

MATLAB EXPO 2018

非線形モデル予測制御 (NMPC) 活用拡大に向けた取り組み

MathWorks Japan

アプリケーションエンジニアリング部 制御

赤阪 大介



内容

- 活動背景
- ツールコンセプト
- 例題
- まとめ

産業界で使える NMPC 設計ツールの開発を目指す

目的

- 産業界における NMPC はじめ最適制御技術適用の活発化

理由

- 製品・サービスの付加価値をより一層高めてゆくため

複雑化する制御系に、高性能・高品質化かつ迅速な開発が求められる

プロセス

開発資源をより高いレベルの思考に注力する MBD/制御設計の必要性

手法

高い制御性能が期待される最適制御技術の必要性

道具

実用的な制御設計ツールの必要性

目標

- 産業界で使える NMPC 設計ツールを開発し、制御設計者が試行(思考)しやすい環境を提供する

NMPC ・ 最適制御技術に共に挑戦しませんか？

その理由・動機は...

1. NMPC の潜在能力は高い
 - 複雑な非線形性を持つ制御対象に対して、高い制御性能を発揮する
2. 現場に即した NMPC 設計ツールが出来つつある
 - 自動化とカスタマイズの両立、マップや条件分岐を含むプラントモデルを扱える
3. 同じ志をもった仲間(よき好敵手)がいる
 - 様々な業界で挑戦している人達がいる

内容

- 活動背景
- ツールコンセプト
- 例題
- まとめ

NMPC 設計ツールに対する「産業界目線」のニーズ・課題

ニーズ・課題

背景

1	インターフェースや各ツールのリンケージ	技術者が創造・思考的な業務(頑張りどころ)に注力できるツールが必要
2	カスタマイズ性 <ul style="list-style-type: none"> ▪ アルゴリズム更新や内部変数モニタ ▪ 中間変数が絡む目標や制約の設定 ▪ 既存モデルの利用 ▪ 他制御との切替 	技術者が創造・思考的な業務(頑張りどころ)に注力できるツールが必要 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 敷居を下げ、試行(思考)を促進する簡単で使いやすいインターフェースが必要 ▪ 変更・拡張の容易なカスタマイズ性が必要
3	離散状態対応 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 切替や条件分岐、状態遷移など 	多くの実システムに存在する切替や条件分岐やプラントモデルによく用いられるマップ・テーブルを直接扱える設計手法が必要
4	マップ・テーブル対応	
5	最適解追従の収束性	収束性を判別する解析手法が必要
6	ばらつき対応	実機のばらつきを考慮した設計手法が必要
7	要求に沿いやすい目標設定	制御性能要件と最適化問題の対応付けが必要
8	多目的対応	複数の要求間のトレードオフをとる設計手法が必要
9	分散処理	複雑化に対するさらなる処理負荷軽減が必要

