

空調用電動コンプレッサの モータ制御システム開発に おけるAIモデルの活用事例

2023/5/31 サンデン株式会社
R&Dセンター
電子技術開発ユニット
E-2 セクション

木暮 雅之

Agenda

1. 会社概要
2. 取組みの背景
3. 事例紹介1
4. 事例紹介2
5. 最後に

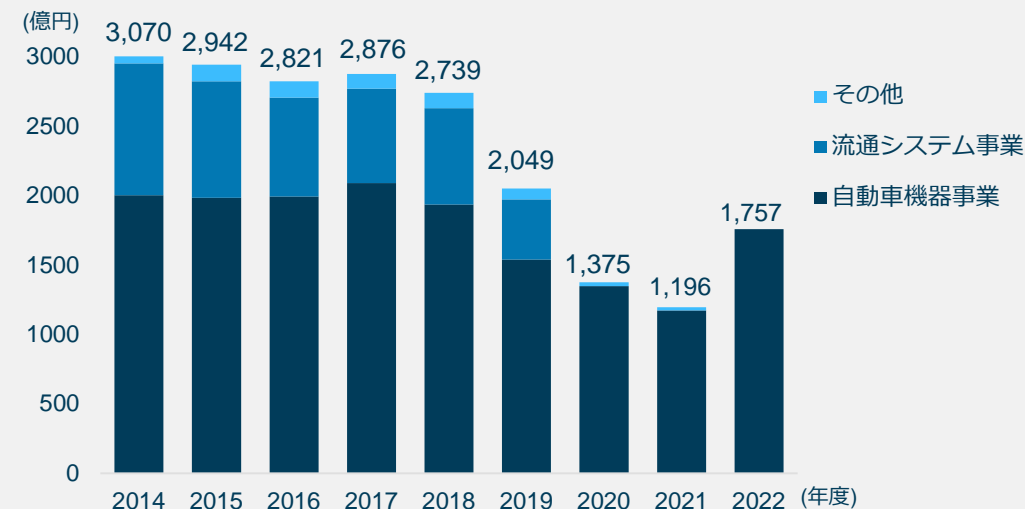
Agenda

1. 会社概要
2. 取組みの背景
3. 事例紹介1
4. 事例紹介2
5. 最後に

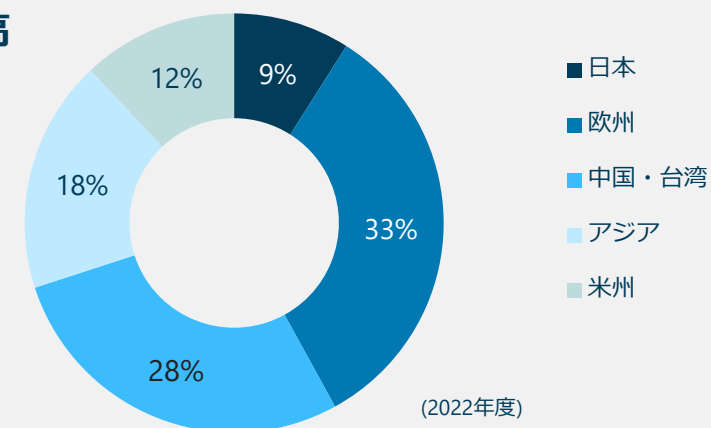
1.会社概要 (サンディンググループ概要)

社名	サンデン株式会社
設立	1943年7月30日
資本金	217億円
事業内容	自動車機器事業 ・自動車空調システム ・自動車空調用コンプレッサー
連結売上高	1,757億円 2022年度* <small>*当社は12月決算</small>
連結従業員数	5,608名 2022年12月末時点
主要取引先	VW Gr、DAIMLER、RENAULT/NISSAN/MITSUBISHI、 JAGUAR/LAND ROVER、VOLVO、STELLANTIS、GM、 HONDA、SUZUKI、SAIC、SCANIA、KOMATSU、KOBELCO
グループ会社	22か国・地域 46拠点 2023年3月時点
<small>当社は、2019年10月1日付で、当社の連結子会社であるサンデン・リテールシステム株式会社の発行済株式の全てを、 インテグラル株式会社が運営する関連事業体の出資により組成されたSDRSホールディングス株式会社に譲渡しております。</small>	

