

# 車両システムシミュレーションのための、ディープラーニング によるサロゲートモデリング

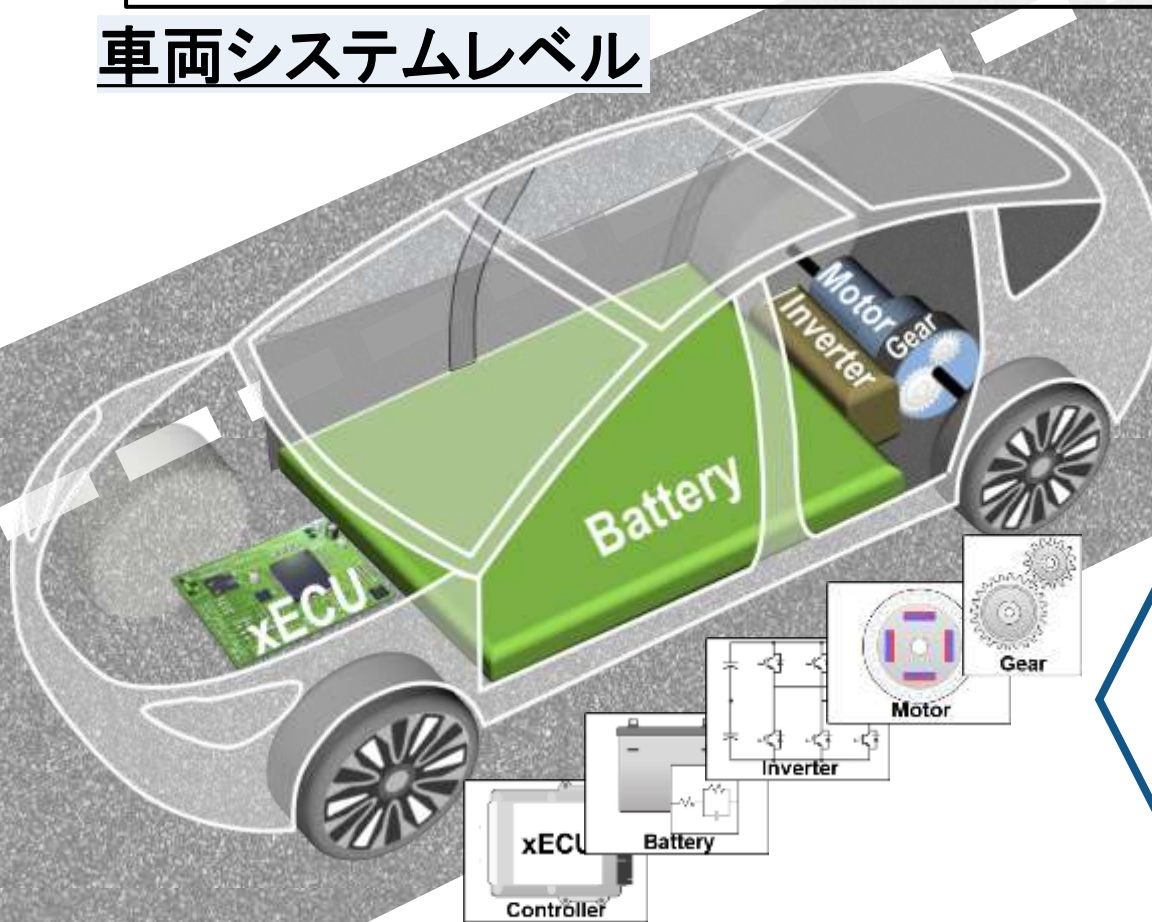
マスワークスジャパン  
アプリケーションエンジニアリング部

# はじめに 車両システムレベルシミュレーションへのモチベーション

車両システムレベルシミュレーションにより、以下が可能となります。

- ・コンポーネント性能向上がもたらす **車体全体への効果検証**
- ・車体全体から見た **コンポーネントへの要求**の確認

## 車両システムレベル



### コンポーネントへの要求

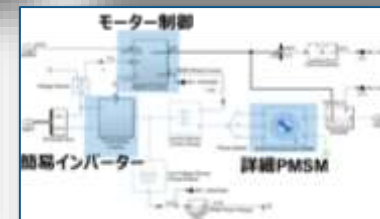
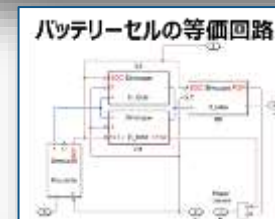
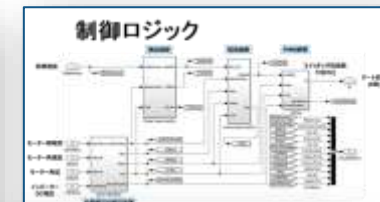
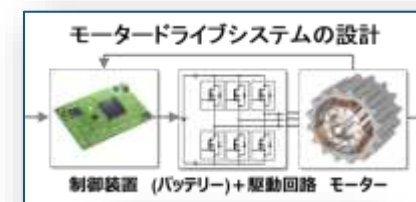
- ・出力
- ・効率
- ・重量
- ・レスポンス
- ・耐性 ...etc.

**双方向での  
検証が必要**

### 車両全体での効果検証

- ・電費・エネマネ
- ・駆動系振動
- ・熱マネ
- ・ドライバビリティ
- ・走行性能 ...etc.

## コンポーネントレベル(例:電動化)



車両全体システムシミュレーションの有用性は分かっているが、、、

担当コンポーネントのモデル以外がない

異なるツールのモデルが繋がらない



シミュレーション大規模化

計算コスト増

- 課題解決のソリューションとして以下を紹介させていただきます。

① システムレベルモデルの構築

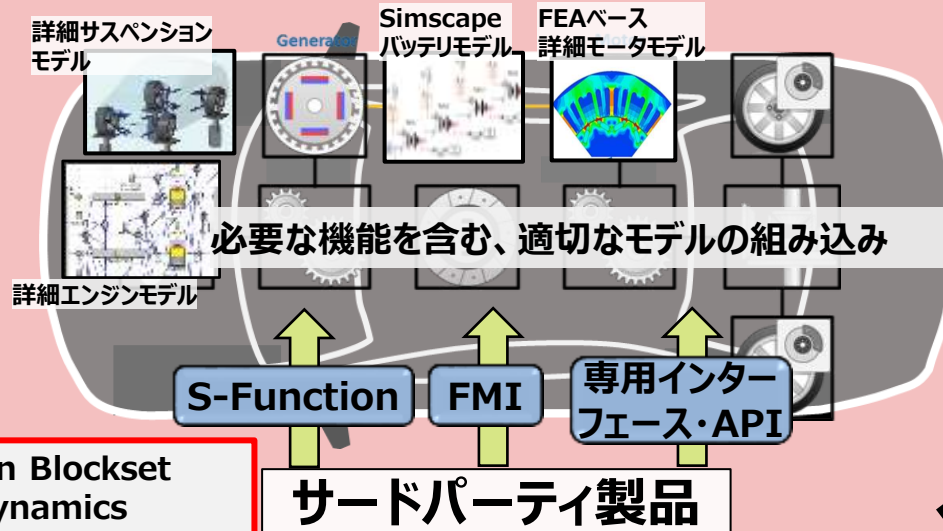
② シミュレーション負荷の低減(回数低減) ⇒サロゲートモデルの利用

③ マルチプロセッサへの分散・並列実行

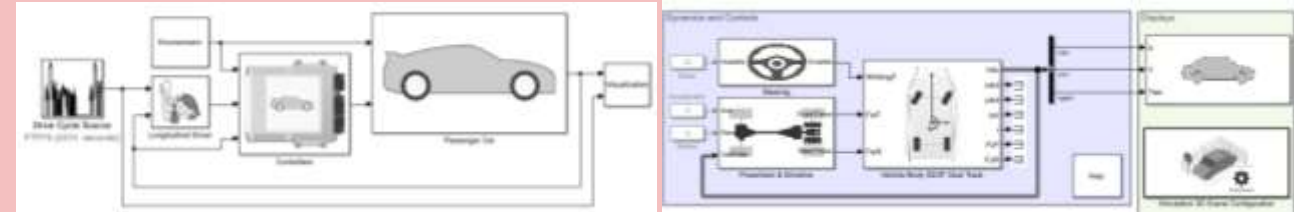


# 車両システムレベルシミュレーション環境

## ① 車両システムレベル、連成シミュレーションモデルの構築



- Powertrain Blockset
- Vehicle Dynamics Blockset
- Simscape系



Simulink (e.g., PTBS : Powertrain Blockset, VDBS : Vehicle Dynamics Blockset) によるシミュレーション枠組みを用意

## ③ シミュレーションの並列実行



- 最適化関連製品
- Parallel Computing Toolbox
- Parallel Server

## ② 次数低減(Reduced Order Modeling)



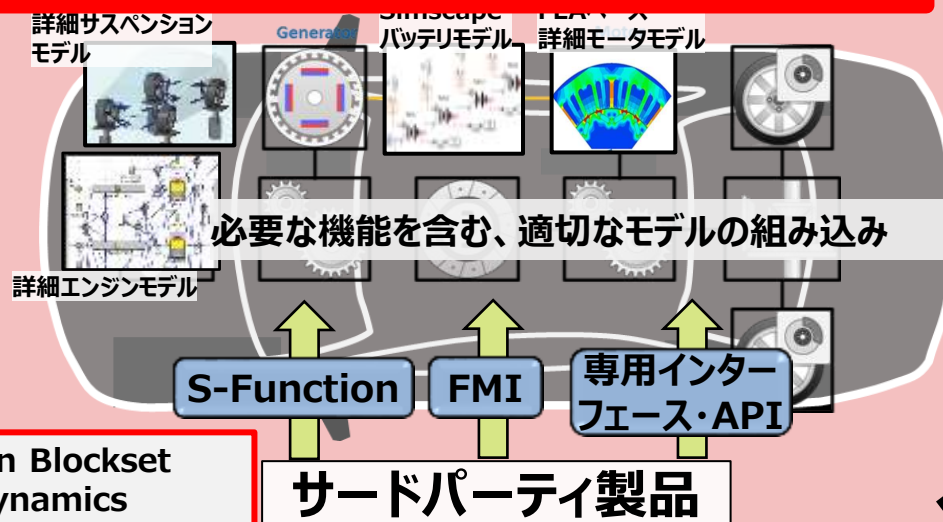
負荷が高い

シミュレーション

- MBC Toolbox
- Statistical & Machine Learning Toolbox
- Deep Learning Toolbox

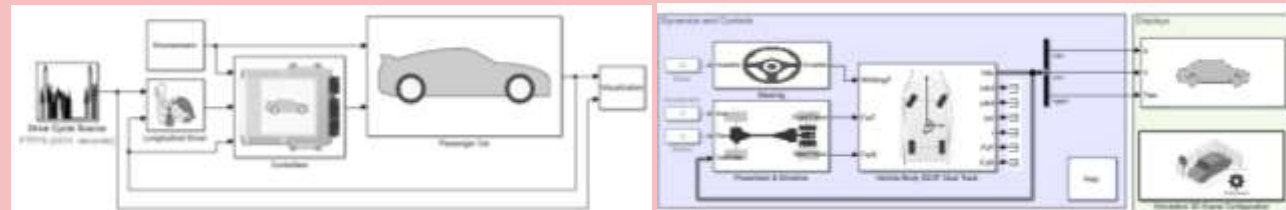
# 車両システムレベルシミュレーション環境

## ① 車両システムレベル、連成シミュレーションモデルの構築



- Powertrain Blockset
- Vehicle Dynamics Blockset
- Simscape系

## ③ シミュレーションの並列実行



Simulink (e.g., PTBS : Powertrain Blockset, VDBS : Vehicle Dynamics Blockset) によるシミュレーション枠組みを用意

## ② 次数低減(Reduced Order Modeling)



負荷が高い

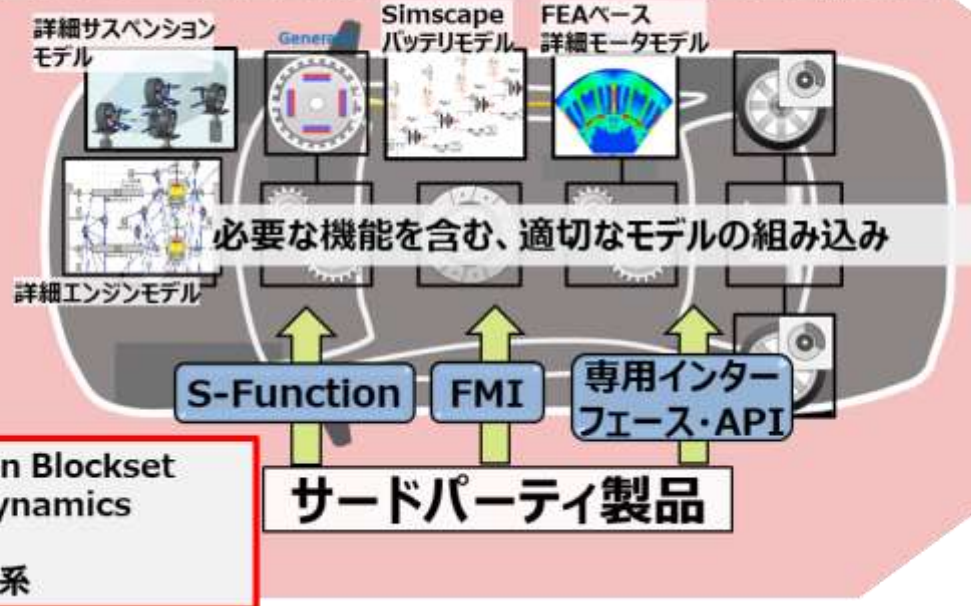
シミュレーション

- MBC Toolbox
- Statistical & Machine Learning Toolbox
- Deep Learning Toolbox

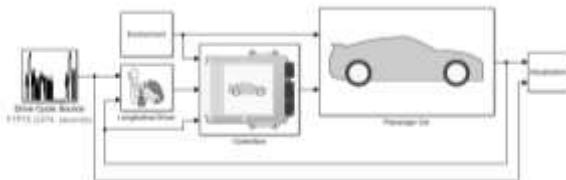
- 最適化関連製品
- Parallel Computing Toolbox
- Parallel Server

