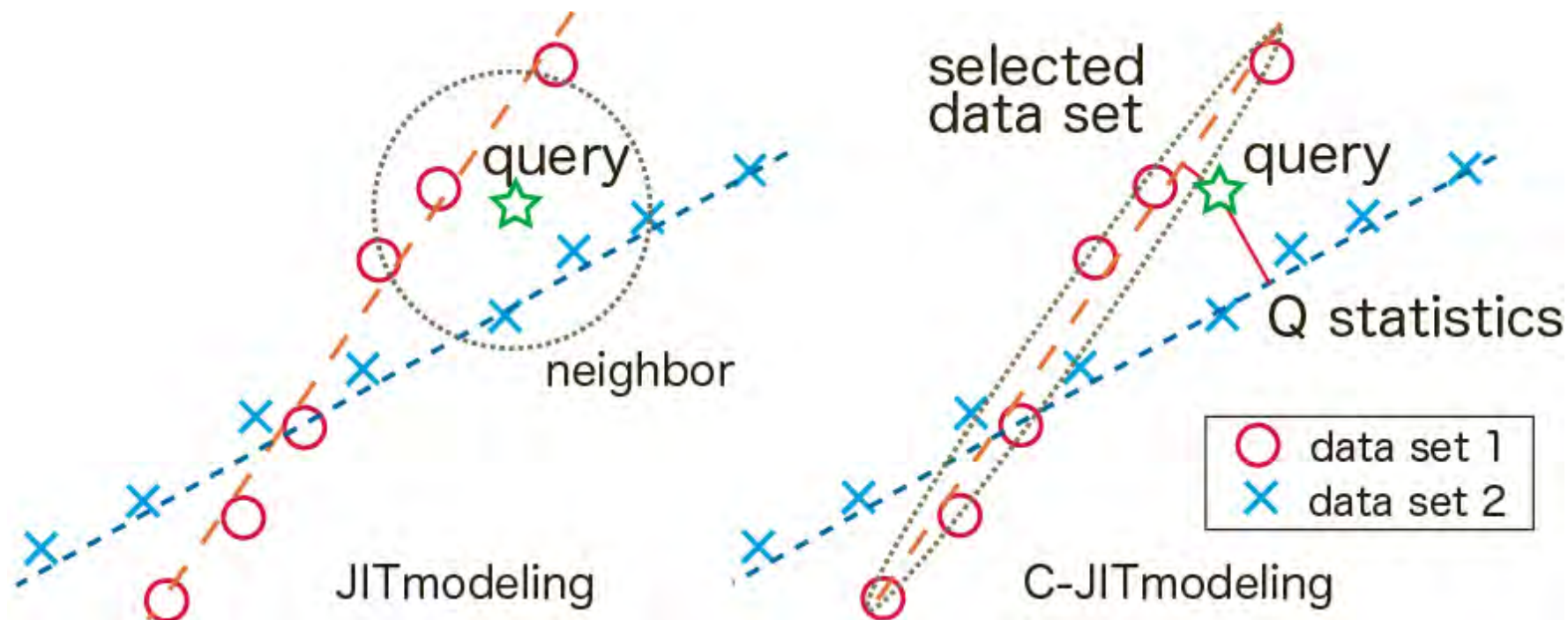
より早く追従させる

忘却係数 β の導入

$$X_{new} = \begin{bmatrix} \beta P^T \\ \mathbf{x}_{new}^T \end{bmatrix} \quad Y_{new} = \begin{bmatrix} \beta Q^T \\ \mathbf{y}_{new}^T \end{bmatrix} \quad 0 < \beta < 1$$



- **Just-In-Timeモデル**
 - Query点近傍のデータを集め、それらのデータのみを用いて、局所的な(線形)モデルを構築する.