連結売上高



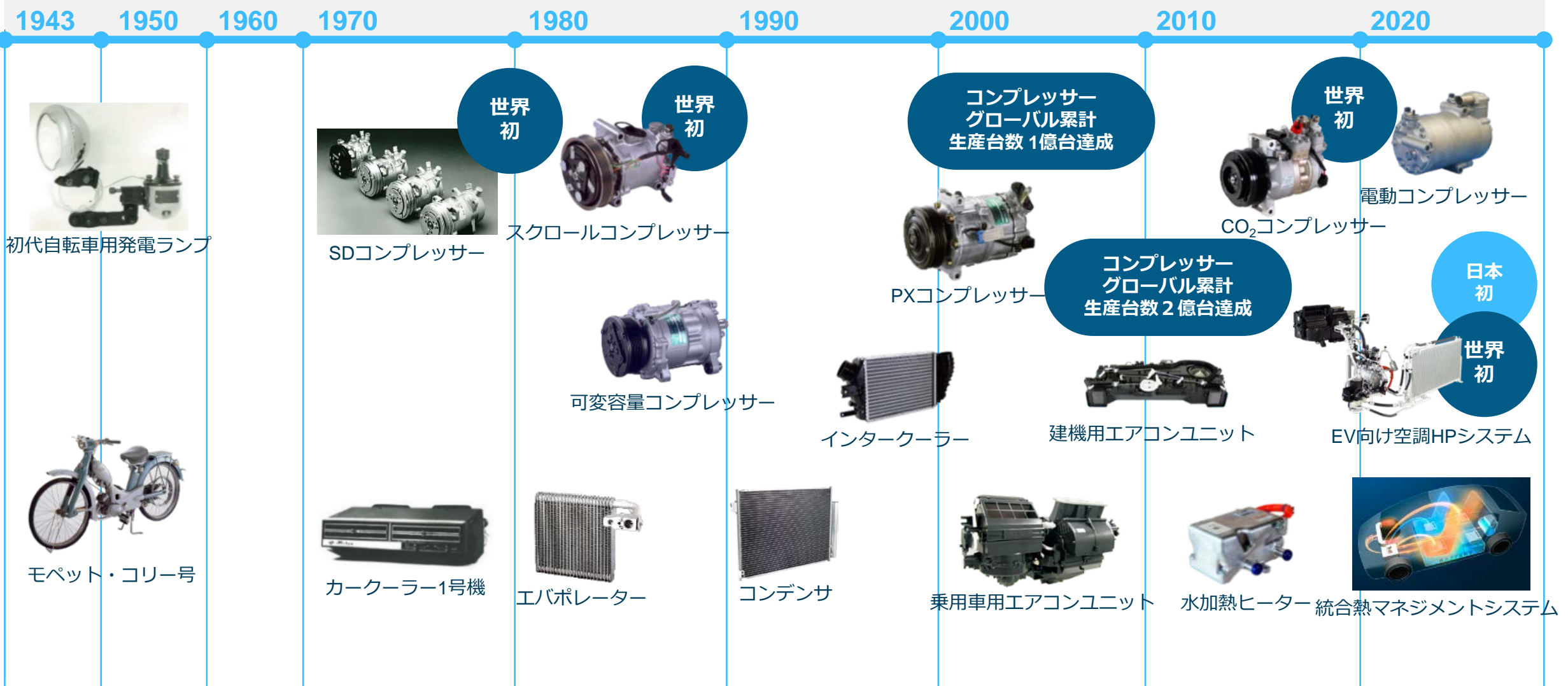
地域別売上高



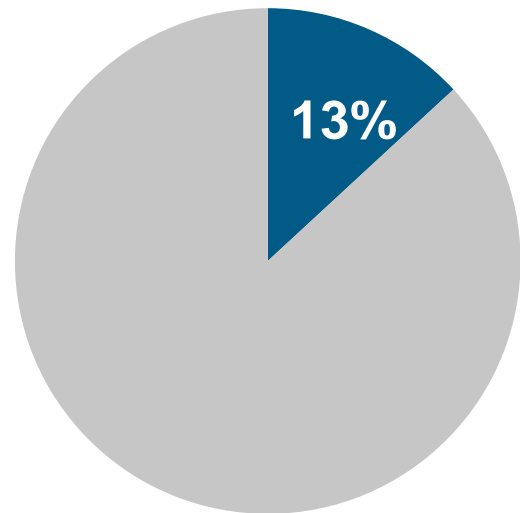
1.会社概要 (サンデンの歩み 製品展開の歴史)

世界初・日本初・業界初の製品

顧客貢献製品を創出



1.会社概要 (サンデンの歩み マーケットシェア)



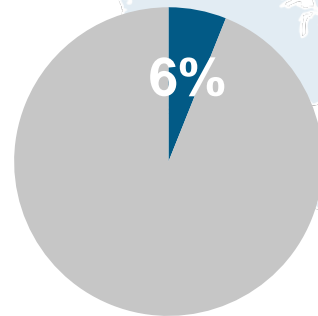
世界市場シェア

コンプレッサー販売台数ベース/FY2022(22年1-12月)
(乗用車、トラック)

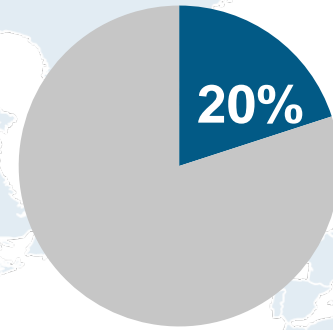
* 当社非連結子会社の華域三電汽車空調有限公司の販売台数を含む

■ 情報ソース

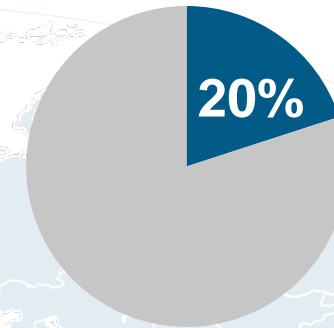
- ・ IHS_LV_Production_Base_Global_2023M02
- ・ IHS MHCV_ModelProduction_GLOBAL_2023Q1



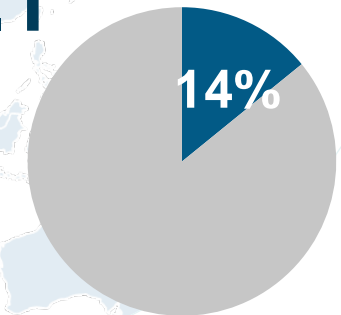
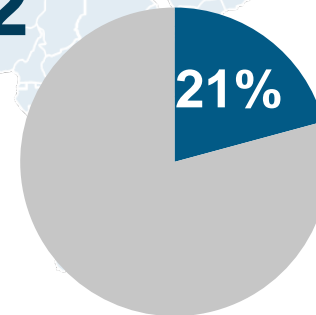
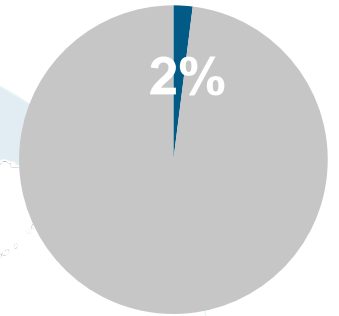
アメリカ市場シェア



欧州 No.2



中国 No.1



(中国、日本、韓国、インド、パキスタン、インドネシア、マレーシア、フィリピン、タイ、オーストラリア)

サンデングループの顧客



自動車

Audi / Citroën / Daihatsu / Daimler / FIAT / Ford / GM / Honda / Isuzu / Mazda / Mitsubishi / Nissan / Opel / Perodua / Proton / Renault / 長城汽車 / 吉利 / 上海五菱 / Rolls-Royce / Rover / Saab / Stellantis / SUBARU / SUZUKI / Toyota / TATA / VW / Vinfast / TOGG 等