# ①車両システムレベル、連成シミュレーションの構築

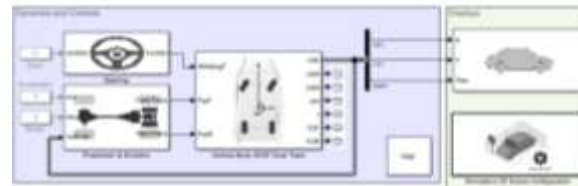
## ①車両システムレベル、連成シミュレーションモデルの構築



Simulink環境によるシミュレーション枠組みを用意



PTBS(Powertrain Blockset)



VDBS(Vehicle Dynamics Blockset)

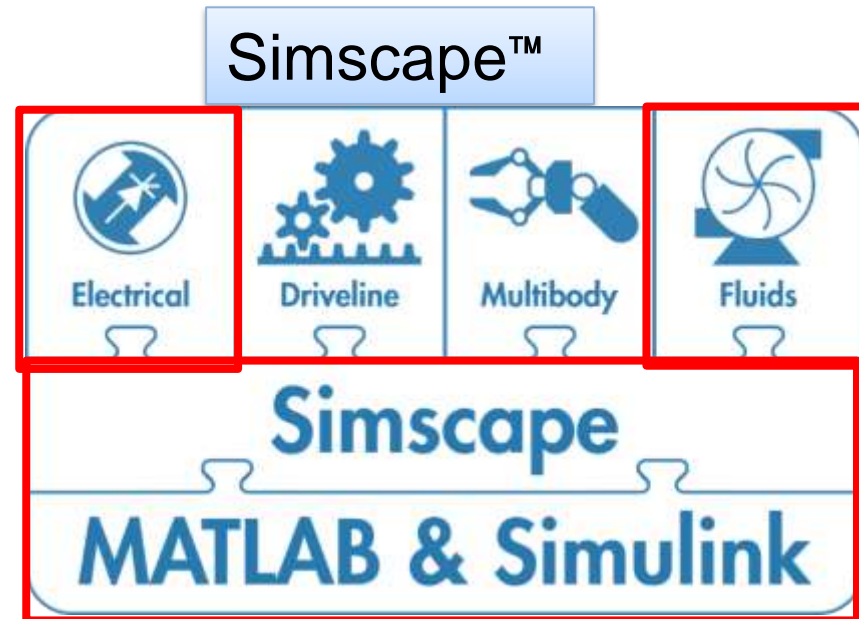
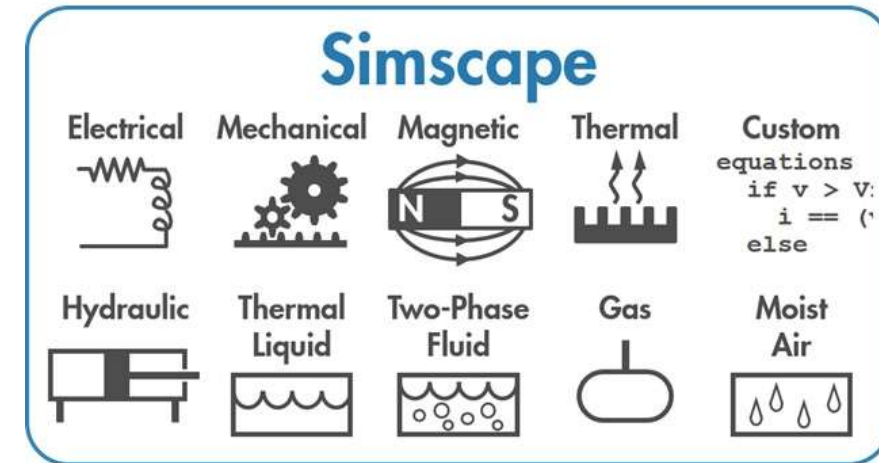
- 自動車制御設計において、MBD(Model-Based Design)の手法が広く利用されている。
- 各制御設計で使用する各コンポーネントモデルはすでに利用されている場合が多い。
- 多くのコンポーネントモデルは以下で用意されている
  - Simulink(シミュレーションようモデリング環境)
  - Simscape(弊社物理モデリングツール)
  - サードパーティ製モデリングツール
- サードパーティ製モデルとの接続はS-Function, FMI, 専用インターフェース・API等で実現されている。
 

※FMI:Functional mockup Interface。様々なツール間を接続するために策定された標準インターフェース仕様
- システムレベルシミュレーションにおいて、目的に応じて、求められる詳細度が異なる。
  - バリエーションサブシステムによる、使用モデルの切替



## ①車両システムレベル、連成シミュレーションの構築 例)冷却を考慮したバッテリーモデル

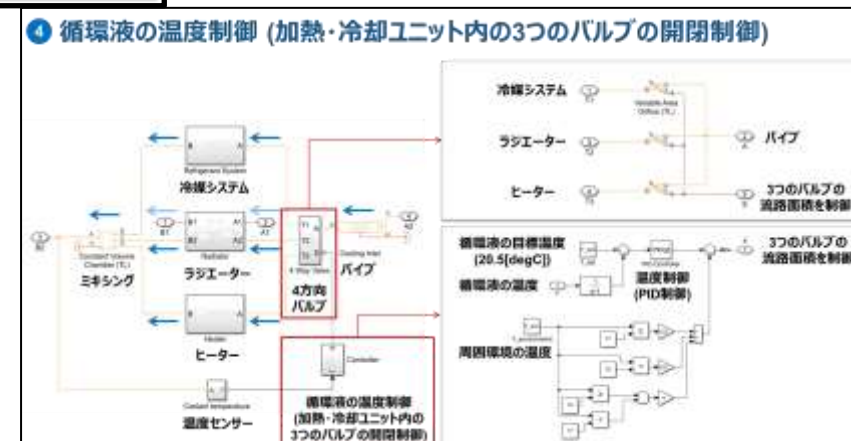
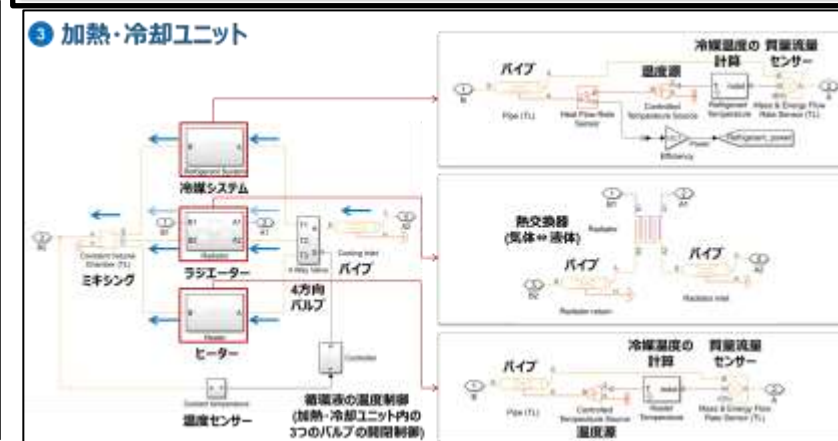
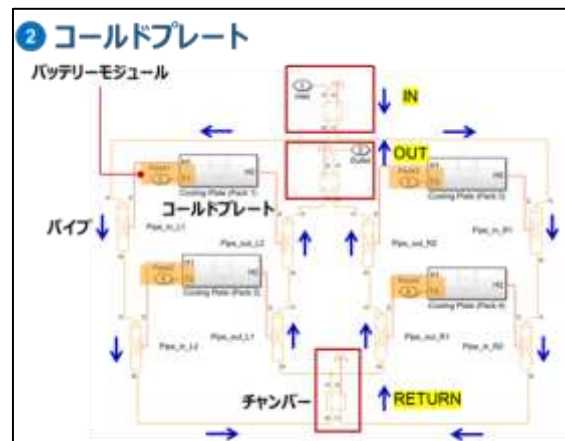
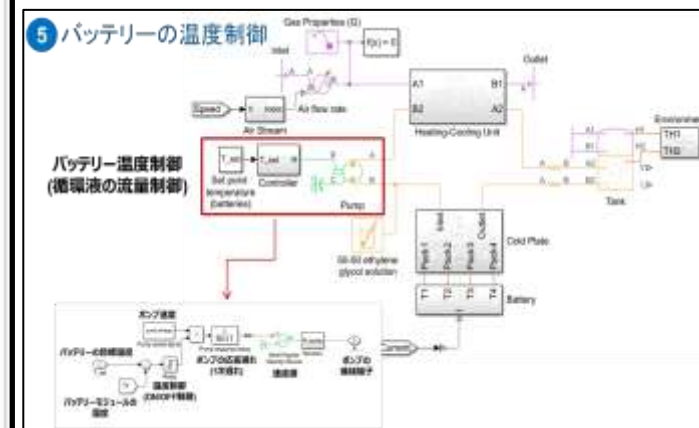
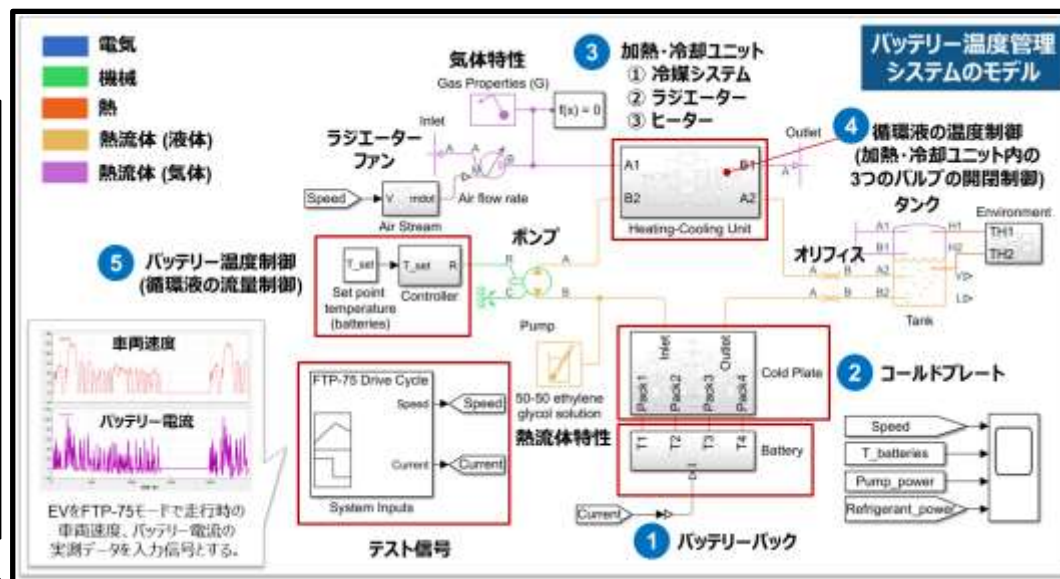
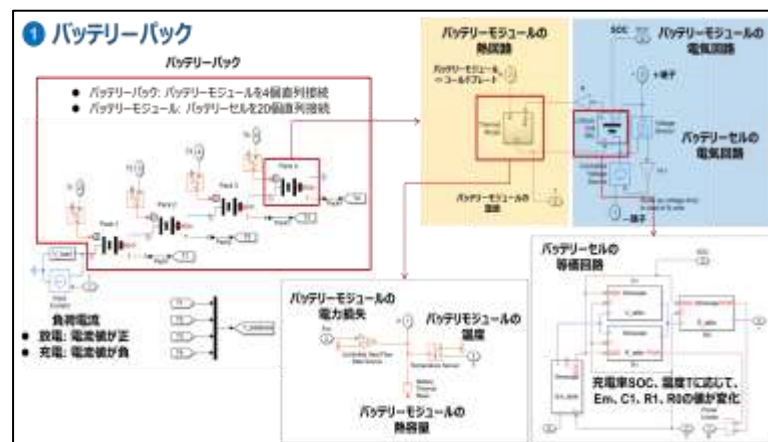
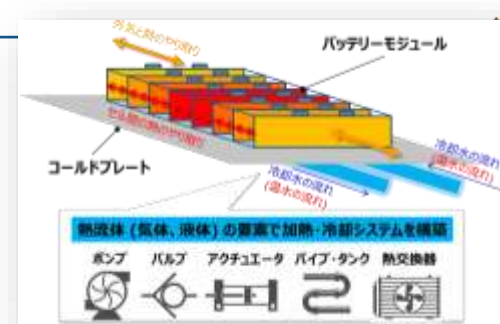
- 今後の電動化において、電動コンポーネントの冷却の検討は必須
- 弊社の物理モデリング環境やサードパーティ製物理モデリングツール利用
- 弊社の物理モデリングツール Simscape系のサンプルモデルとしても用意
  - [EV Battery Cooling System](#)