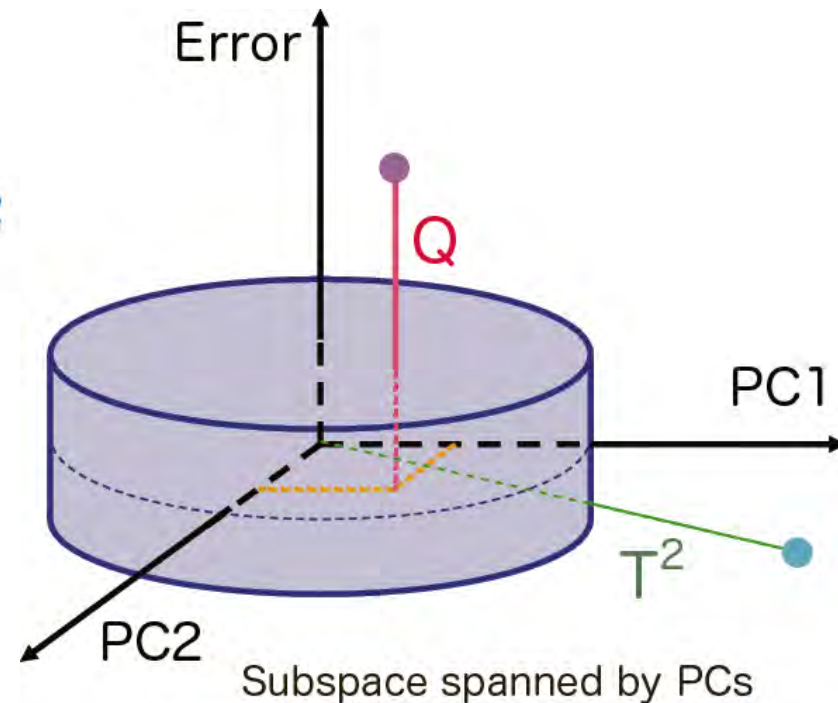


- 相関型Just-In-Timeモデル
 - 従来のJITモデルでは、「距離」のみに基づいて近傍が決定されるため、相関関係は一切考慮されない。
 - 相関関係を考慮すれば、より優れたモデルが構築できる。

- 新たな入出力データをデータベースに保存する.
- データベースより, $k(1 \sim K)$ 番目のデータセットを取り出し, 各データセットに対する評価指標 J を計算する.
- J が最小となるデータセットを選択する.
- 選択したデータセットに基づいて, モデルを構築する.
- この手続きを繰り返す.