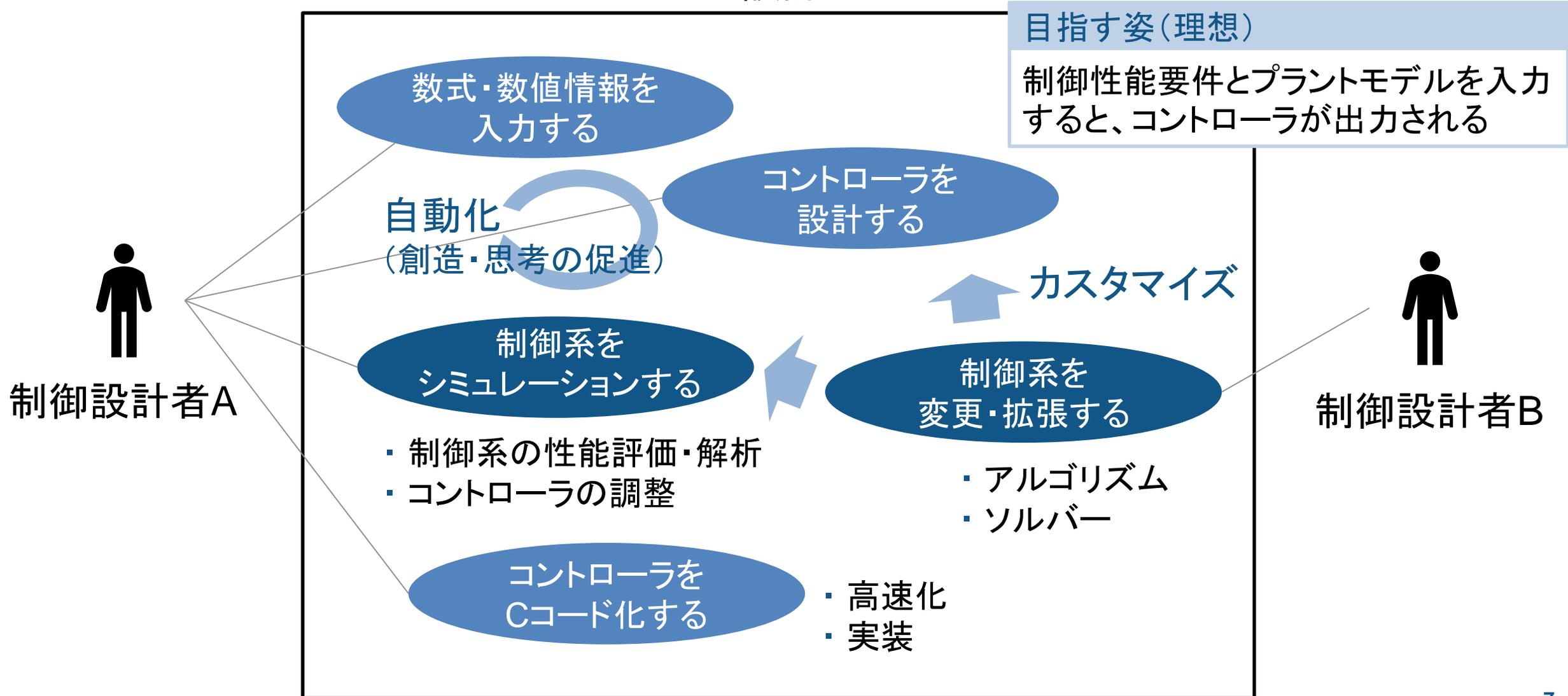
基本課題

本講演の主課題

今後の課題

ツールのコンセプトは「自動化」と「カスタマイズ」の両立

NMPC 設計ツール



ツールには「数式処理」と「数値計算」が求められる

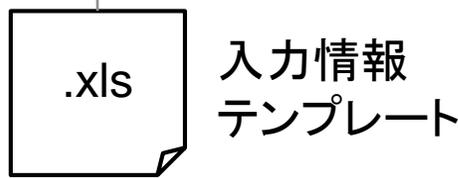


NMPC 設計ツールの流れ

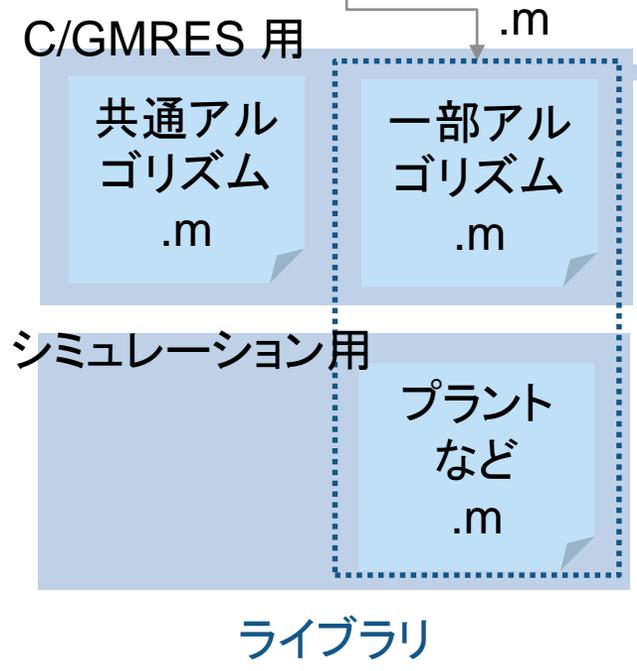
情報入力 (数式・数値)

- ### NMPC 設計
- ・ プラント(設計用)
 - ・ 評価関数
 - ・ 制約条件
 - ・ 予測ホライズン
 - ・ 各パラメータ値

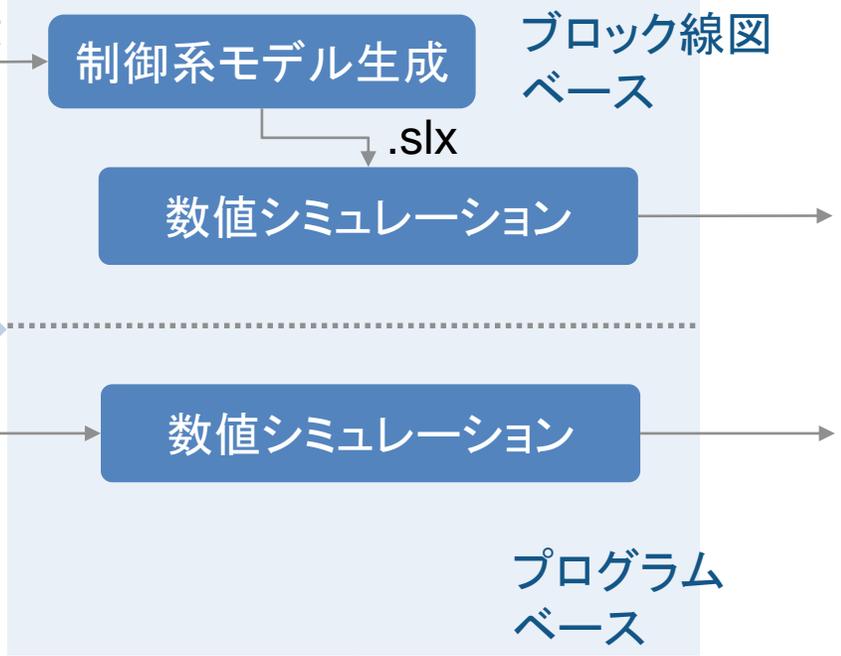
- ### シミュレーション
- ・ プラント(検証用)
 - ・ 目標値関数/時系列
 - ・ 評価値関数
 - ・ 各パラメータ値