個別の物理モデルを自由に構築できる<sub>7</sub>

# ①車両システムレベル、連成シミュレーションの構築 例)冷却を考慮したバッテリーモデル

例)バッテリーの性能低下や劣化を防ぐための温度管理システム設計例(Simulink, Simscape系製品を利用)



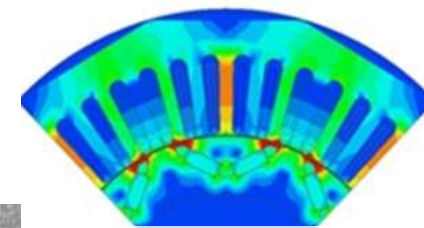




# ①車両システムレベルシミュレーションの構築 既存モデルを接続し環境構築

詳細バッテリーモデル

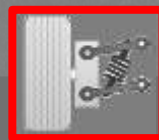
EV Battery  
Cooling System



FEAベース  
詳細モーターモデル

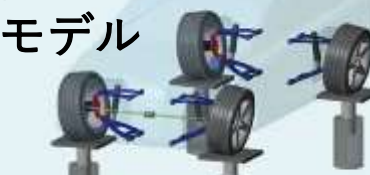
CAEエンジンモデル  
詳細エンジンモデル

エンジン



サスペンション

詳細サスペンション  
モデル



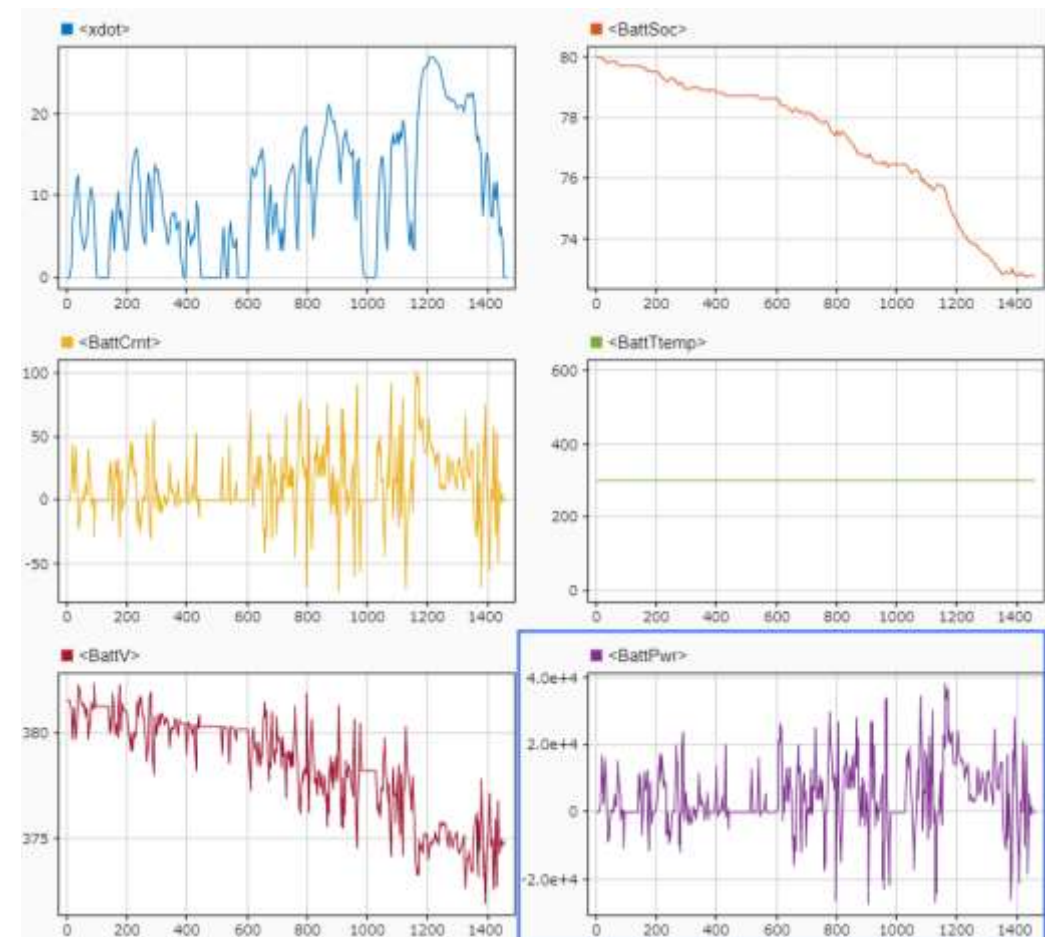
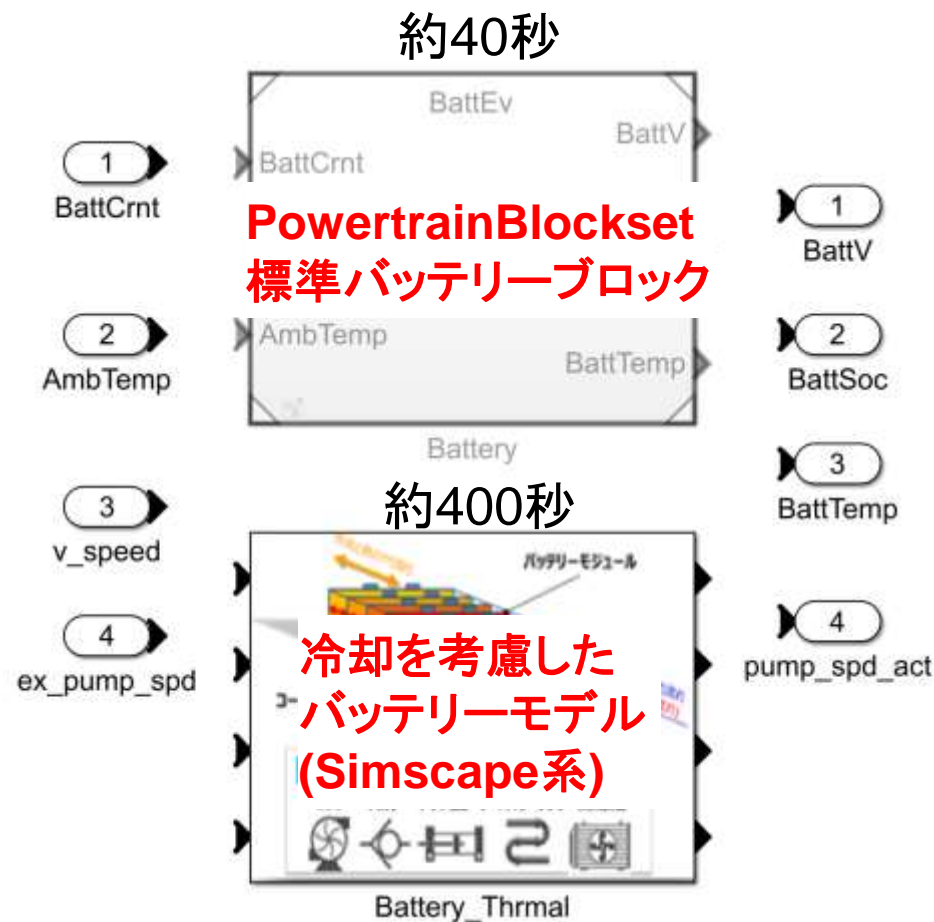
Simscape Multibody

既存コンポーネントモデルを接続した  
シミュレーション環境では  
負荷の重いモデルになってしまう。

# ①車両システムレベル、連成シミュレーションの構築

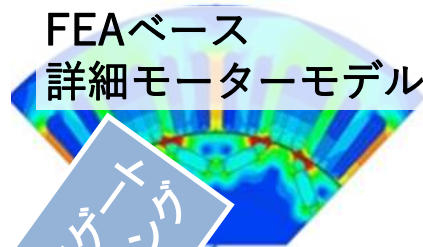
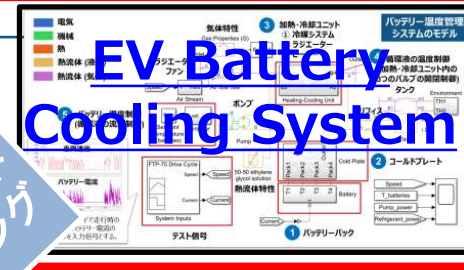
## 簡易モデル＝>詳細モデル

- 各バリエーションでのシミュレーション時間（走行モードの時間1460秒）





## ② 次数低減(Reduced Order Modeling)



サロゲート  
モデリング

サロゲート  
モデリング

MAPベース  
統計モデルベース  
モーターモデル

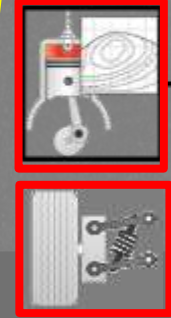


サロゲート  
モデリング

MAPベース  
統計モデルベース  
エンジンモデル



エンジン



サスペンション

サロゲートモデル(代替えモデル)利用に  
よる、シミュレーション負荷低減が必要

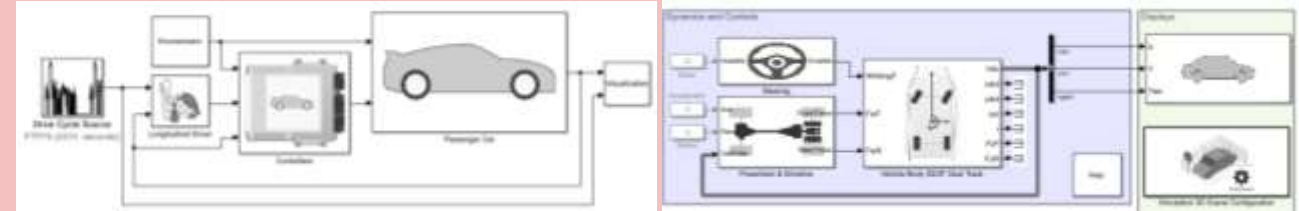
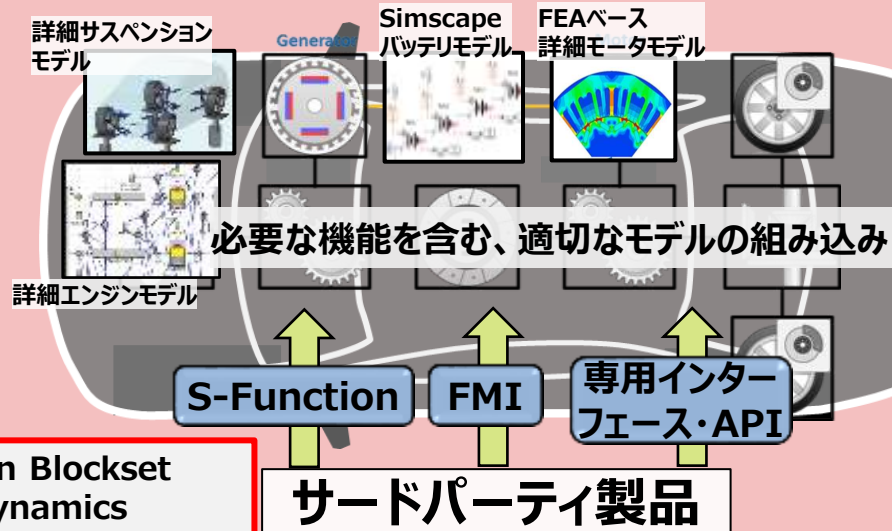
MAPベース  
サスペンション  
モデル

サロゲート  
モデリング



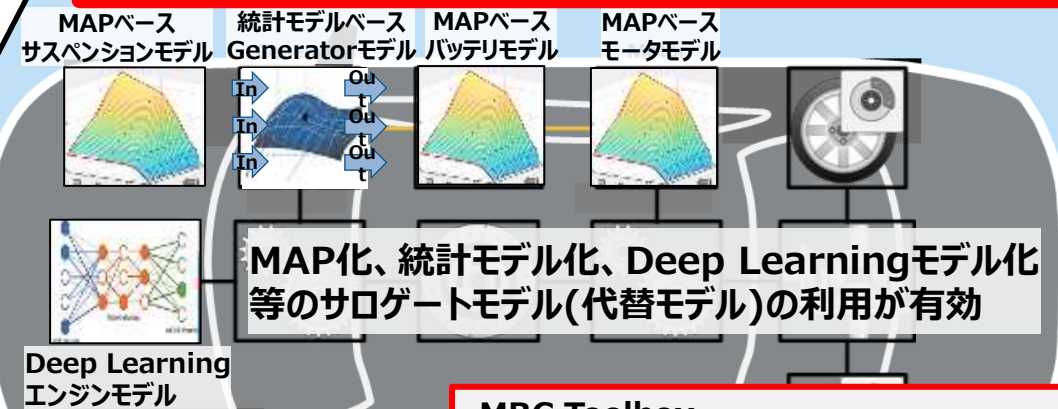
## ② 次数低減(Reduced Order Modeling)