建設機械

Caterpillar / Hitachi / Kobelco / KOMATSU 等



トラック

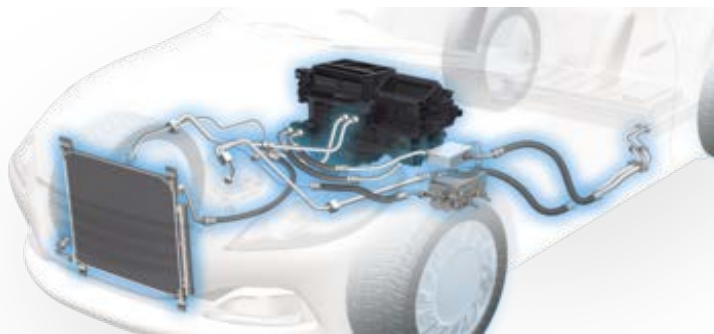
Freightliner / Mack / Scania / Volvo 等



自動車部品他

AISIN 等

1.会社概要 (製品紹介 自動車空調システム)



主力製品 / HVAC※ユニット、ヒートポンプシステム

カーエアコンを構成する様々な部品を世界規模で製造・販売しており、環境技術をコアテクノロジーに、大手自動車メーカー、建設機械・農業機械メーカーから信頼を獲得しています。

※HVAC : Heating, Ventilating and Air-Conditioning

システム製品		構成製品			
ヒートポンプシステム  <p>外気の熱を利用し、冷媒の圧縮、液化、蒸発を繰り返すことで、省エネルギーで暖房する空調システムです。エンジンの廃熱が利用できない電気自動車幅広く採用されています。</p>		HVACユニット  <p>自動車空調システムの中核部品で、内気・外気の切替え、熱交換器で冷却・加熱された空気を、最適な温度や湿度、風量に調整します。</p> <p>HVAC : heating, ventilating and air-conditioning unit</p>	コンデンサー  <p>薄肉化により軽量化を実現した高性能マルチフロータイプのコンデンサーです。</p>	エバポレーター  <p>小型・高性能のマルチフロータイプのエバポレーター。コアの温度分布均一化により高性能化を実現しています。また蓄冷機能に付加したタイプを開発し、乗用車のアイドリングストップ時の空調維持に貢献します。</p>	
その他 インタークーラー  <p>ターボエンジンの潜在能力を引き出す空冷式インタークーラー。サンデン独自の熱交換技術を活かし、内部伝達面積の拡大による高性能化と、樹脂タンク採用による軽量化を実現し、複雑な形状にも対応しています。</p>		ヒーターコア  <p>薄肉化による軽量化、コアの温度分布均一化による高性能化を実現しています。</p>	水加熱ヒーター  <p>エンジンの廃熱が利用できない電気自動車の新たな暖房熱源として活用されています。</p>	空調用配管  <p>自動車空調システムの各コンポーネントを繋ぎます。</p>	

1.会社概要 (主要製品一覧)

コンプレッサー

電動コンプレッサー



斜板式可変容量
コンプレッサー
(PXシリーズ)



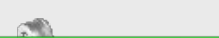
揺動板式可変容量コン
プレッサー
(SDV/Cシリーズ)



揺動板式固定容量
コンプレッサー
(SDシリーズ)



スクロール式固定容量



CO₂コンプレッサー



本取組み
事例

システム製品

ヒートポンプ
システム



HVA
ユニ
HVAC
venti
air-conditioning
unit



エバポレー
ター



その他

インター
クーラー



ヒーターコア



水加熱ヒー
ター



空調用配管



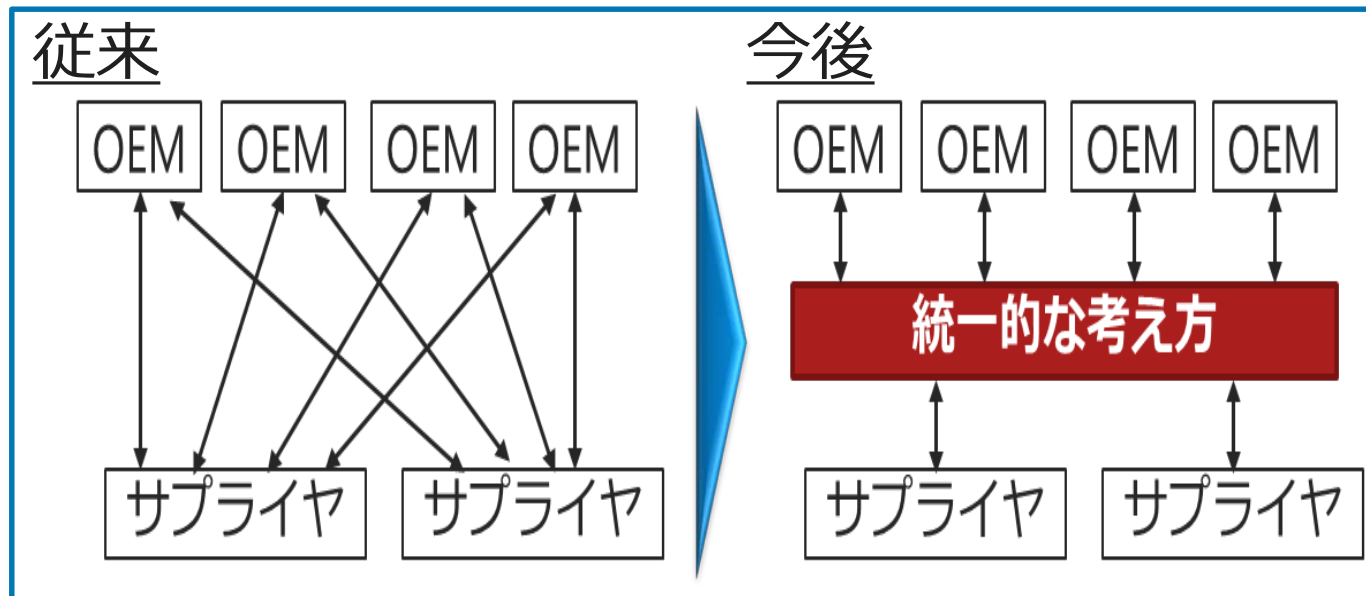
Agenda

1. 会社概要
2. 取組みの背景
3. 事例紹介1
4. 事例紹介2
5. 最後に

2. 取組みの背景

- 2015年に経済産業省主導で「自動車産業におけるモデル利用のあり方に関する研究会」の活動が開始
- 2021年にモデルベース開発（MBD）の普及・促進に向け、自動車メーカーとサプライヤーによって「MBD推進センター（JAMBE）」が発足