制御アルゴリズム 生成

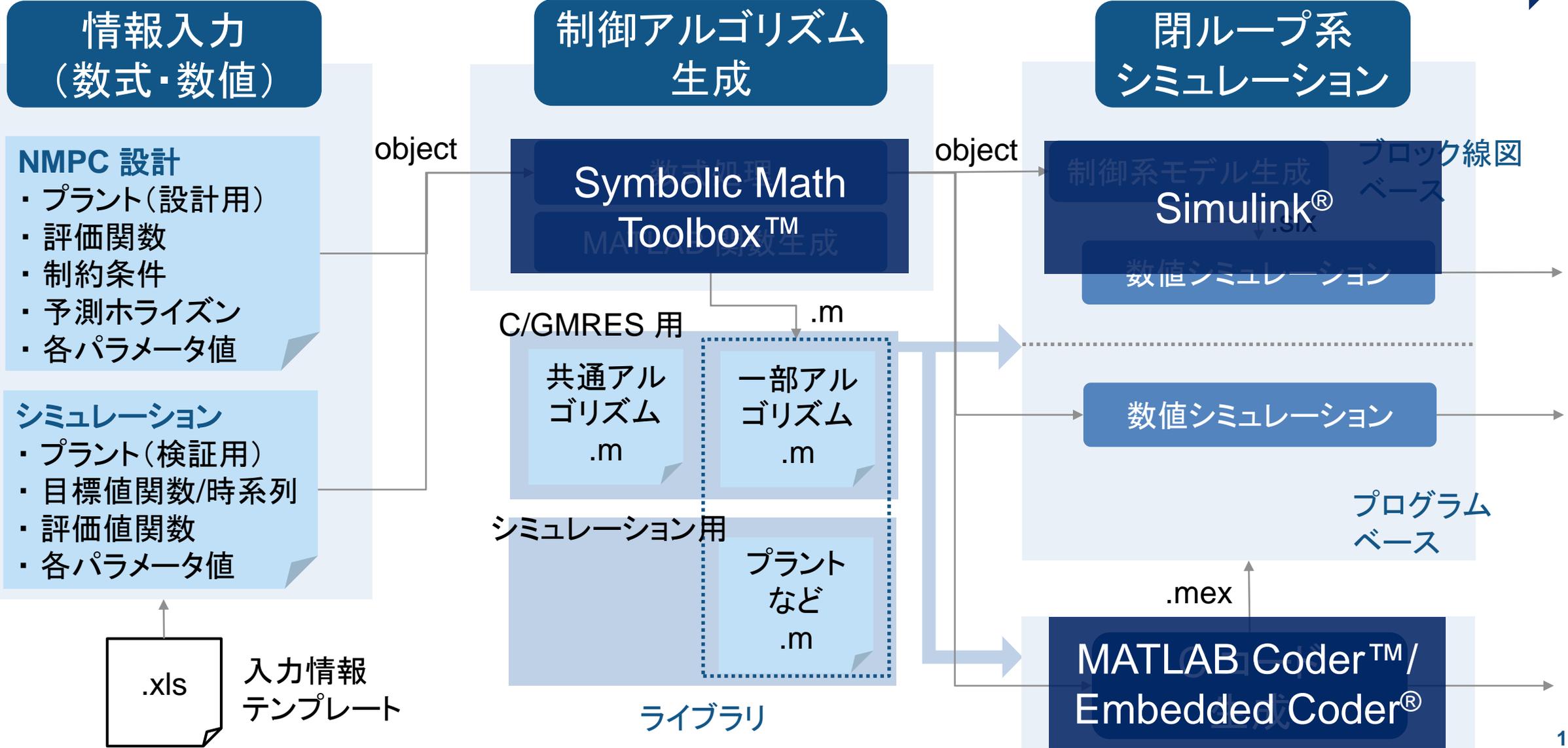


閉ループ系 シミュレーション



MathWorks の要素技術・ツールをうまく融合する

MATLAB®



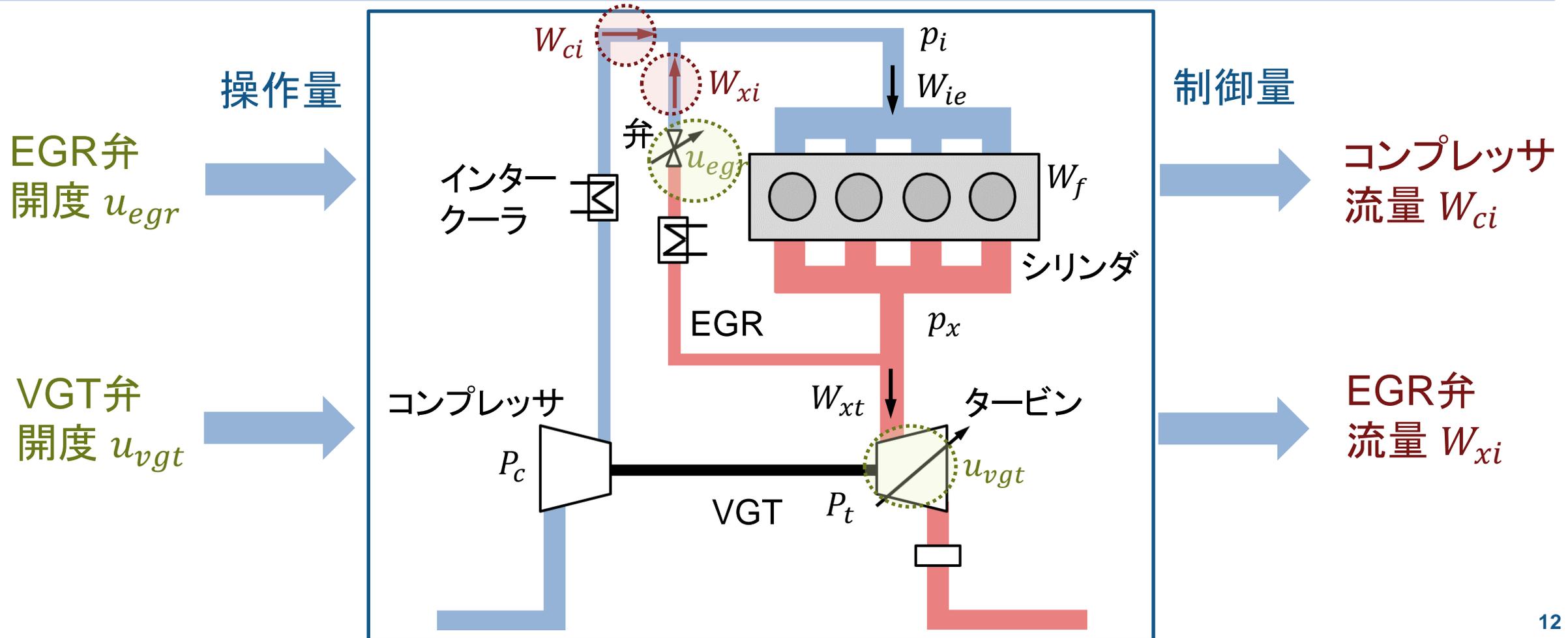
内容

- 活動背景
- ツールコンセプト
- **例題**
- まとめ

ディーゼルエンジン吸排気系の例

制御目標

EGR弁開度 および VGT弁開度 を操作し、コンプレッサ流量 および EGR弁流量 を目標値追従させる。
弁開度の制約を守りながら、応答性能の向上を目指す。



プラントモデルは「マップ」と「条件分岐」を含む非線形系

微分方程式

$$\begin{cases} \dot{p}_i = \theta_i(W_{ci} + W_{xi} - W_{ie}) \\ \dot{p}_x = \theta_x(W_{ie} - W_{xt} + W_f) \\ \dot{P}_c = \frac{1}{\tau}(-P_c + P_t) \end{cases}$$

 はマップ
 はマップと条件分岐を含む

$$\begin{aligned} W_{ci} &= W_{ci}(p_i, P_c) \\ W_{xt} &= W_{xt}(p_x, u_{vgt}) \\ P_t &= P_t(p_x, u_{vgt}) \\ W_{xi} &= K_{egr} A_{egr}(u_{egr}) \varphi(p_i, p_x) \\ W_{ie} &= K_c p_i \end{aligned}$$

2次元マップ
 1次元マップ

$$\varphi = \begin{cases} \frac{p_x}{\sqrt{2}}, & \text{if } \frac{p_i}{p_x} \geq 0.5 \\ \sqrt{2p_i(p_x - p_i)}, & \text{if } 0.5 \leq \frac{p_i}{p_x} < 1 \\ -\sqrt{2p_x(p_i - p_x)}, & \text{if } 1 \leq \frac{p_i}{p_x} < 2 \\ -\frac{p_i}{\sqrt{2}}, & \text{if } 2 \leq \frac{p_i}{p_x} \end{cases}$$

条件分岐

状態量

操作量

制御量

記号	意味
p_i	インマニ圧
p_x	エキマニ圧
P_c	コンプレッサパワー
u_{egr}	EGR弁開度