### ① 車両システムレベル、連成ミュレーションモデルの構築



Simulink (e.g., PTBS : Powertrain Blockset, VDBS : Vehicle Dynamics Blockset) によるシミュレーション枠組みを用意

### ② 次数低減(Reduced Order Modeling)



負荷が高い

シミュレーション

### ③ シミュレーションの並列実行



- 最適化関連製品
- Parallel Computing Toolbox
- Parallel Server

- MBC Toolbox
- Statistical & Machine Learning Toolbox
- Deep Learning Toolbox

# 詳細物理モデルのサロゲートモデリング 次数低減(Reduced Order Modeling)

- 詳細物理モデルに対して以下のサロゲートモデル  
 (代替モデル)を作成しシミュレーション負荷低減へ

## モデルタイプ

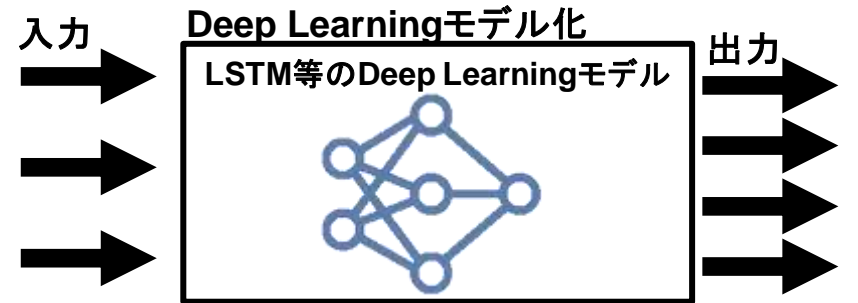
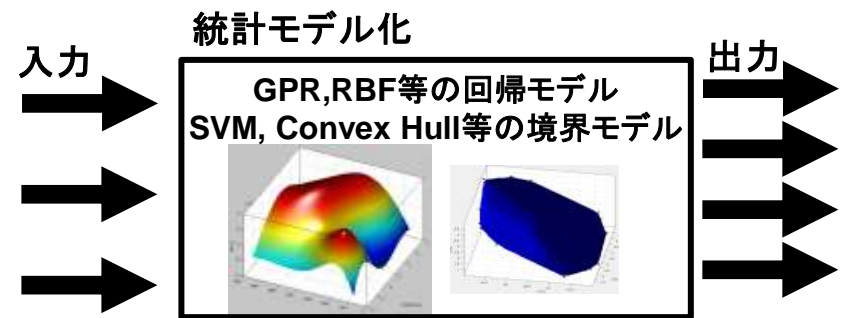
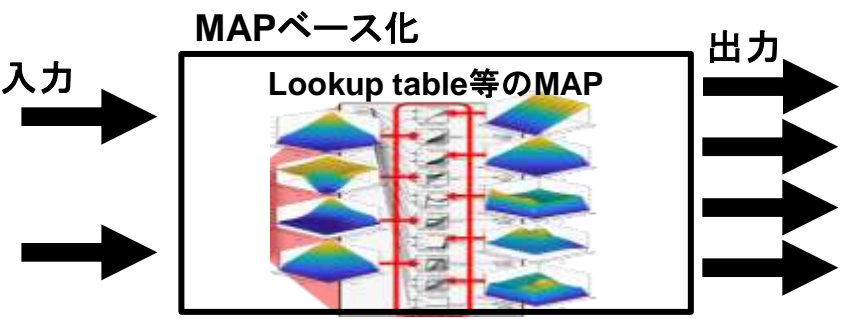
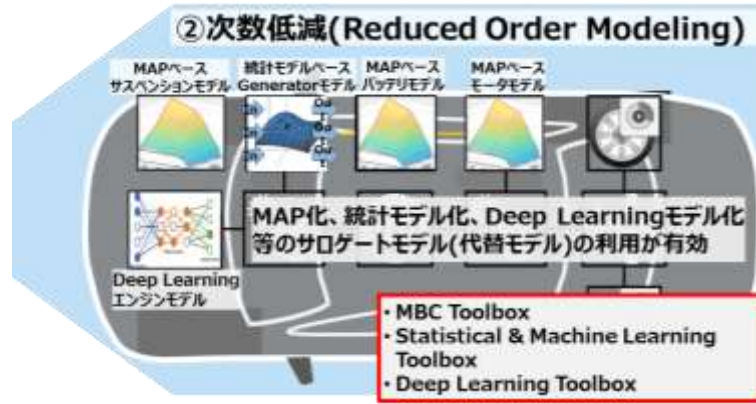
⇒ 定常モデル

- MAPベース化
- 統計モデル化

⇒ 過渡モデル

- Deep Learningモデル化(例:LSTMの利用)

- Simulink上で既存の詳細モデルに対して仮想試験  
 を行い上記モデルに必要なデータを取得。



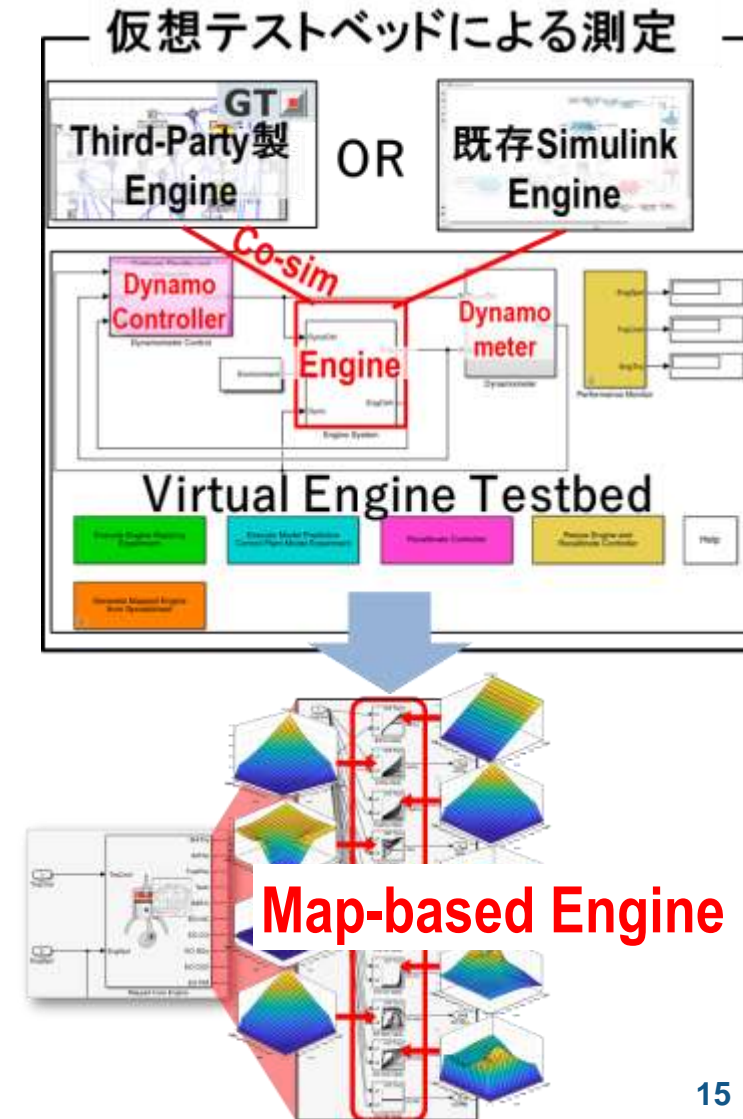


## ②次数低減(Reduced Order Modeling) MAPベースモデル化

- 仮想試験で既存モデル(詳細SimulinkモデルまたはThird-Party製モデル)からMAPに必要なデータを取得しMAP化

### 以下エンジンの例として

- Powertrain Blocksetのリファレンスアプリケーション“仮想テストベッド”上で仮想試験・測定を実施可能
  - ⇒Third-Party製モデルはCo-Simulationによる接続
  - ⇒仮想テストベッド上シミュレーションでの測定結果をベースに各種マップ・テーブルの作成
  - ⇒EngineSpeed、負荷を2入力としたエンジンモデルを作成



## ② 次数低減(Reduced Order Modeling) MAPベースモデル化: 例GT-POWERモデルからマップ生成のワークフロー

GT-POWERモデルに  
インターフェースを追加



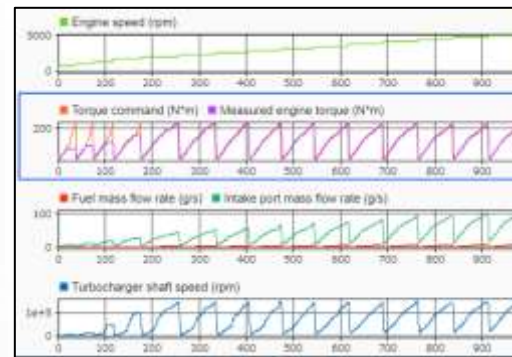
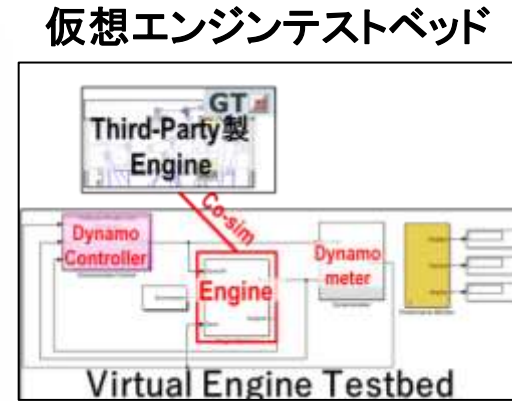
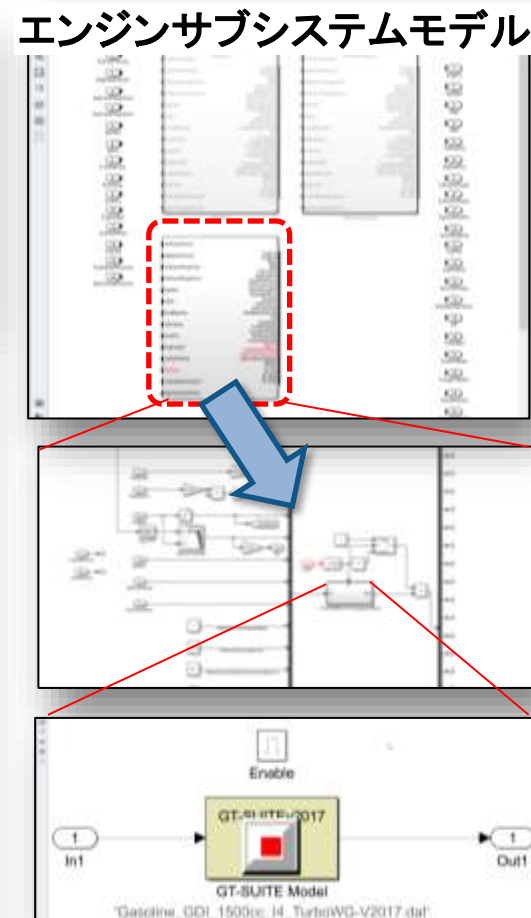
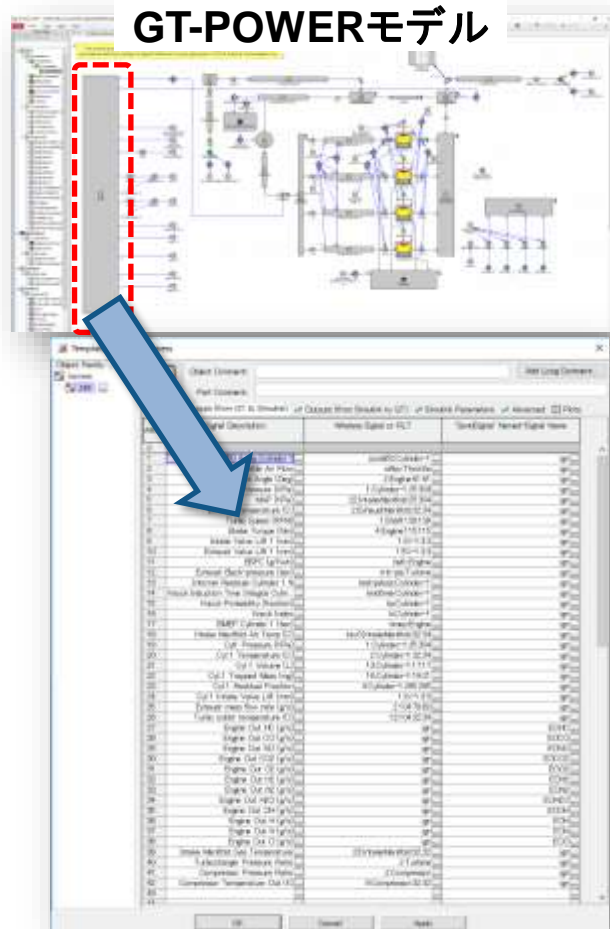
Simulinkモデルの  
インターフェースを整理