◆ 仕事の流れの変化



◆ 国際的なルール作り（標準化）

- ドイツ[prostep ivip]や
フランス[IRT SystemX]と連携

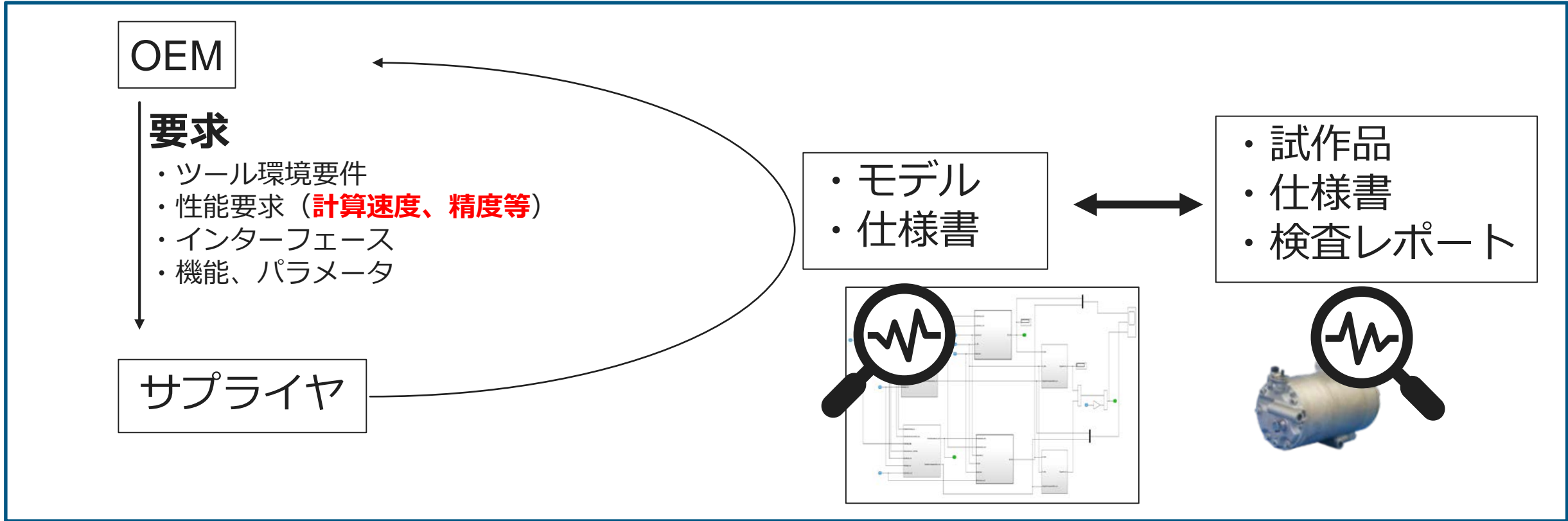


将来的にもMBDに対応可能なサプライヤーが求められ始めている

2. 取組みの背景

◆ 一制御技術者視点で感じる危機感

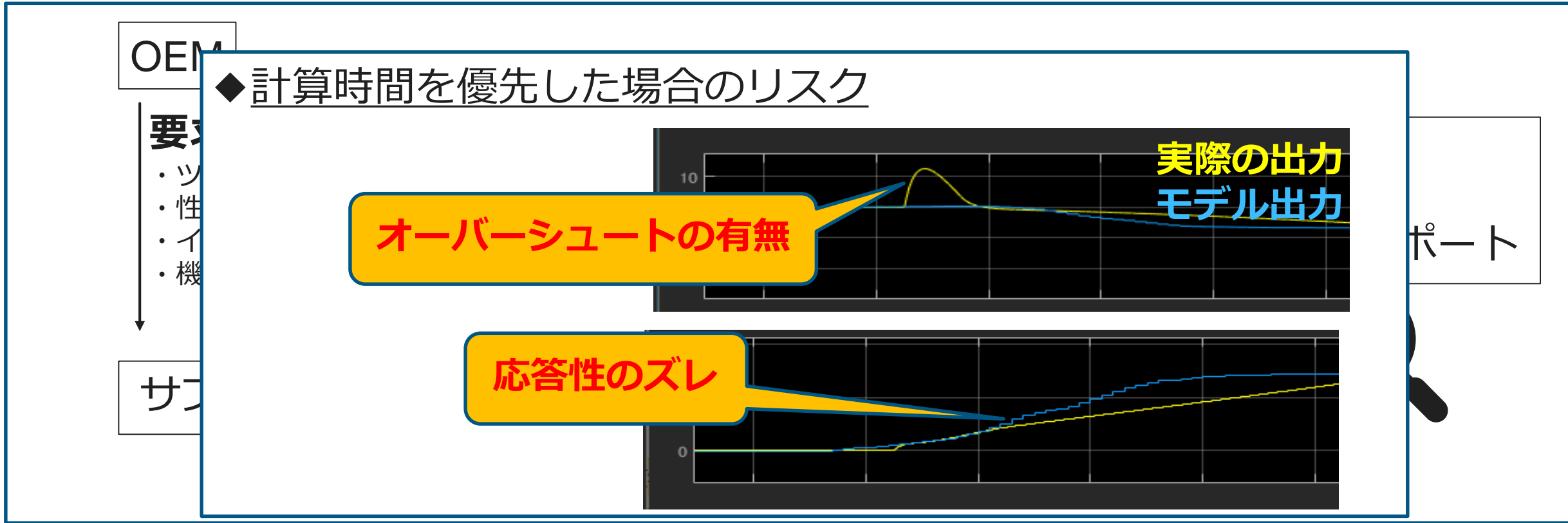
- ・ 試作品ができる前に先行してモデルを作りこみ、モデル通りに動く試作品を納めるよう仕事のやり方が徐々に変わってくると予想。