u_{vgt}	VGT弁開度
W_{ci}	コンプレッサ流量
W_{xi}	EGR弁流量
W_{ie}	シリンダ流入量
W_{xt}	タービン流量
W_f	燃料噴射量
P_t	タービンパワー
A_{egr}	EGR弁有効面積

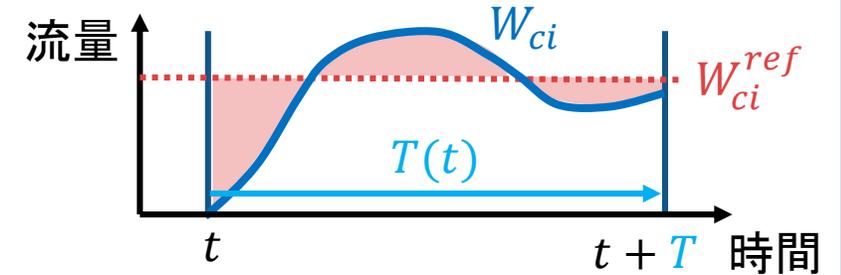
※ $\theta_i, \theta_x, \tau, K_{egr}, K_c$ は定数

最適化問題 $\min_u J$ (= 要求) の定式化

目的関数

流量の目標値追従 (偏差の抑制)

$$J = \int_t^{t+T} q_1 \left(W_{ci}(\tau) - W_{ci}^{ref}(t) \right)^2 + q_2 \left(W_{xi}(\tau) - W_{xi}^{ref}(t) \right)^2 + r_1 \left(u_{egr}(\tau) - u_{egr}^{ref}(t) \right)^2 + r_2 \left(u_{vgt}(\tau) - u_{vgt}^{ref}(t) \right)^2 d\tau$$



重み: q_1, q_2, r_1, r_2

予測ホライズン: $T(t) = T_f(1 - e^{-\alpha t})$

弁開度の目標値追従 (フィードフォワード制御)

制約条件

$0 \leq u_{egr}(t) \leq 1$ EGR弁開度の上下限制約 (0: 全閉, 1: 全開)

$0 \leq u_{vgt}(t) \leq 1$ VGT弁開度の上下限制約 (0: 全閉, 1: 全開)

NMPC 設計ツールの高水準インターフェース

```
nmPCDesigner(NMPCobj, NSIMobj, 'task', 'all');
```

情報入力
(数式・数値)

制御アルゴリズム
生成

閉ループ系
シミュレーション

ブロック線図
ベース

NMPC オブジェクト作成

```
dx = [thetax*(Wci(pi, Pc) + Wxi - Wie);
      thetax*(Wie - Wxi - Wxt(px, uvgt) + Wf);
      1/tau*(-Pc + Pt(px, uvgt))];

L = 0.5*((W-Wref)'*Q*(W-Wref) + (u-uref)'*R*(u-uref));
phi = 0.5*(W-Wref)'*Sf*(W-Wref);
J = [L; phi];
```

NMPCobj = nmPC(...)