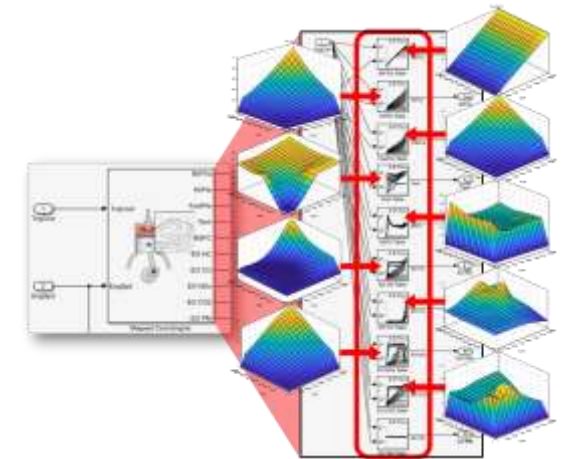
Co-Simulationによる  
仮想試験の実行



シミュレーションモデルを更新



マップベースエンジンモデル

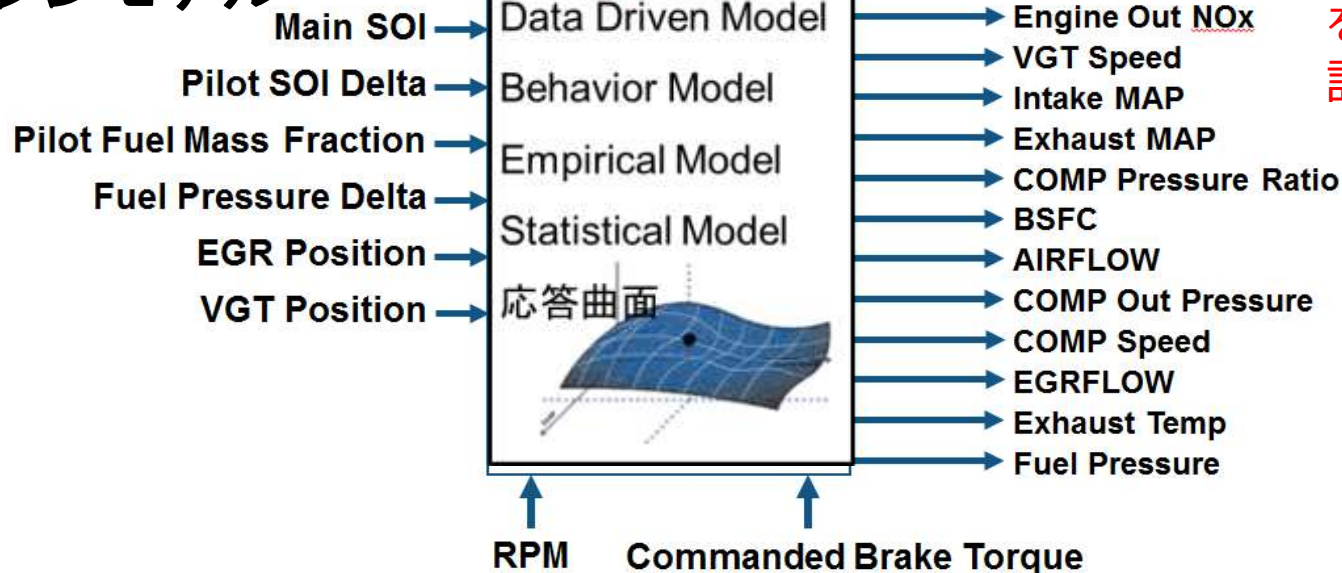


## ②次数低減(Reduced Order Modeling) 統計モデル化

- エンジンの例として、制御検討などを目的としたエンジンモデルの場合、先の2入力エンジンでは機能が不十分  
⇒Model-Based Calibrationアプローチによる、統計エンジンモデルの作成・適用が必要となる

### Model

Multi-Injection Diesel Calibrationの例  
多入力エンジンモデル



Model-Based Calibration Toolbox  
を利用し多入力・多出力の関係を統計学的(Model)に表現する



## ② 次数低減(Reduced Order Modeling) 統計モデル化: 統計モデル生成のワークフロー

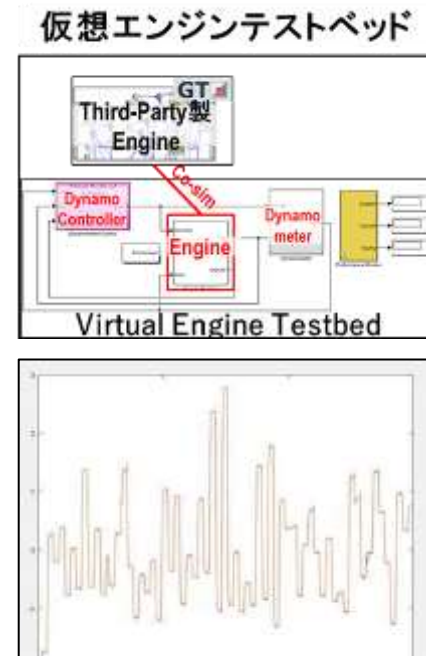
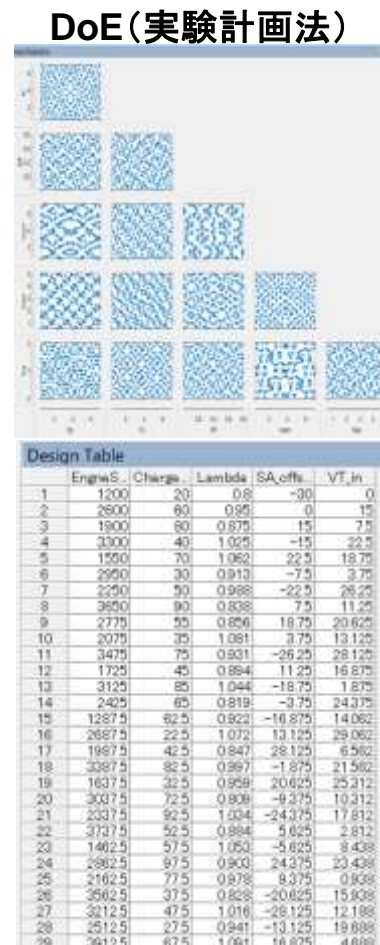
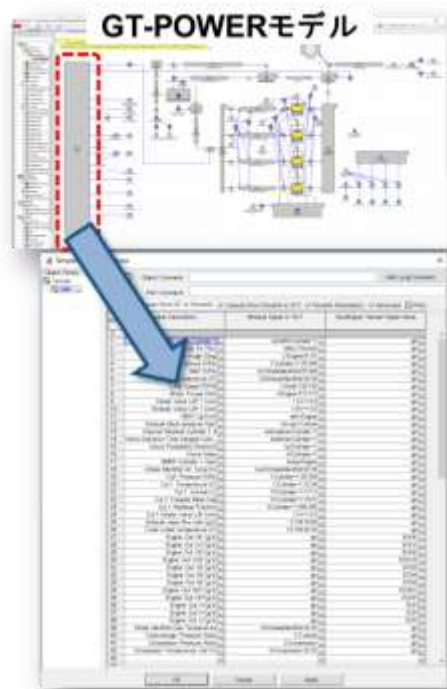
GT-POWERモデルに  
インターフェースを追加

Simulinkモデルの  
インターフェースを整理

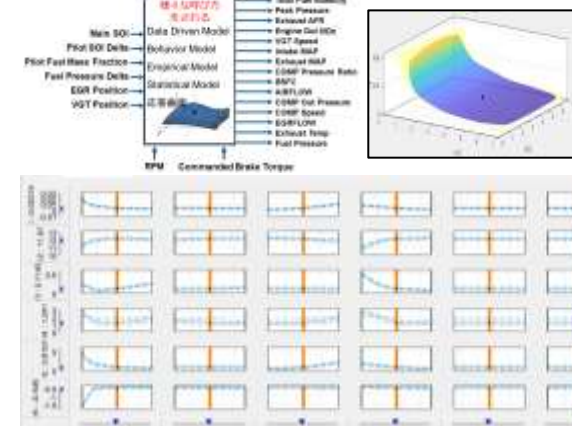
DoEによる  
入力変数の設計

Co-Simulationによる  
仮想試験の実行

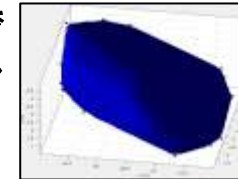
統計モデルの作成と  
シミュレーションモデルの更新



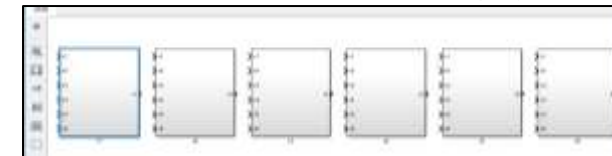
機械学習回帰モデル作成



Convex hull(凸包)で  
定義される境界モデル



回帰モデル・境界モデルをSimulink  
シミュレーションモデルとして設定



## ②次数低減(Reduced Order Modeling) Deep Learning(深層学習)モデル化

- Deep Learning(深層学習)によるサロゲートモデル(代替モデル)の作成
  - 例) 時系列向け再帰的ネットワーク(RNN)の一つである、LSTM(Long Short-Term Memory)を利用
- 適用にはDeep Learning実行環境が必要
  - Deep Learning Toolbox
    - Deep Network Designer などによりLSTMネットワークを構築
    - Experiment Manager:本格的なDeep Learningモデルの作成には多くのTry&Errorを必要とします。それらの履歴を記録・比較可能
- お客様での実際の適用においては、深層学習等のスキルが必要となります。是非、弊社トレーニング、コンサルティングによるサポートをさせていただければと思います。

Deep Network Designer



Experiment Manager



ディープラーニング試験を作成して、さまざまな条件下でネットワークをトレーニングし、結果を比較できます。トレーニングプロットや混同行列などの視覚化ツール、実験結果を絞り込むためのフィルター、結果を評価するためのカスタム指標を定義する機能を提供します 19

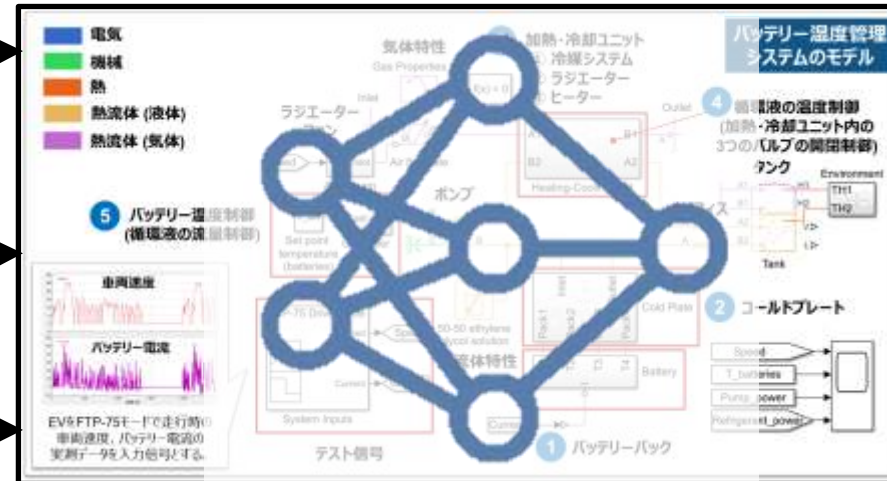
## ②次数低減(Reduced Order Modeling)

### Deep Learning(深層学習)モデル化: 冷却を考慮したバッテリーモデル

電流

車速

冷却ポンプ回転数



SOC

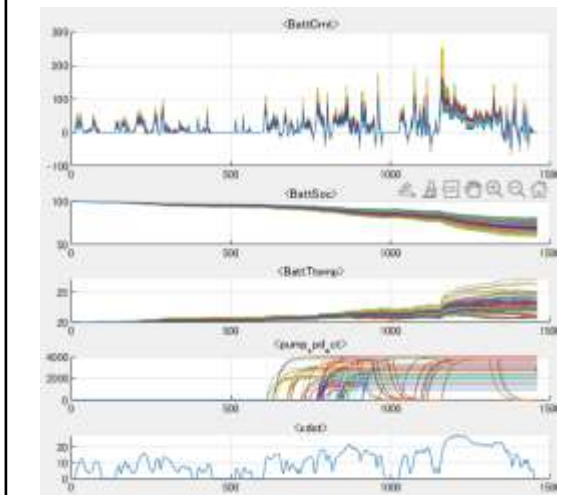
電圧

バッテリーセル温度



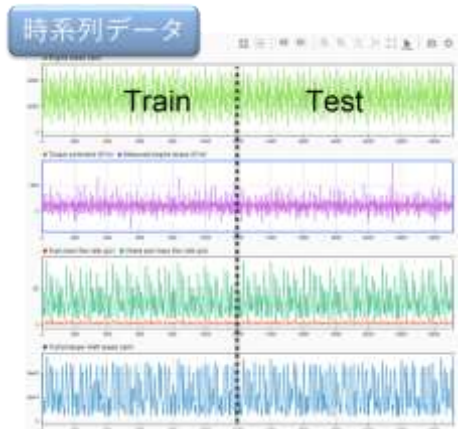
冷却を考慮した  
バッテリーモデル  
(Simscape系)