2. 取組みの背景

◆ 一制御技術者視点で感じる危機感

- ・ **試作品ができる前に先行してモデルを作りこみ、モデル通りに動く試作品を納めるよう仕事のやり方が徐々に変わってくると予想。**



計算速度と精度等を担保したモデルを先行して作り込み、その通りに動く試作品の納入を要求される可能性が高い

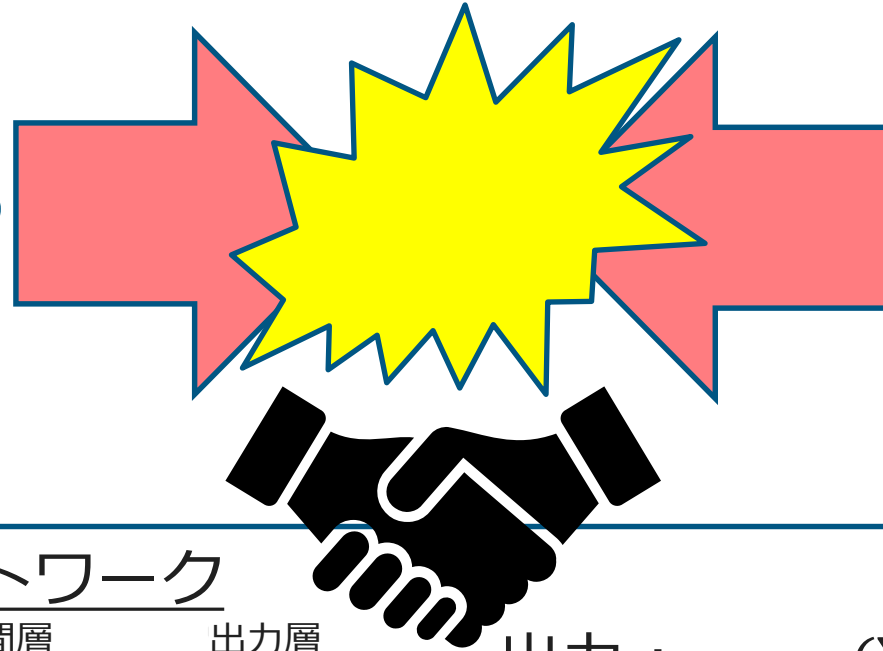
2. 取組みの背景

計算速度

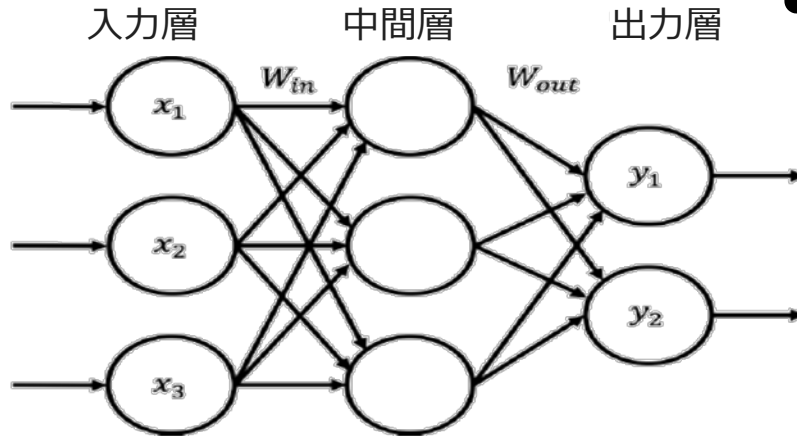
- ・ サンプル時間の低速化
- ・ 機能の削減

精度

- ・ サンプル時間の高速化
- ・ モデルの詳細化
- ・ パラメータ可変



ニューラルネットワーク



$$\text{出力} : y = \sigma(\sum w_i x_i + \theta)$$

$$\text{重み} : w_i(t+1) = w_i(t) - \alpha \frac{\partial E(t)}{\partial w_i}$$

$$\text{閾値} : \theta(t+1) = \theta(t) - \alpha \frac{\partial E(t)}{\partial \theta}$$

α : 学習率, σ : 活性化関数

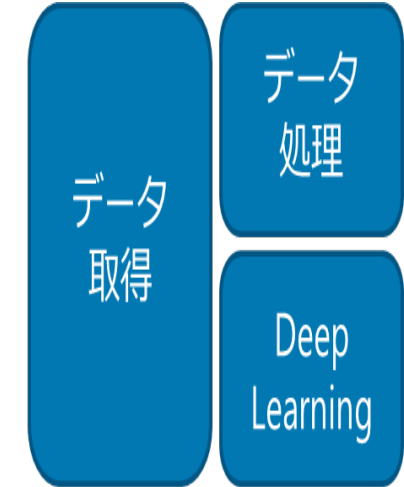
サンプル時間を低速化させた状態で、ニューラルネットワーク技術を活用して精度を確保可能か？

2. 取組みの背景

◆ MathWorks社から提案された初期導入支援の概要

	内容	オーナー	期間
0	キックオフ 専任担当者アサイン	お客様 MathWorks	
1	モータモデルの提供 モデルについてディスカッション	お客様 MathWorks	
2	アプローチの検討と サンプルコードの提供	MathWorks	
3	サンプルの実行 データを増やして適用 テクニカルサポート活用 パラメータチューニング アルゴリズム開発方向性の決定	お客様	
評価	ツールに慣れ、テクニカルサポートを活用できる 課題の難易度を把握し方向性が決定できる コンサルティング/トレーニング有無の最終判断		

AIモデル開発



Agenda

1. 会社概要
2. 取組みの背景
3. 事例紹介1
4. 事例紹介2
5. 最後に

3. 事例紹介1

◆進め方

STEP1

- ニューラルネットワーク **モデル設計**のノウハウ蓄積
 - サロゲートモデルのトライアル
(線形プラントモデル：モータモデル単体)

事例紹介1

STEP2

- **運用環境を意識したフィードバック系**に対するノウハウ蓄積
 - コントローラとプラントモデルを含んだF/Bシステム全体に対してサロゲートモデルを作成し、推論・評価