NSIM オブジェクト作成

```
dx = [thetax*(Wci(pi, Pc) + Wxi - Wie);
      thetax*(Wie - Wxi - Wxt(px, uvgt) + Wf);
      1/tau*(-Pc + Pt(px, uvgt))];
```

NSIMobj = nsim(...)

nmPCxlsread.m

入力情報
テンプレート



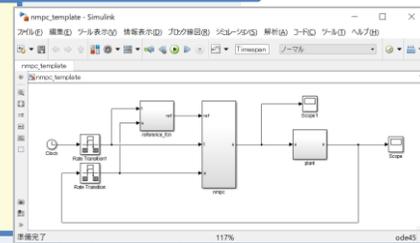
object

```
nmPCDesigner(...
  NMPCobj, NSIMobj, ...
  'task', 'symbolic');
```

object

```
options = nmPCoptions();
options.SimulationBase = 'simulink';
```

```
nmPCDesigner(...
  NMPCobj, NSIMobj, ...
  'task', 'simulation', ...
  'options', options);
```



C/GMRES 用

- 関数
- axfunc.m
- bfunc.m
- cgmres.m
- Ffunc.m
- nlgmres.m

.m

- 関数
- equalityconstraints.m
- jacobianhu.m
- jacobianhx.m
- jacobianphix.m
- predictionmodel.m
- predictionssampltime.m