仮想試験環境におけるデータ測定



Simulink上で学習データ測定のための仮想試験を実施

結果をディープラーニングで学習

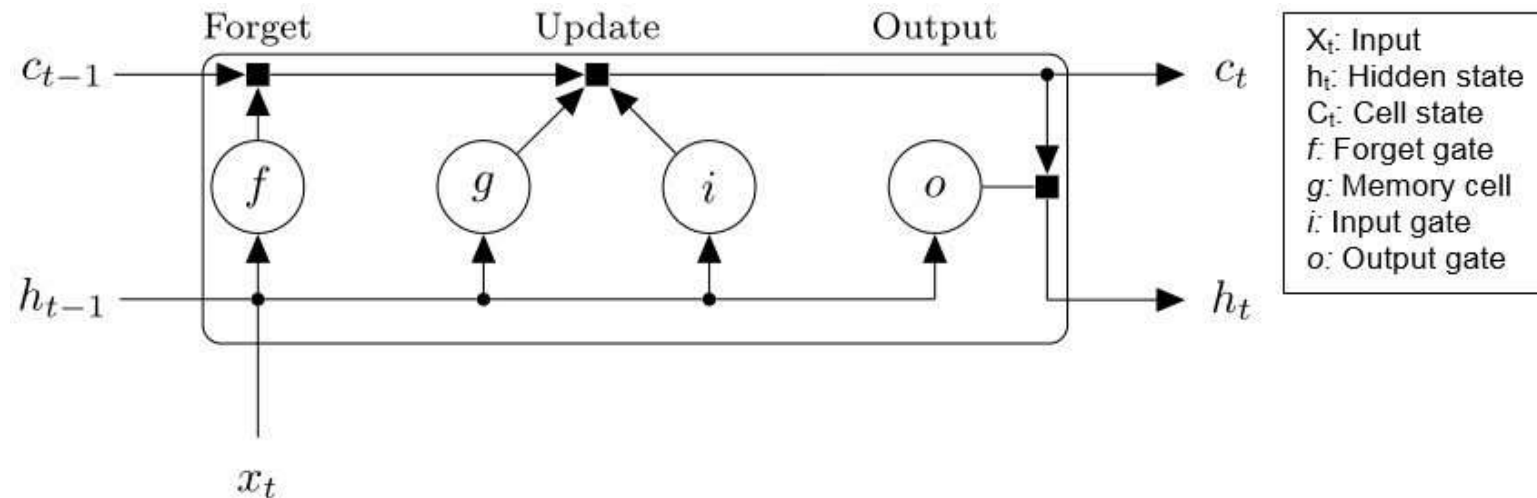




## ②次数低減(Reduced Order Modeling)

LSTM(長・短期記憶)とは <https://jp.mathworks.com/discovery/lstm.html>

- LSTM (Long Short-Term Memory: 長・短期記憶) ネットワークは、RNN (再帰型 [ニューラル ネットワーク](#)) の一種です。
- LSTM の強みは、時系列データの学習や予測 (回帰・分類) にあります。
- LSTMネットワークは、ゲートを用いて、関連する情報を選択的に保持し、関連しない情報を忘却することで、勾配消失問題 (バニシング・グラジエント) の問題を解決します。時間差に対する感度が低いため、LSTMネットワークは単純なRNNよりも時系列データの解析に適しています。

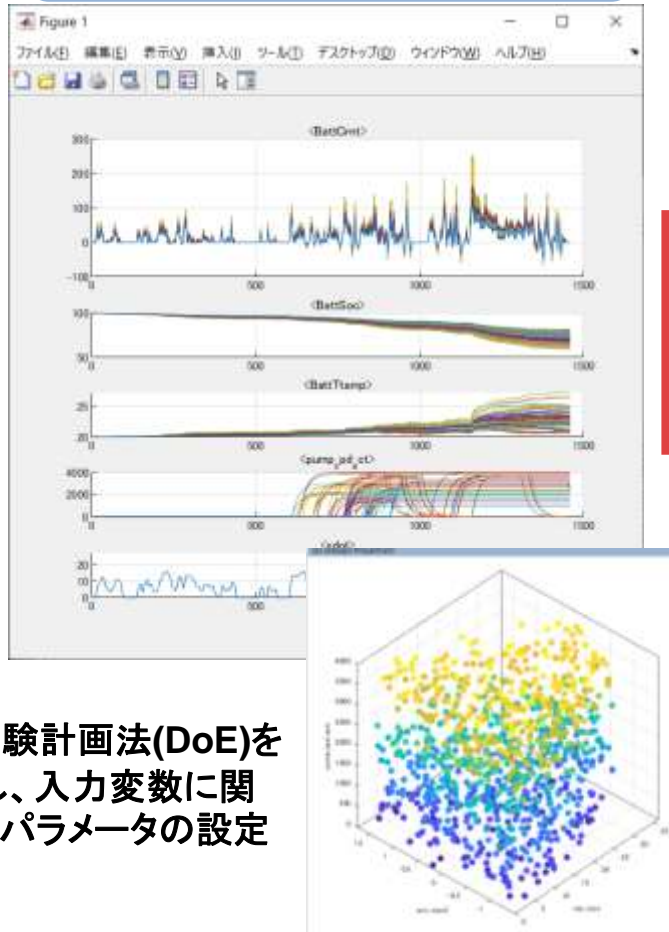


## ②次数低減(Reduced Order Modeling) Deep Learning(深層学習)モデル化: 冷却を考慮したバッテリーモデル

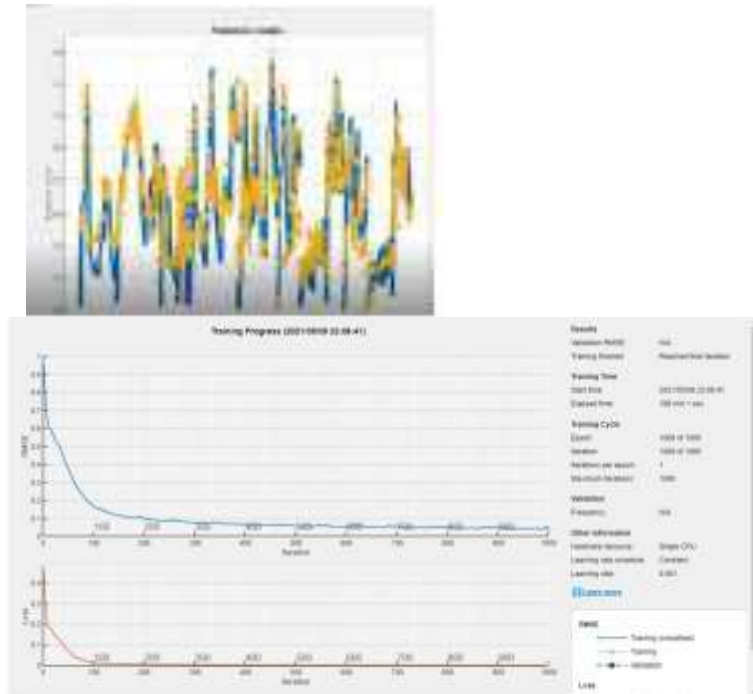
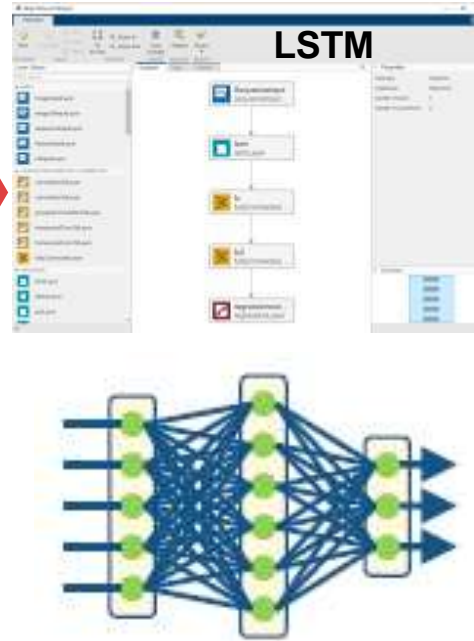
①仮想試験の実施  
⇒学習データの取得

②DNNの検討  
⇒ネットワークを学習

③学習状況の評価  
⇒学習済みネットワークでの推論と評価



ディープネットワークデザイナーで  
DNNを作成



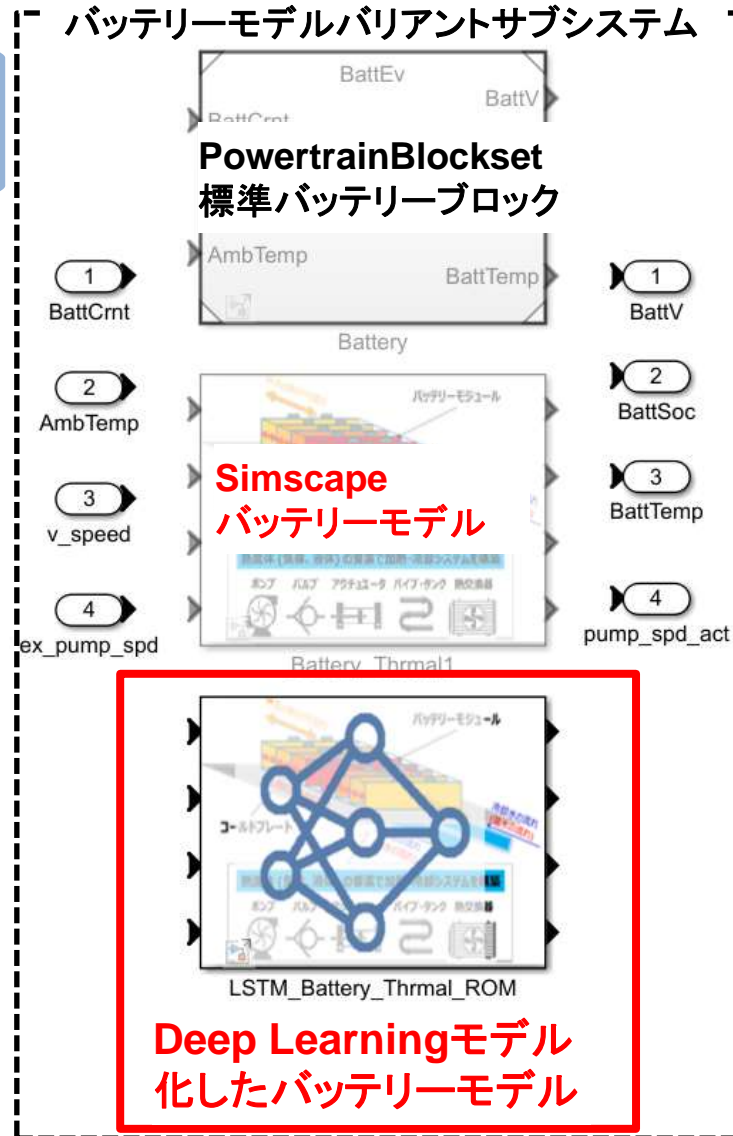
※推論: 学習済みのネットワークで予測すること

## ② 次数低減(Reduced Order Modeling)

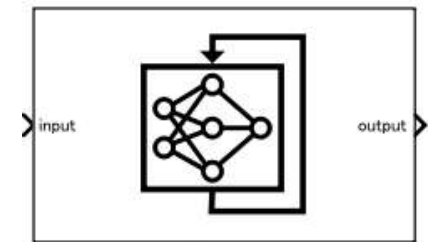
### Deep Learning (深層学習)モデル化: 冷却を考慮したバッテリーモデル

④ 学習済みのネットワークを  
Simulinkブロックとして配置

Deep Learning Toolboxが用意する、“Stateful Predict block”を使用し、学習済みモデルをSimulink上のシミュレーションに利用可能。