事例紹介2

STEP3

- **熱・流体系**に対するノウハウ蓄積
 - 実機データから熱・流体の状態量に対してサロゲートモデルを作成し、推論・評価

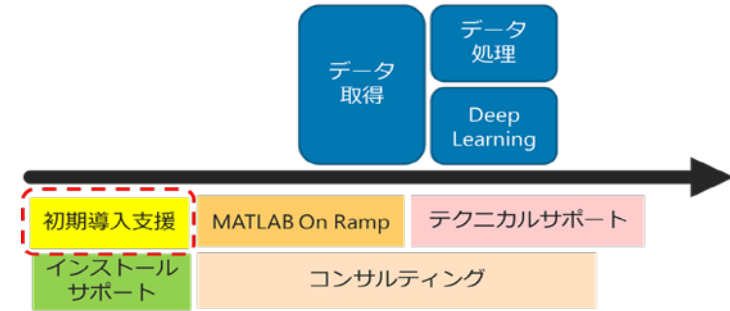
ステップ・バイ・ステップで技術開発を進め、本講演ではSTEP1、2を紹介

3. 事例紹介1（線形なモータモデルのNN化）

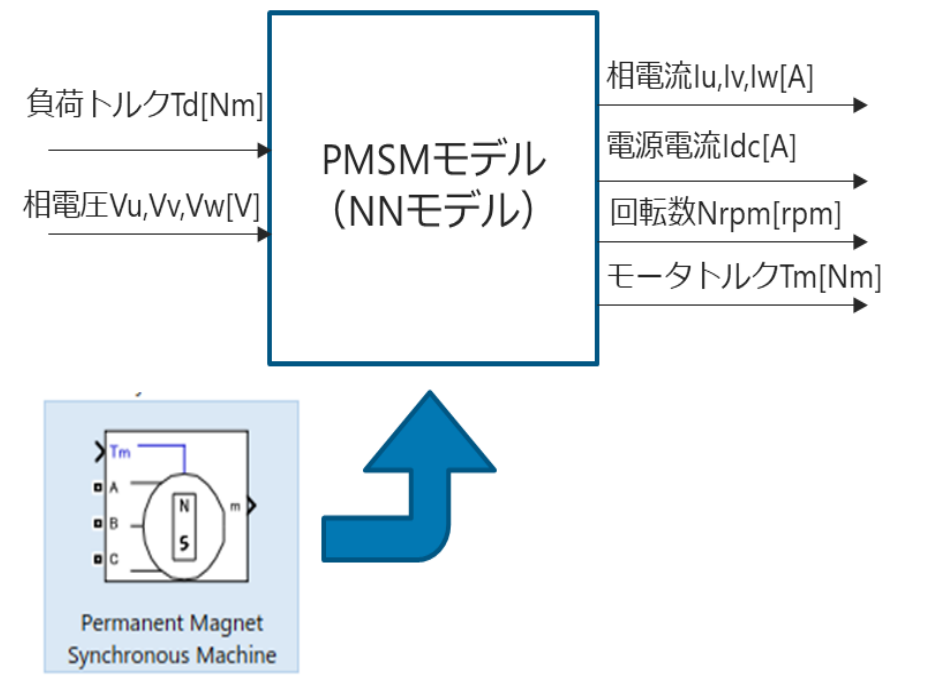
◆初期導入支援にあたって整合した項目

- ①対象のモータモデルに対する情報共有
- ②サロゲートモデルの入出インターフェース
- ③弊社側のモータ諸元（パラメータ）

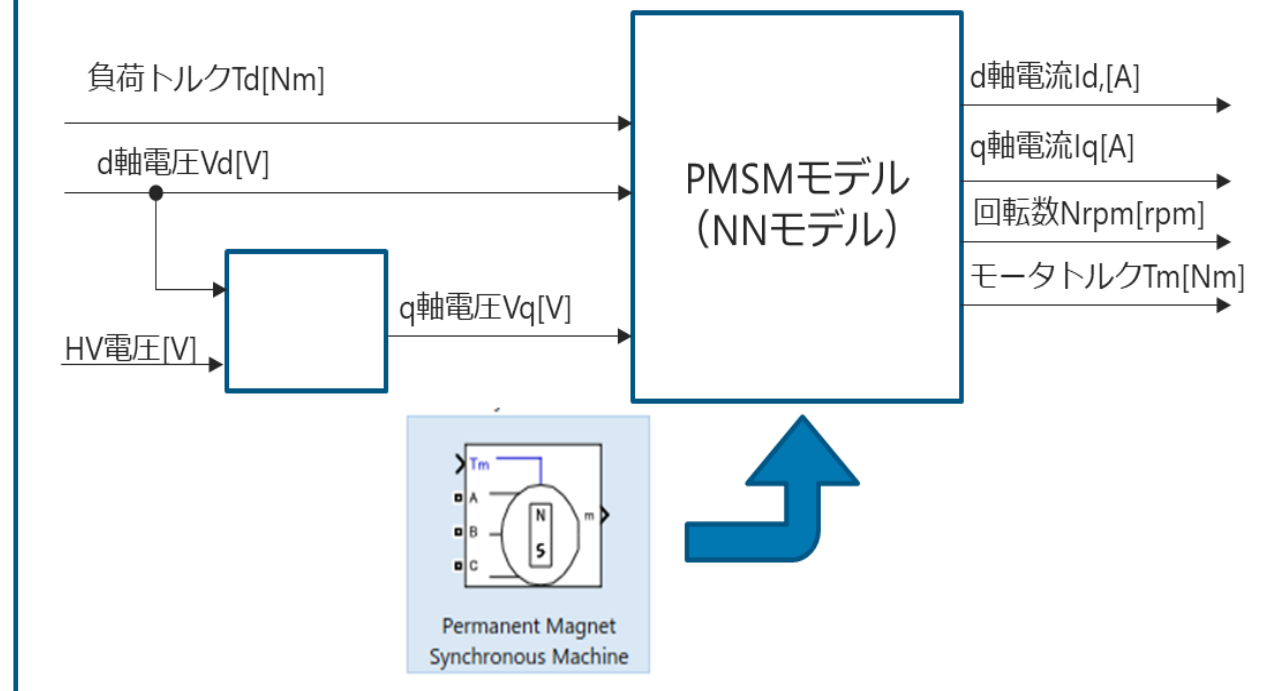
AIモデル開発



当初のインターフェース素案

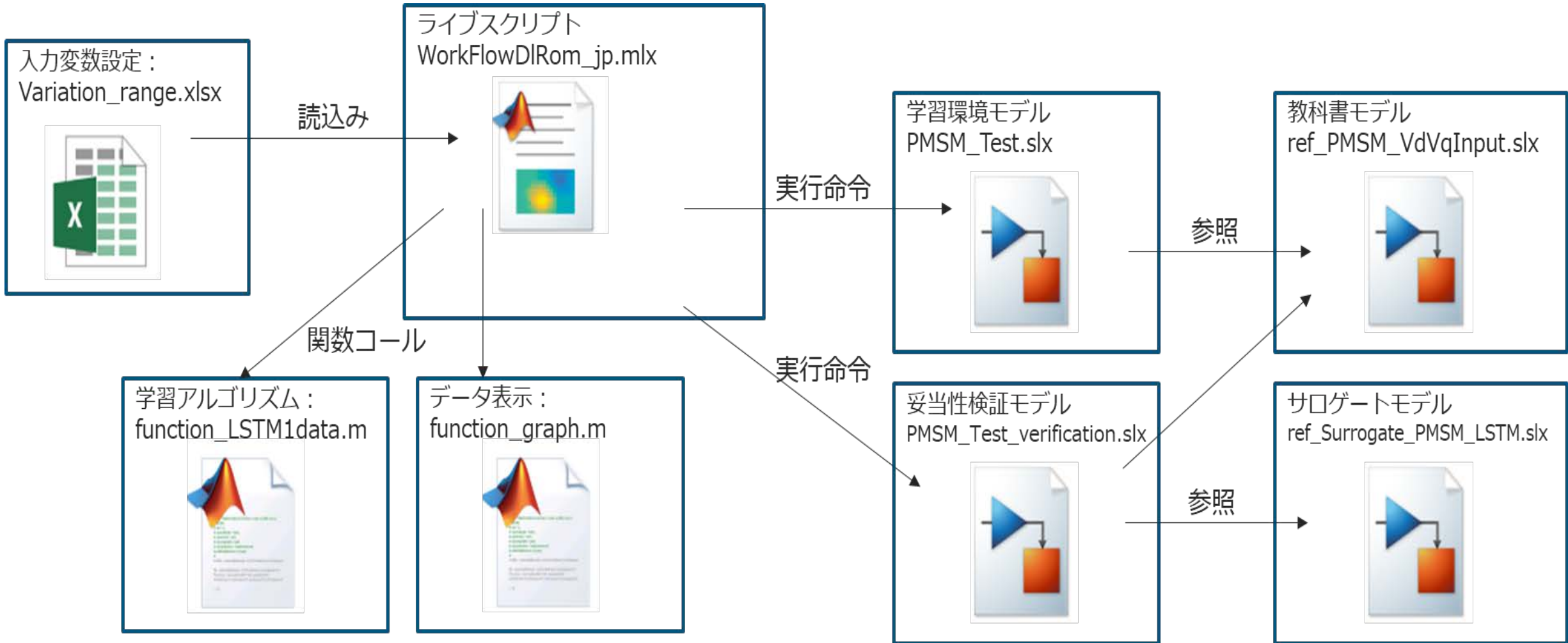


サンプルコードのインターフェース



3. 事例紹介1（線形なモータモデルのNN化）

◆ サンプルコード・モデルの抜粋



3. 事例紹介1 (線形なモータモデルのNN化)

◆ サンプルコード・モデルの抜粋

```

%Input
Tm = data{5}.Values.Data';
Vd = data{6}.Values.Data';
Vq = data{7}.Values.Data';

X_transient = [Tm; Vd;Vq];

%Output
Te = data{10}.Values.Data';
ModSpd = data{3}.Values.Data';
Id = data{1}.Values.Data';
Iq = data{2}.Values.Data';

Y_transient = [Te; ModSpd;Id;Iq];

function_LSTM1data(X_transient,Y_transient)
    
```

入力データの抽出

出力データの抽出

LSTM学習用の関数をコール

```

%% 過渡応答用ネットワークの作成
% 入出力の次元
numFeatures = 3;
numResponses = 4;
% LSTMノードの数
numHiddenUnits = 50;

% ネットワークの定義
layers = [ ...