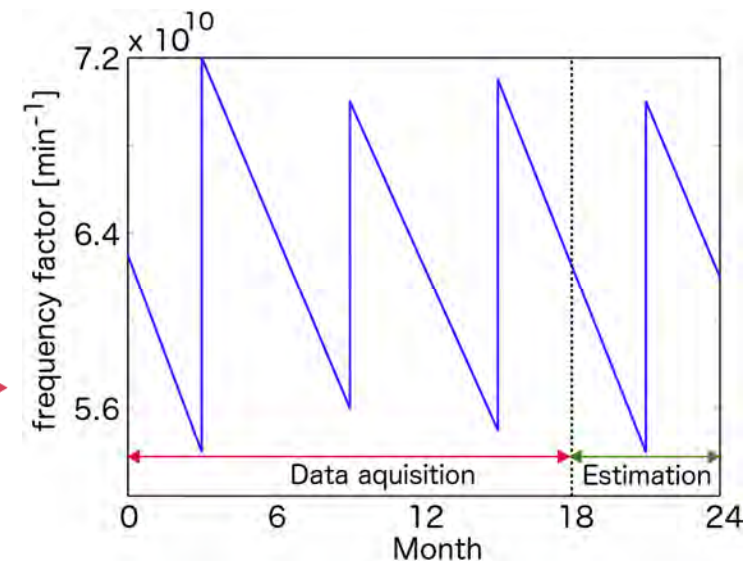
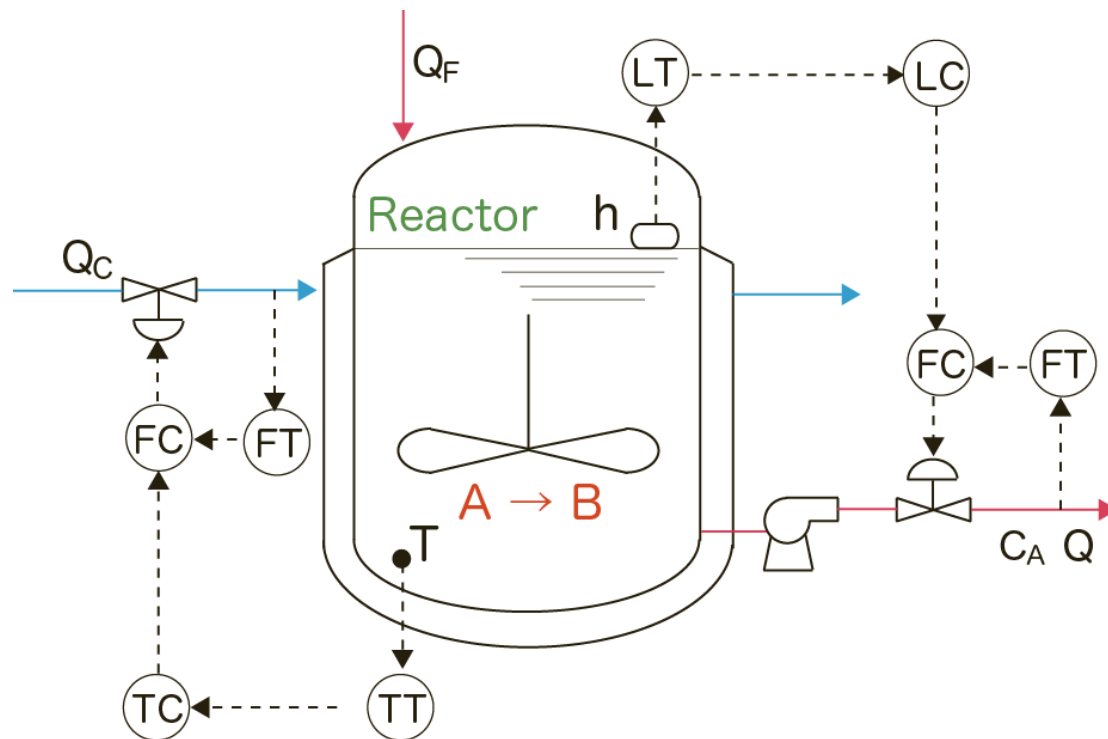
$$J = \lambda Q + (1 - \lambda)T^2$$