Stateful Predict block **R2021a**



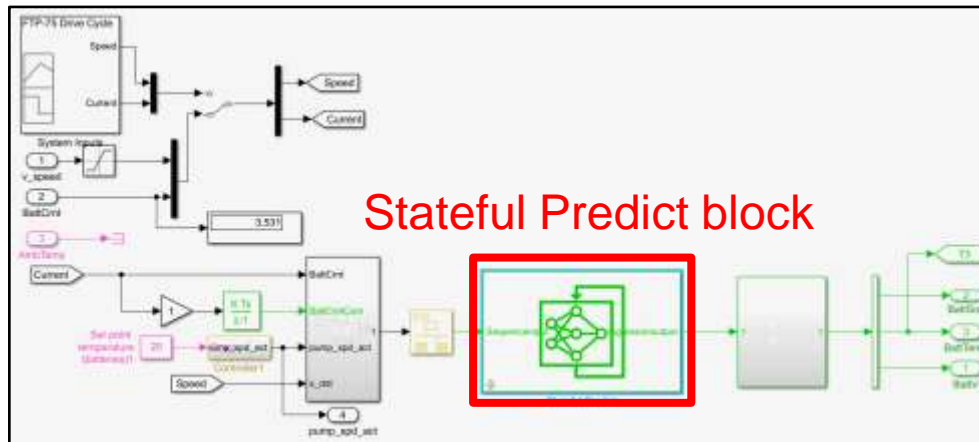
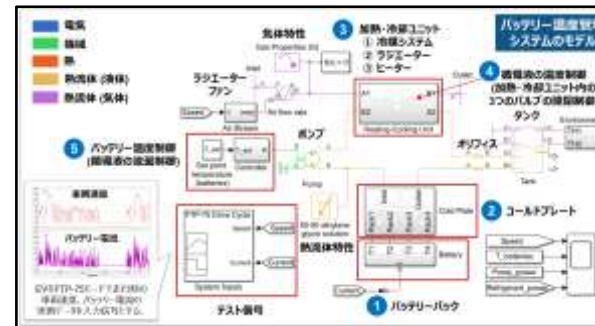
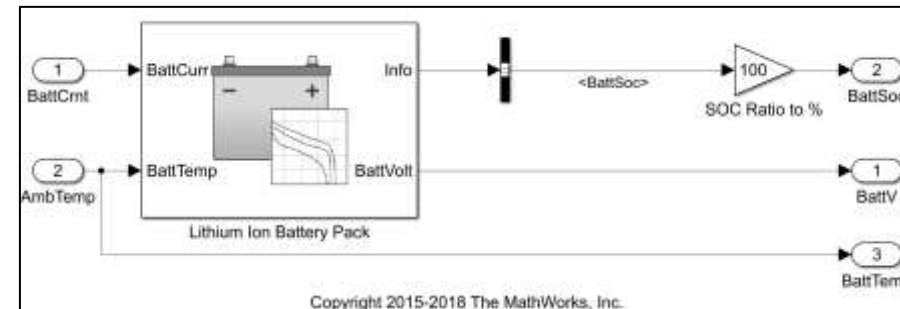
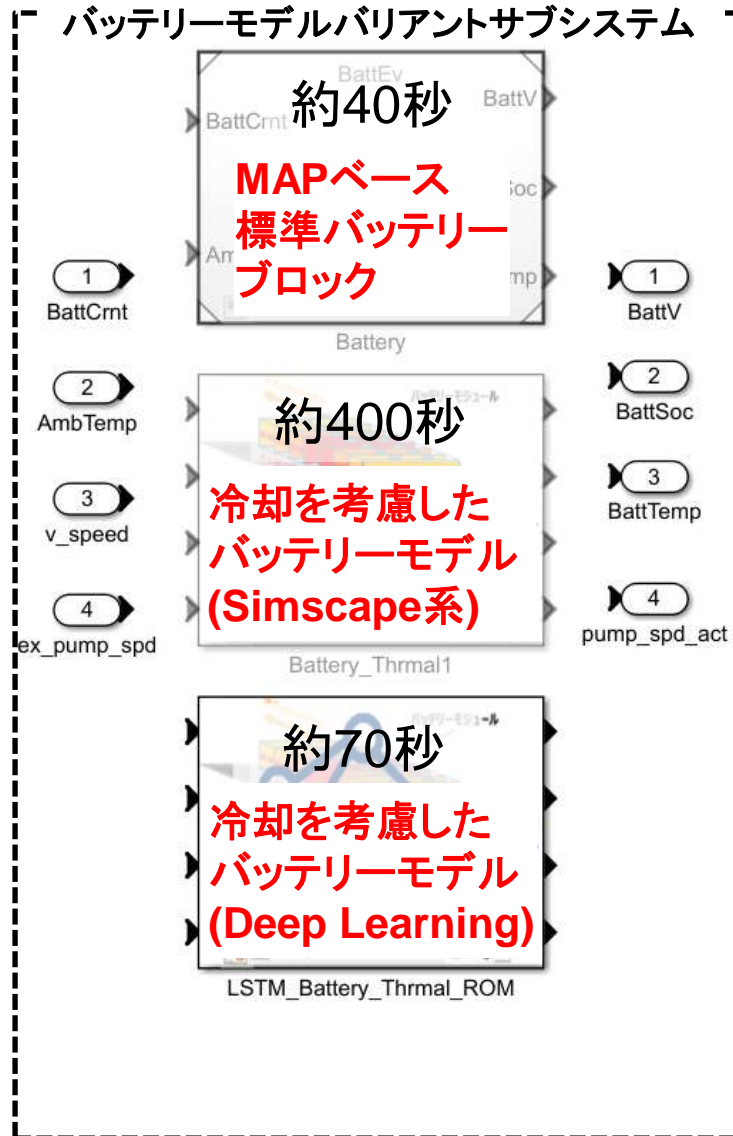
Stateful Predict

学習済みの再帰型ニューラル ネットワークを使用してInputに対する応答を予測します。  
学習済みのネットワークは、MAT ファイルまたは MATLAB 関数からインポートできます。

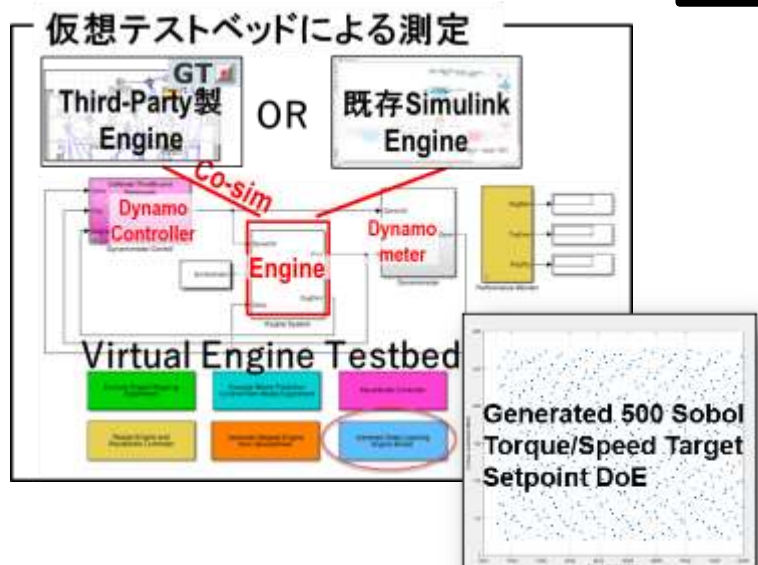
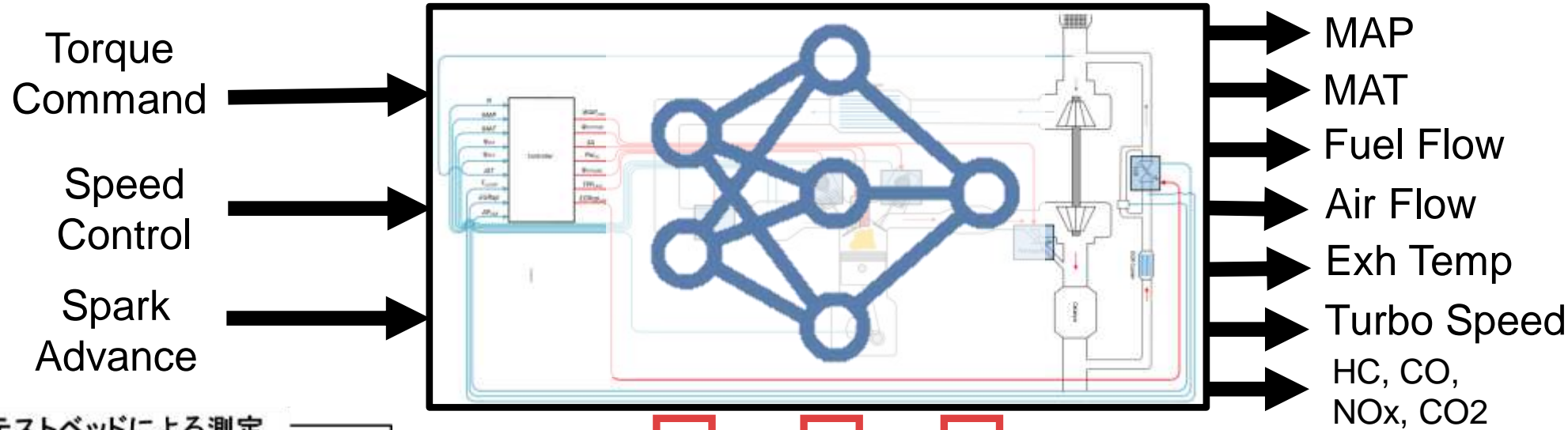


## ② 次数低減(Reduced Order Modeling)

### Deep Learning(深層学習)モデル化: 冷却を考慮したバッテリーモデル

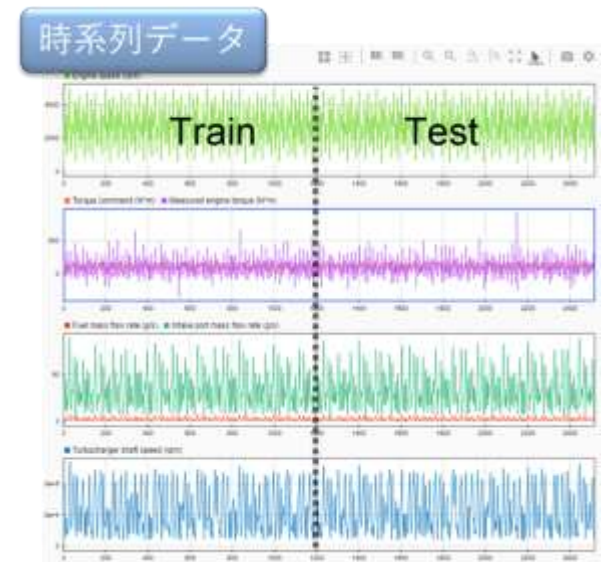


## ② 次数低減(Reduced Order Modeling) Deep Learning(深層学習)モデル化:エンジンモデル



Simulink上で学習データ測定のための仮想試験を実施

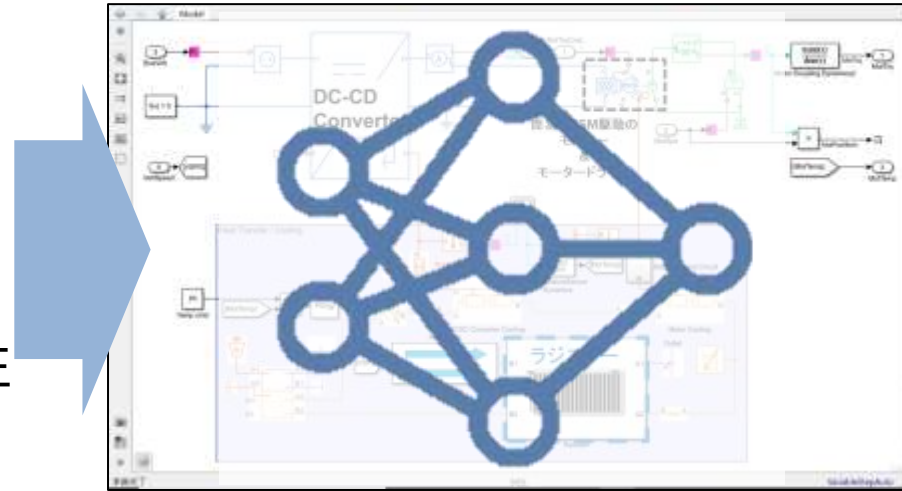
結果をディープラーニングで学習



## ②次数低減(Reduced Order Modeling) Deep Learning(深層学習)モデル化: モーター温度



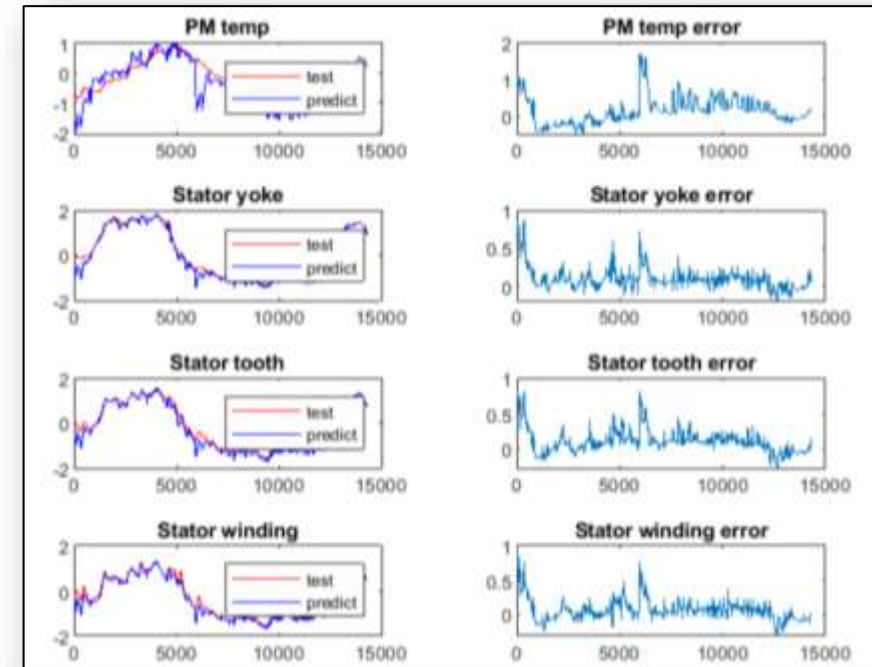
- 周囲温度
- 冷却液温度
- 測定されたd,q軸電流
- 測定されたd軸・q軸電圧
- モータ回転数測定値  $\omega$