..etc

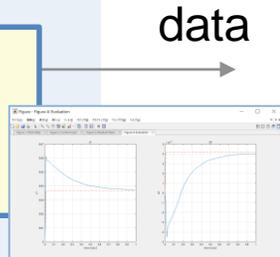
シミュレーション用

- 関数
- evaluationcalc.m
- plantmodel.m
- referencecalc.m

ライブラリ

```
nmPCDesigner(...
  NMPCobj, NSIMobj, ...
  'task', 'simulation');
```

プログラムベース

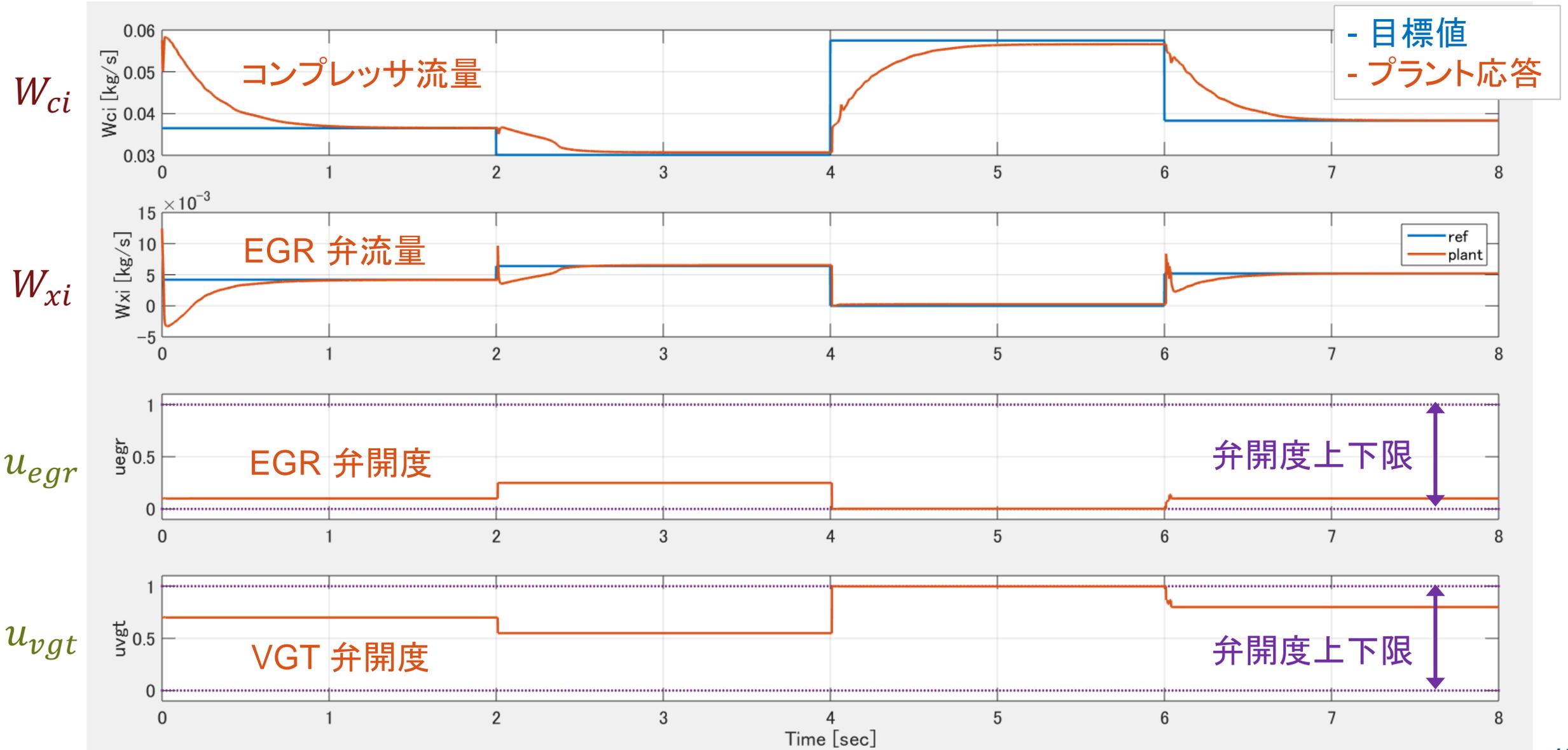


data

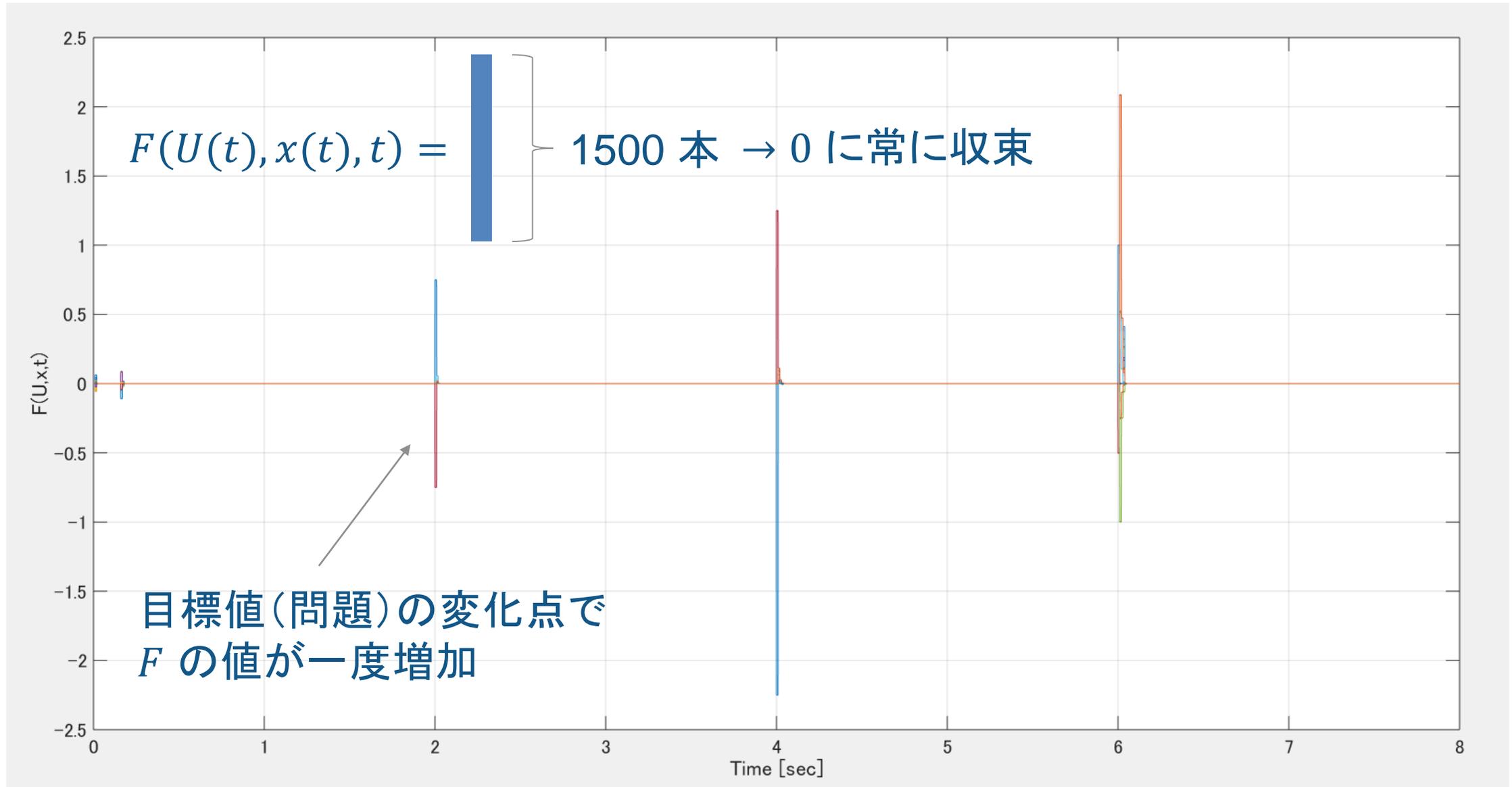
.mex

```
nmPCDesigner(...
  NMPCobj, NSIMobj, ...
  'task', 'codegen');
```

異なる目標動作点に対して、高い応答性を示す



非線形連立方程式が時間軸に沿って解かれている



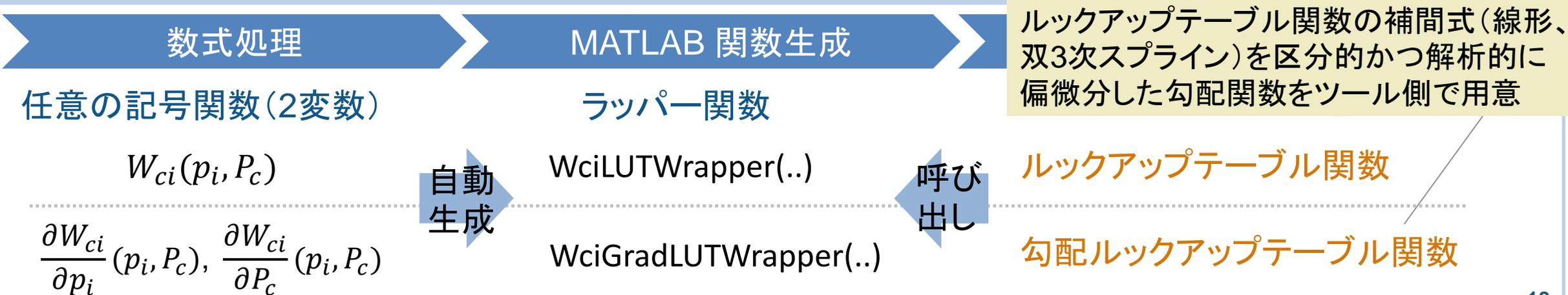
マップ・テーブルは(勾配)ルックアップテーブル関数で対応する

課題

プラントモデルを $\dot{x} = f(x, u)$ とすると、制御アルゴリズムには $f(x, u)$, $\frac{\partial f}{\partial x}(x, u)$, $\frac{\partial f}{\partial u}(x, u)$ が必要