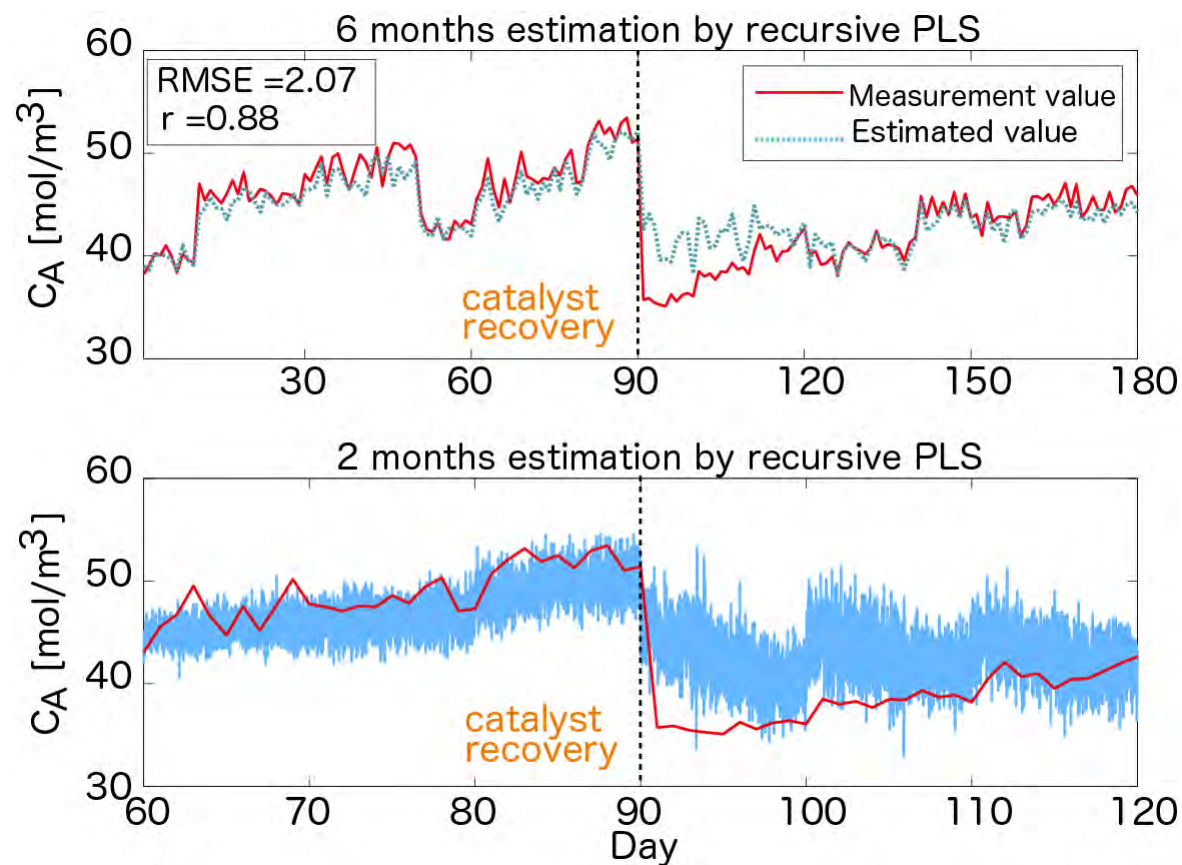
$$0 \leq \lambda \leq 1$$



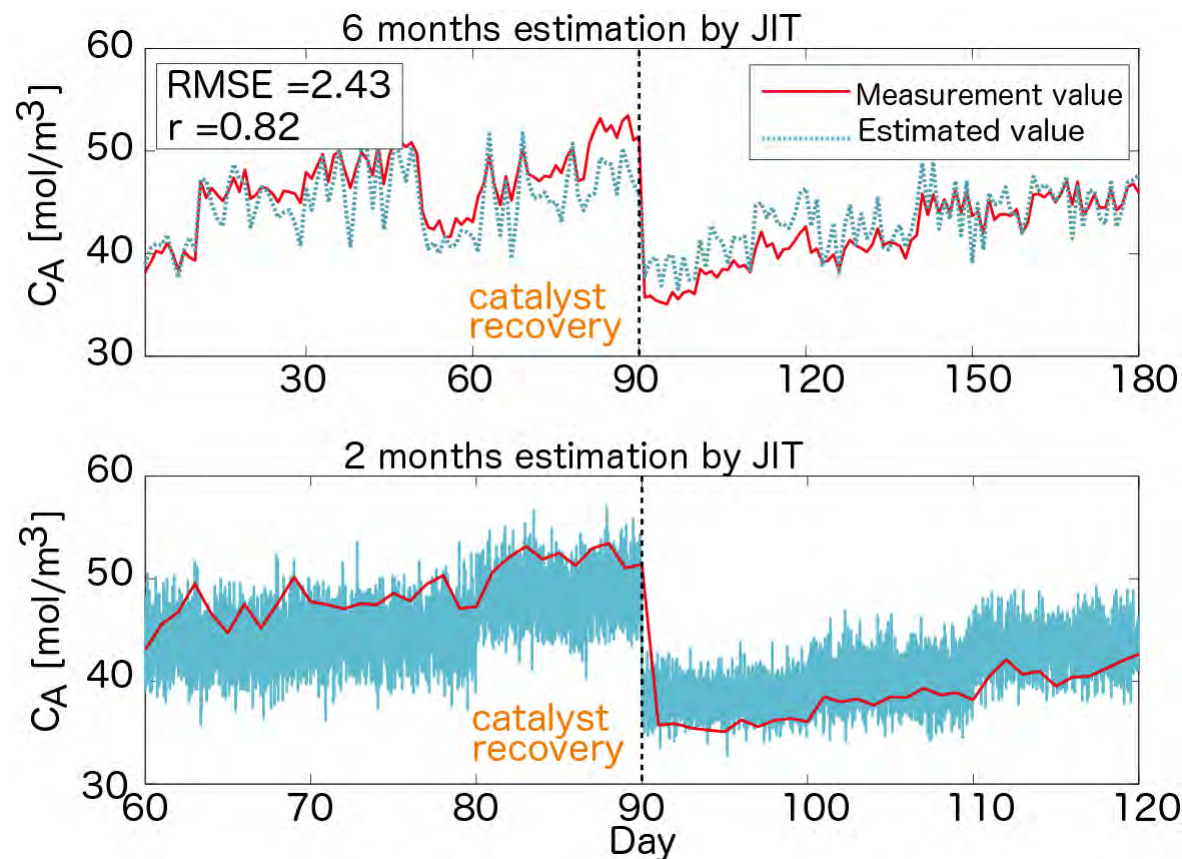
ケーススタディ: 対象プロセス

- 冷却ジャケット付き連続攪拌槽型反応器を対象とする.
- 反応器内温度が冷媒流量で, 液レベルが製品流量でカスケード制御されている.
- 触媒の劣化と再生の影響について検討する. モデルでは, 反応速度係数を変化させている.