    sequenceInputLayer(numFeatures,"Name","Sequence input")
    lstmLayer(numHiddenUnits,"Name","lstm","OutputMode","sequence")
    fullyConnectedLayer(numResponses,"Name","fc2")
    regressionLayer("Name","regressionoutput")];

lgraph = layerGraph(layers);

% 学習パラメータの設定
maxEpochs = 1000;
miniBatchSize = 10000;
options = trainingOptions('adam', ...
    'MaxEpochs',maxEpochs, ...
    'MiniBatchSize',miniBatchSize, ...
    'InitialLearnRate',0.01, ...
    'ValidationFrequency',50, ...
    'Shuffle','every-epoch', ...
    'Plots',params.plot, ...
    'Verbose',0);

% ネットワークの学習
if training == true
    disp('train LSTM model...')
    % ネットワークの学習
    [net,info] = trainNetwork(std_transientXtrain,std_transientYtrain,lgraph,options);
    % original_net.mat という名前で保存
    save('original_net.mat','net');
else
    % trainingフラグがFalseであればネットワークの読み込み
    load('net.mat');
end
    
```

入力数

出力数

隠れユニットの数

シーケンス入力層の設定

LSTM層の設定

全結合層の設定

回帰出力層の設定

ネットワーク層の配列からLayers プロパティを設定

ネットワークの学習用のソルバーの設定

エポック (学習回数) の最大回数

ミニバッチのサイズ

学習に使用する初期学習率

ネットワークの検証の頻度 (反復回数)