例題では	$W_{ci}(p_i, P_c)$	$\partial W_{ci} / \partial p_i$	$\partial A_{egr} / \partial u_{egr}$	をマップデータから計算する必要がある
	$W_{xt}(p_x, u_{vgt})$	$\partial W_{xt} / \partial p_x$	$\partial W_{xt} / \partial u_{vgt}$	
	$P_t(p_x, u_{vgt})$	$\partial P_t / \partial p_x$	$\partial P_t / \partial u_{vgt}$	
	$A_{egr}(u_{egr})$	$\partial W_{ci} / \partial P_c$		

解決策



条件分岐は切替関数を導入し、微分方程式を1つに結合して扱う

課題

条件式でダイナミクスが切り替わる離散状態を含むプラントモデルへの拡張が必要

$$\text{プラントモデル: } \dot{x} = \begin{cases} f_1(x, u) & \text{if 条件式 1} \\ \vdots & \vdots \\ f_N(x, u) & \text{if 条件式 } N \end{cases} \quad \longrightarrow \quad \text{EGR 弁流量} \quad W_{xi} = K_{egr} A_{egr} \varphi \quad \varphi = \begin{cases} \varphi_1(p_i, p_x) & \text{if 条件式 1} \\ \vdots & \vdots \\ \varphi_4(p_i, p_x) & \text{if 条件式 4} \end{cases}$$

解決策

1. 切替関数 ρ_i を導入し、数式処理で微分方程式を1つにまとめる

$$\varphi = \begin{cases} \varphi_1(p_i, p_x) & \text{if 条件式 1} \\ \vdots & \vdots \\ \varphi_4(p_i, p_x) & \text{if 条件式 4} \end{cases}$$

sympiecewise(..)

区分的関数

$$\varphi = \sum_{i=1}^4 \rho_i(p_i, p_x) \varphi_i(p_i, p_x)$$

微分方程式

$$\dot{x} = f(x, u, \rho_1, \dots, \rho_4)$$

2. 数式処理用の 切替関数 は 任意の記号関数 とする

3. 数値計算用の 切替関数 (if-else) を自動生成する

切替関数

$$\rho_i = \begin{cases} 1, & \text{if 条件式 } i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

.m

```
切替関数
if 条件式 i
    rho_i = 1
else
    rho_i = 0
end
```

※ 数式処理では $\partial \rho_i / \partial x = 0$ かつ $\partial \rho_i / \partial u = 0$ と仮定した(不連続な切替面における理論的厳密さは考慮せず)

操作面や機能面でツールの課題はまだまだ残る. 継続的な進化が必要

ニーズ・課題

- | | |
|---|--|
| 1 | インターフェースや各ツールのリンケージ |
| 2 | カスタマイズ性 <ul style="list-style-type: none"> ・ アルゴリズム更新や内部変数モニタ ・ 中間変数が絡む目標や制約の設定 ・ 既存モデルの利用 ・ 他制御との切替 |
| 3 | 離散状態対応 <ul style="list-style-type: none"> ・ 切替や条件分岐、状態遷移など |
| 4 | マップ・テーブル対応 |
| 5 | 最適解追従の収束性 |
| 6 | ばらつき対応 |
| 7 | 要求に沿いやすい目標設定 |
| 8 | 多目的対応 |
| 9 | 分散処理 |

課題は残るが、現場に即した NMPC 設計ツールが出来つつある

改善すべき課題

- ・ オブジェクト作成のI/F
(入力情報も多く、現状やや煩雑)
- ・ MATLAB 関数コードのさらなる整理
(カスタムするしないところを意識)
- ・ エラーハンドリングのしやすさ
- ・ 例題・ドキュメントの充実

今後ツールに求められる設計・解析機能に制御理論は欠かせない. 適切にツールに反映してゆく必要がある

継続的な
改善へ

活動を通じて実感した NMPC の難しさ

不安定化や制約違反したときの「原因の切り分け」や「調整」に時間を要することがある

- 制御系が不安定化(最適解の追従が困難)する要因は様々考えられる

- a. 目的関数の重み、終端コスト
- b. C/GMRES 法パラメータ
- c. サンプリング時間(予測/制御)の刻み幅
- d. 数値積分ソルバーの精度(コントローラ内部/シミュレーション)
- e. コントローラ初期値
- f. モデルや最適性必要条件(連立方程式)の近似精度

活用拡大に向けて
適切なアプローチを
見出したい

ツールの課題とも連動

5 最適解追従の収束性

7 要求に沿いやすい目標設定

- 制約条件境界を飛び越えてしまうことがある

- 最適解への追従性がよくない場合
- 制約条件境界は数値計算的に不安定な領域のため、境界を飛び越えない調整が必要(例:目的関数のダミー変数やバリア関数の重み)

内容

- 活動背景
- ツールコンセプト
- 例題
- **まとめ**

NMPC 活用拡大に向けて共に挑戦しませんか？

NMPC 活用拡大に向けた取り組み

- 産業界で使える NMPC 設計ツールの開発を進めている
- NMPC は高い潜在能力を示している
- 課題は多く残るが、現場に即した NMPC 設計ツールが出来つつある