- 永久磁石温度
- ステーターの歯とヨークの温度
- 固定子巻線温度

Simulink上で学習データ測定のための仮想試験を実施

結果をディープラーニングで学習

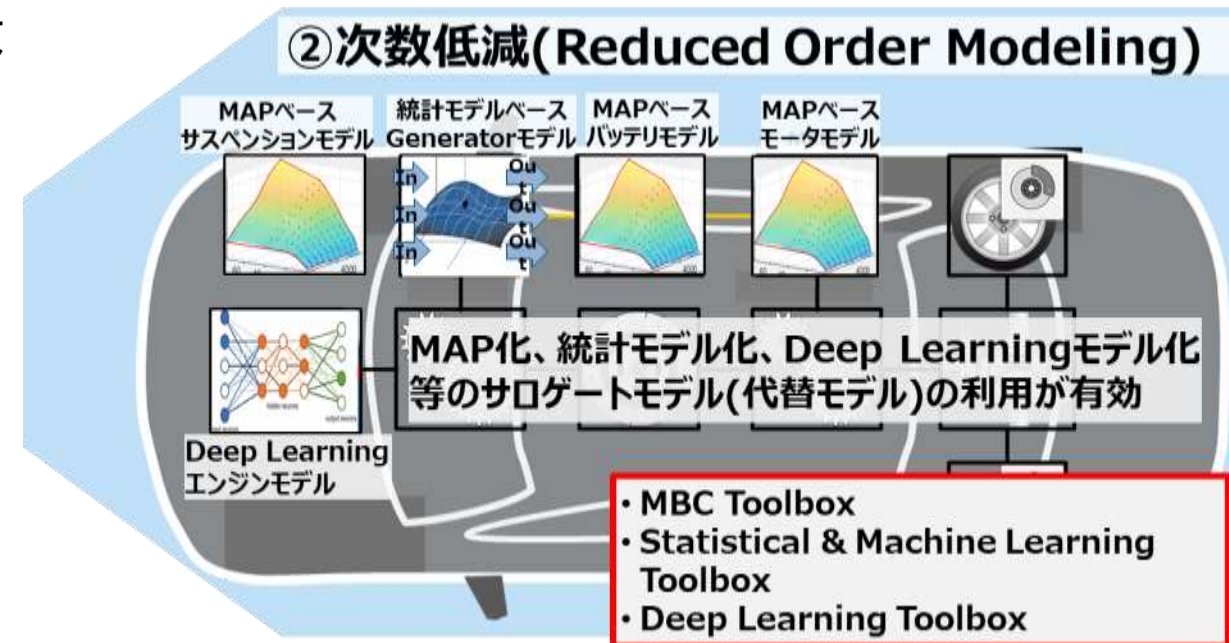
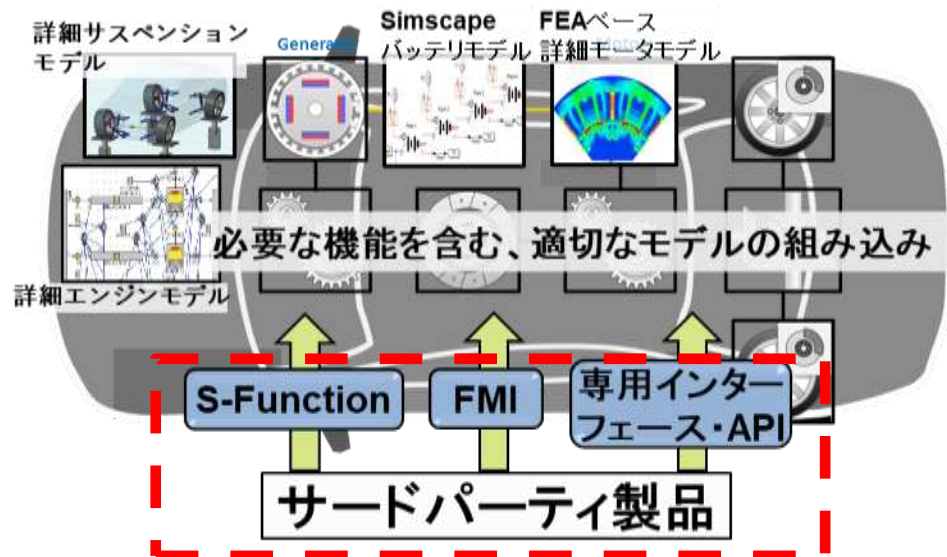




## ② 次数低減(Reduced Order Modeling)

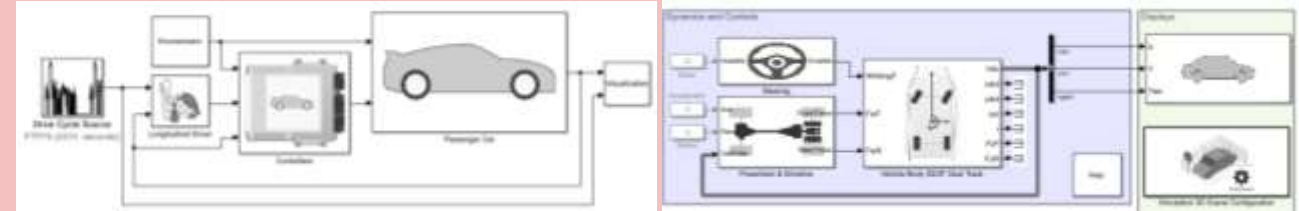
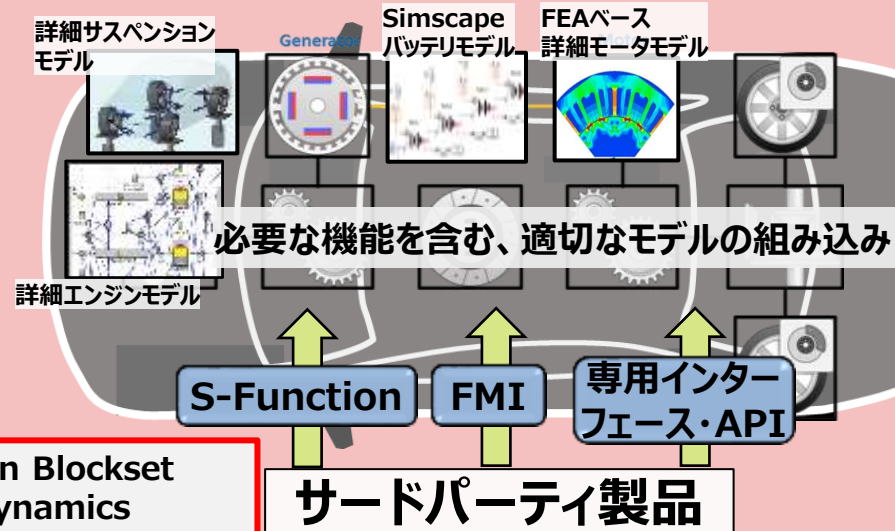
- モデルの軽量化により目的に合わせてシミュレーションの負荷を下げるができる。
- MAP化、統計モデル化、Deep Learningモデル化によりサードパーティ製品の接続・ライセンス制限から解放される。

⇒PCT(Parallel Computing Toolbox)を利用したシミュレーションの並列実行をスムーズに行うことができる



# 車両システムレベルシミュレーション環境

## ① 車両システムレベル、連成シミュレーションモデルの構築



Simulink (e.g., PTBS : Powertrain Blockset, VDBS : Vehicle Dynamics Blockset) によるシミュレーション枠組みを用意

## ② 次数低減(Reduced Order Modeling)



負荷が高い

シミュレーション

## ③ シミュレーションの並列実行



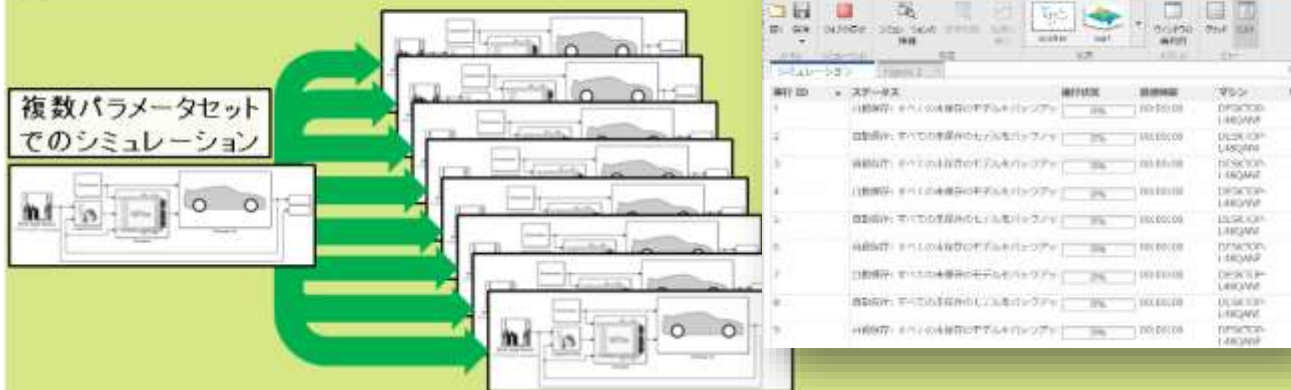
- 最適化関連製品
- Parallel Computing Toolbox
- Parallel Server

- MBC Toolbox
- Statistical & Machine Learning Toolbox
- Deep Learning Toolbox

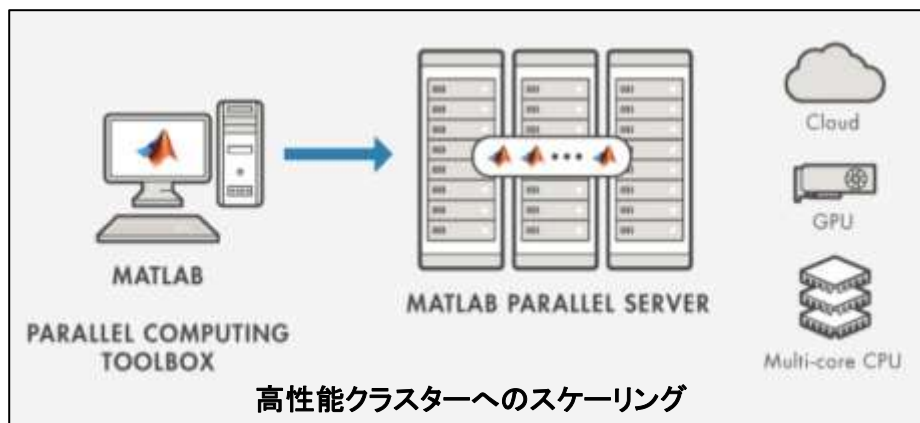
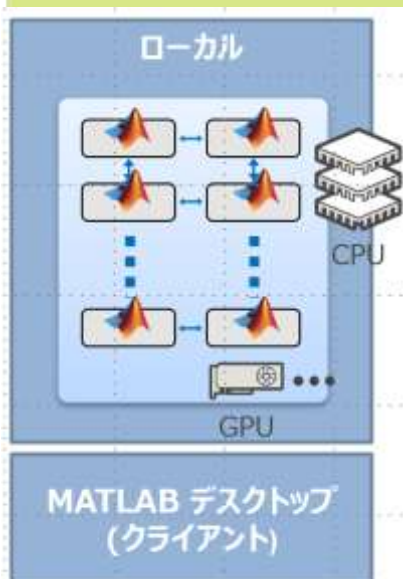
### ③シミュレーションの並列実行

#### ③シミュレーションの並列実行

複数パラメータセット  
でのシミュレーション



• 最適化関連製品  
• Parallel Computing Toolbox  
• Parallel Server



繰り返しシミュレーション実行が必要なケースにおいて、シミュレーションの並列実行が効率化へ大きな効果を発揮します。

- 例として以下のケースが挙げられます
  - シミュレーションモデル出力に対する最適化を行う場合
  - シミュレーションモデルのパラメータスタディ・適合を行う場合
- ※Local PCでの並列実行にはParallel Computing Toolboxが必要となります。
- デスクトップで作成したシミュレーションモデルを、HPC(High Performance PC)等によるクラスターやクラウド環境へ拡張した並列実行も可能です。
  - ※クラスター・クラウド環境での並列実行にはParallel Computing Toolbox と合わせて、MATLAB Parallel Server



# システムシミュレーションのための、サロゲートモデリング

## ①車両システムレベルシミュレーションの構築

- 今回紹介させていただきました要素を参考にしていただけると幸いです。
- Deep Learningによるサロゲートモデリングは、現在いくつかのお客様と共に取り組ませていただいております。

- これから類似の取り組みをご検討の際は、ご相談ください。

## ③シミュレーションの並列実行

- 今回紹介の内容に取り組む際は、まずご連絡を頂き、弊社エンジニアによる様々なサポートを提案させていただければ幸いです。
  - アプリケーションエンジニアによる無償サポート
  - コンサルティングエンジニアによる有償サポート
  - 製品内容に合わせた有償トレーニング

最適化関連製品  
• Parallel Computing Toolbox  
• Parallel Server  
...etc.

• MBC Toolbox  
• Statistical & Machine Learning Toolbox  
• Deep Learning Toolbox

最後までお付き合いいただき、誠にありがとうございました。  
ご質問などございましたら、ご連絡いただけると幸いです。

MathWorks

Senior Application Engineer

村上 直也 [nmurakam@mathworks.com](mailto:nmurakam@mathworks.com)