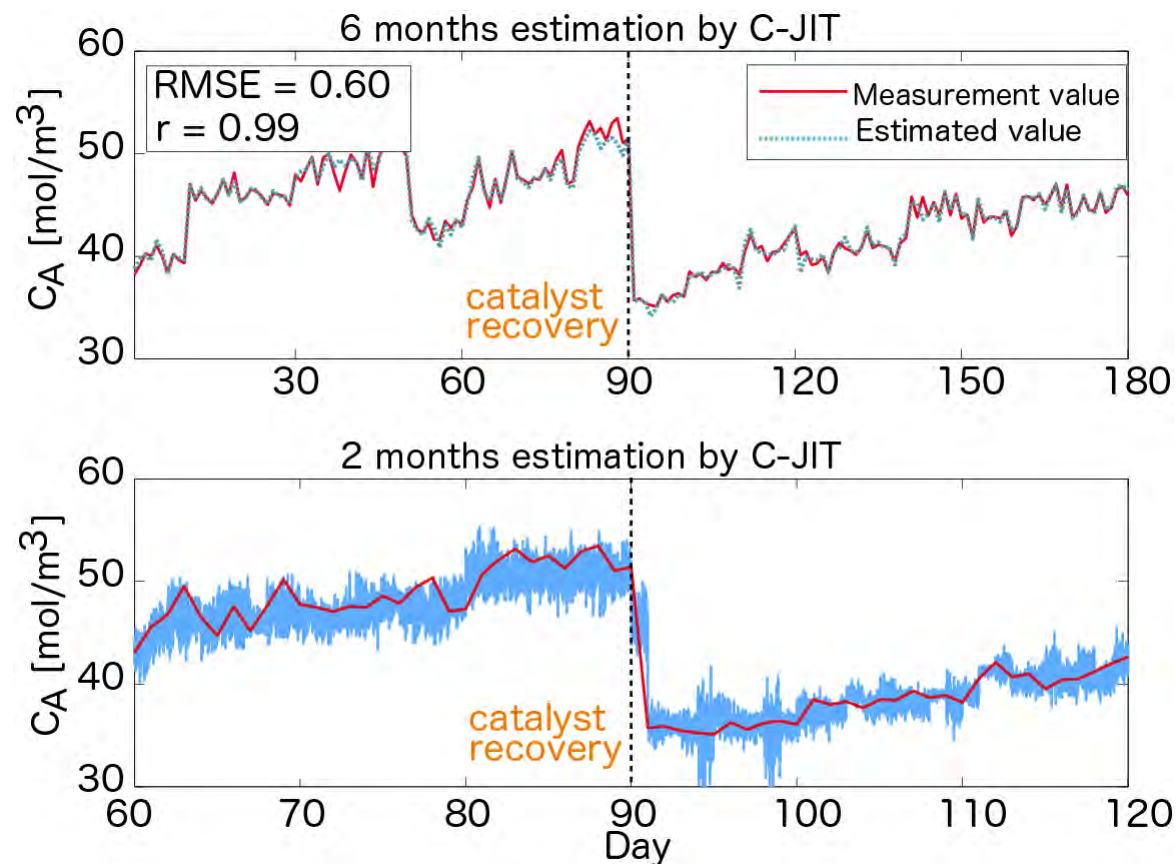




- 触媒再生のような急激なプロセス特性の変化が発生すると全く追従できず、推定誤差が大きくなってしまふ。



- 触媒再生のような急激なプロセス特性の変化にも追従できているが、全体的に推定誤差が大きい。



- 触媒再生のような急激なプロセス特性の変化にも追従できており、極めて推定精度が高い。

対象プロセス

◆ 分解ガソリン精留塔

昭和電工(株)大分工場
エチレンプラント

◆ ガソリン中アロマ濃度