今後の制御技術の発展には、一人でも多くの仲間が必要です

- NMPC ・ 最適制御技術に挑戦しませんか？
- 研究機関・企業・ベンダーで協調しませんか？

今後の技術発展に向け、研究機関・企業・ベンダーで協調しませんか？

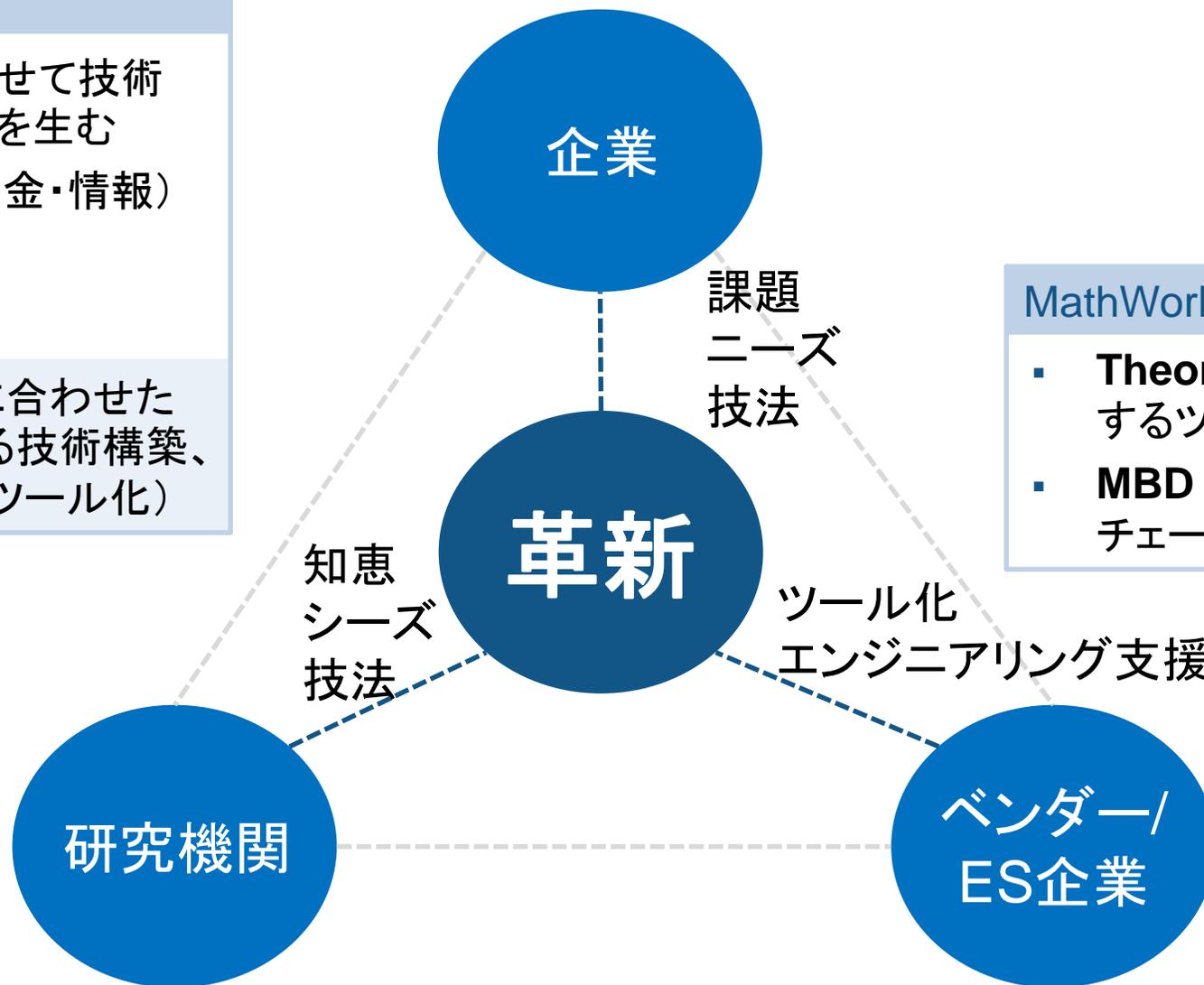
協調する目的

- 互いの強みを掛け合わせて技術課題に立ち向かい革新を生む
- 不足する資源(人・モノ・金・情報)の中で世界と戦う

技術開発:

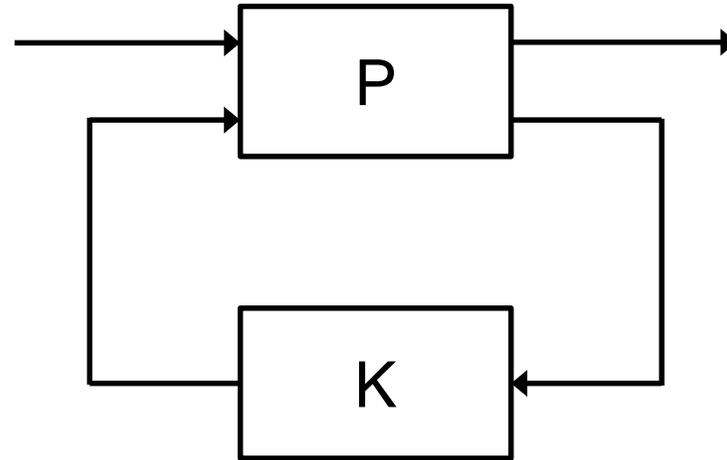


実用的な目的や制御対象に合わせた高度な制御理論・手法による技術構築、定着化のための環境構築(ツール化)



MathWorks の例

- Theory と Engineering** を橋渡しするツール(数的手段)を提供
- MBD** を支援する開発環境/ツールチェーンを提供



Create a Better Future with Control

Daisuke.Akasaka@mathworks.co.jp

© 2018 The MathWorks, Inc. MATLAB and Simulink are registered trademarks of The MathWorks, Inc. See www.mathworks.com/trademarks for a list of additional trademarks. Other product or brand names may be trademarks or registered trademarks of their respective holders.