MPC制約条件のひとつ

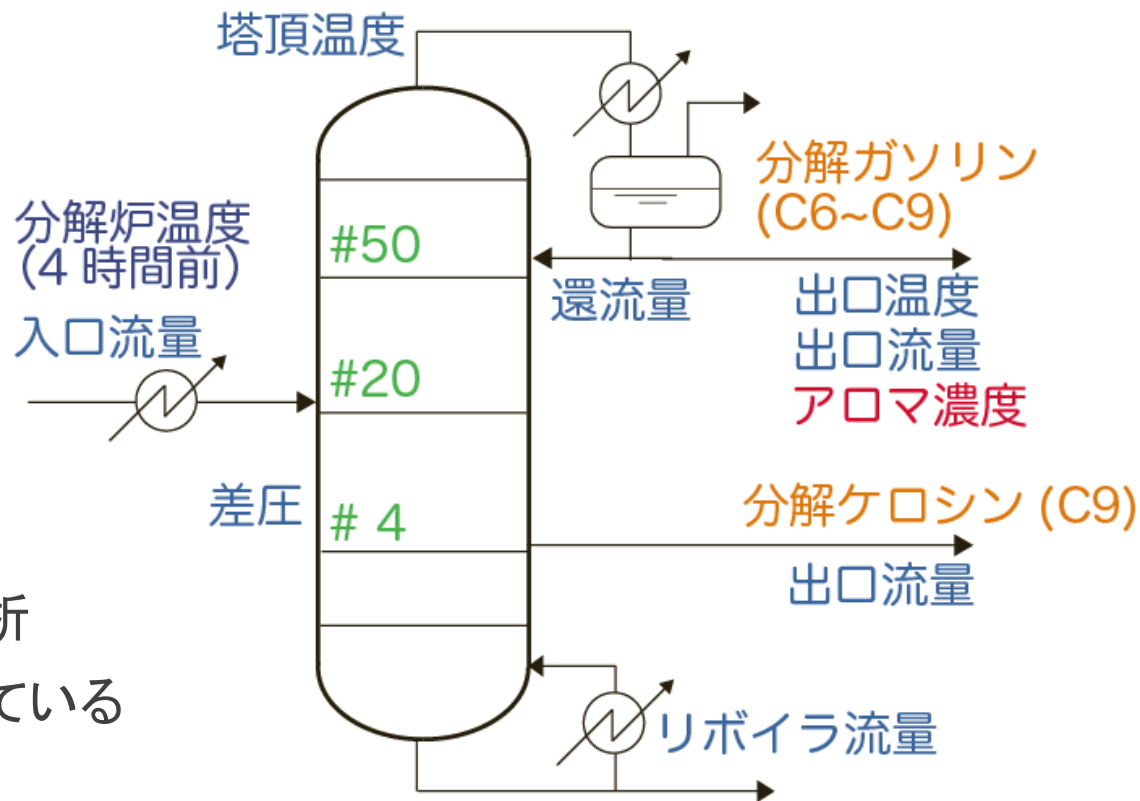
⇒ ラボで通常1回/1日分析
余裕を持った運転をしている

◆ 入力変数選択

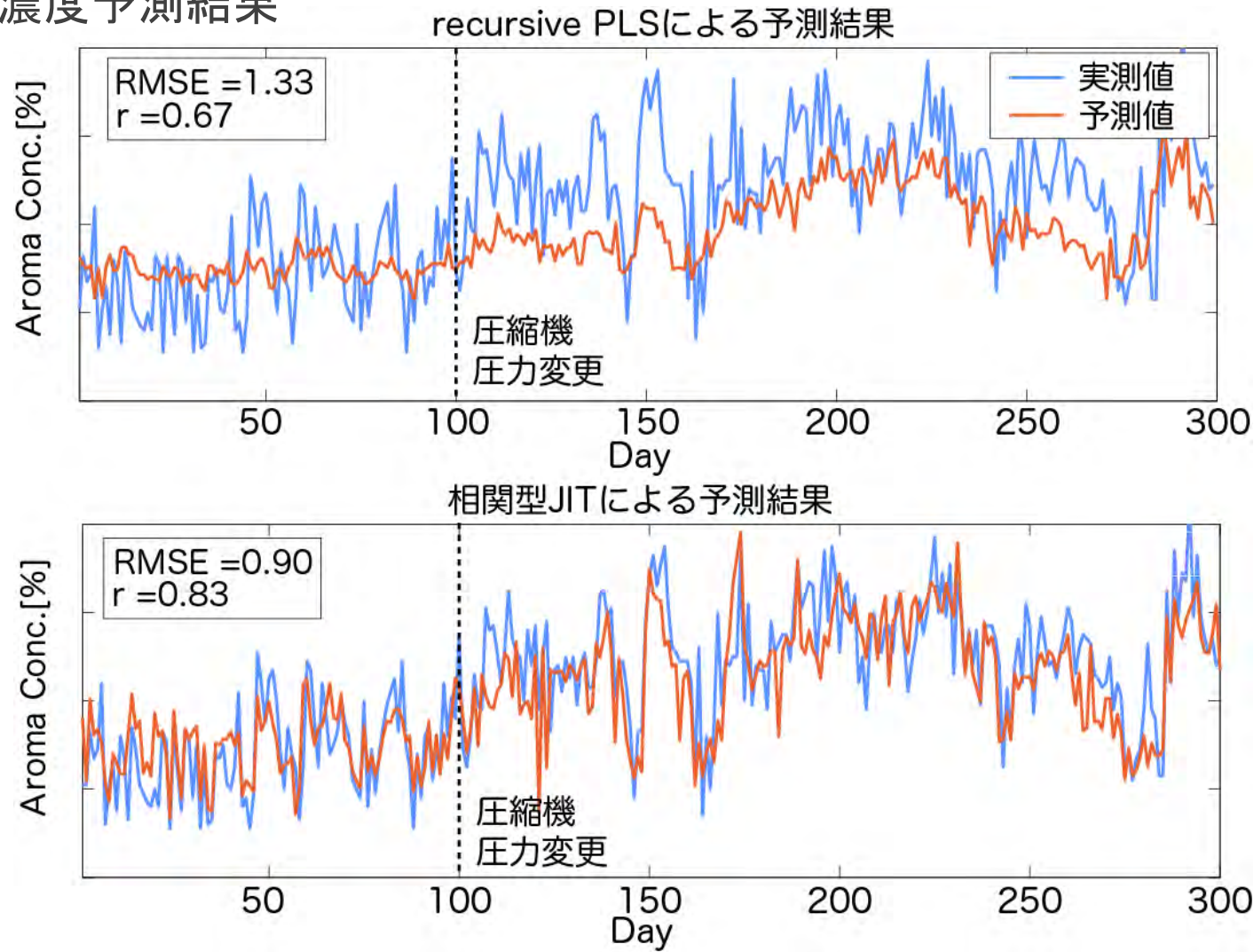
8変数選択(全19変数) + 4時間前の分解炉コイル出口温度

◆ データ

2006/4/30 ~ 2007/12/25(600日間)



◆ アロマ濃度予測結果



相関型JITモデリングは従来法に比べて高い予測性能を達成