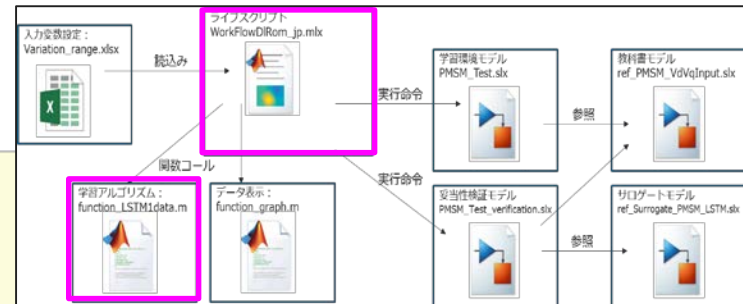
データのシャッフルのオプション

ネットワークの学習中に表示するプロット

学習の進行状況の情報表示用インジケータ

トレーニングフラグがTrueの場合、学習を実施

Falseの場合matデータを読み込む



3. 事例紹介1（線形なモータモデルのNN化）

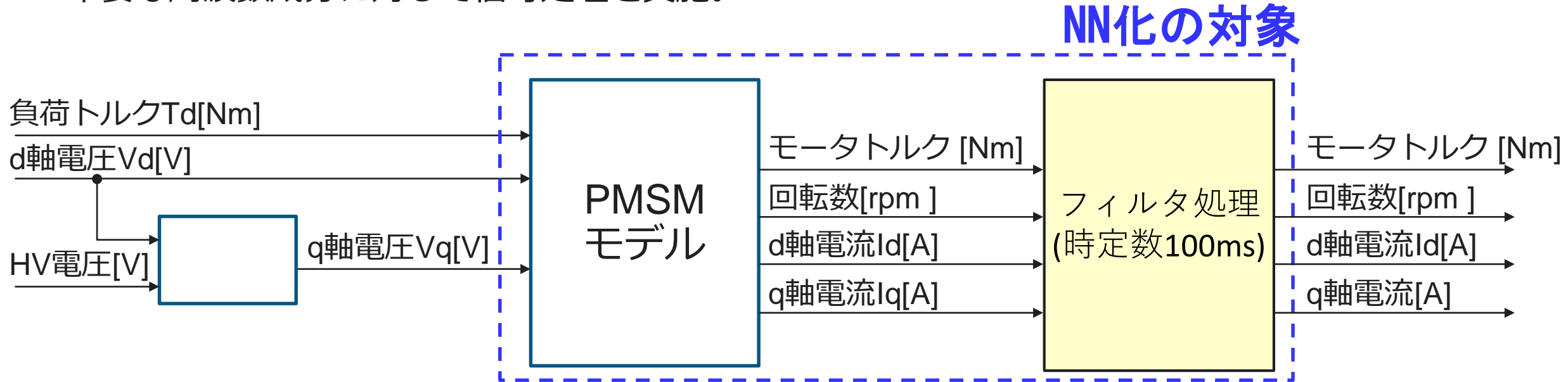
◆ 弊社側でのカスタマイズ内容

- ① サンプル時間の低速化に伴い、適切に信号処理
⇒ システム同定や制御工学に基づいて信号処理することで、過渡応答性を改善
- ② 対象のモータモデルに対して非線形要素を追加。
⇒ 物理法則に則した状態変数（非線形要素）を追加する事でオーバーフィッティングを回避。
学習結果が飛躍的に改善
- ③ テストパターンの取捨選択
⇒ 統計的に偏りのないテストパターンに対して、物理法則に反する組合せを削除

3. 事例紹介1 (線形なモータモデルのNN化)

◆ 信号処理

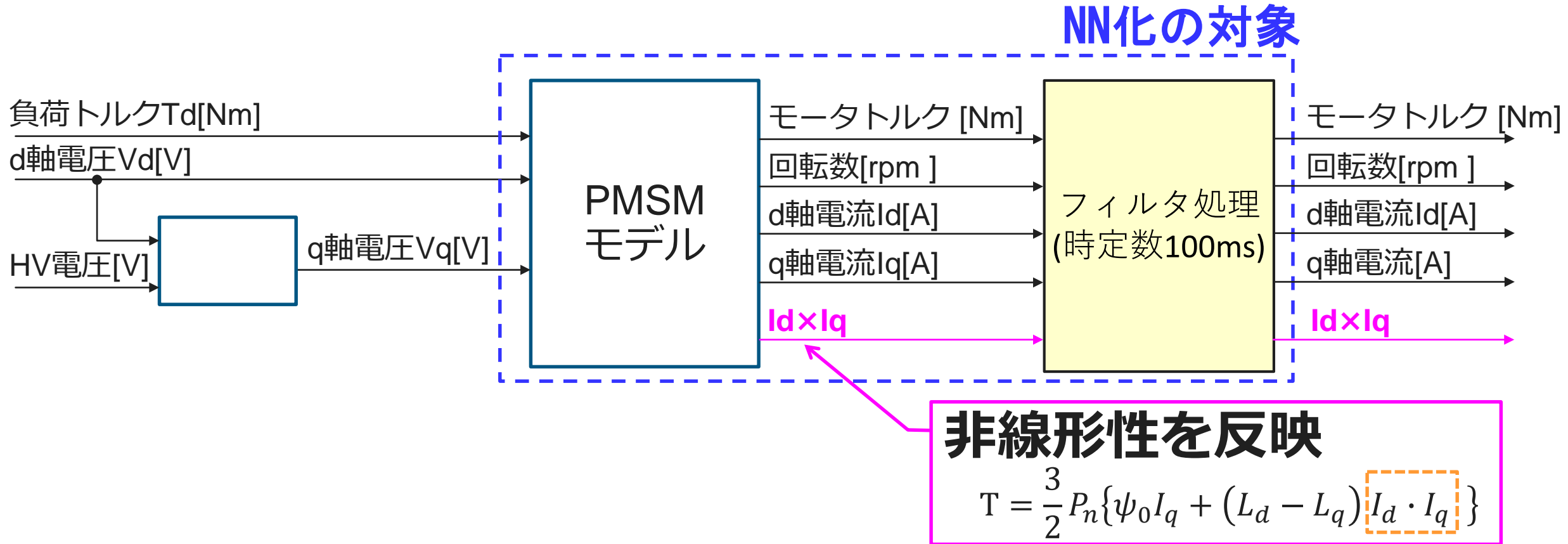
上位コントローラと通信する信号は通信周期毎に更新する必要があるため、不要な周波数成分に対して信号処理を実施。



3. 事例紹介1 (線形なモータモデルのNN化)

◆ 非線形要素の追加

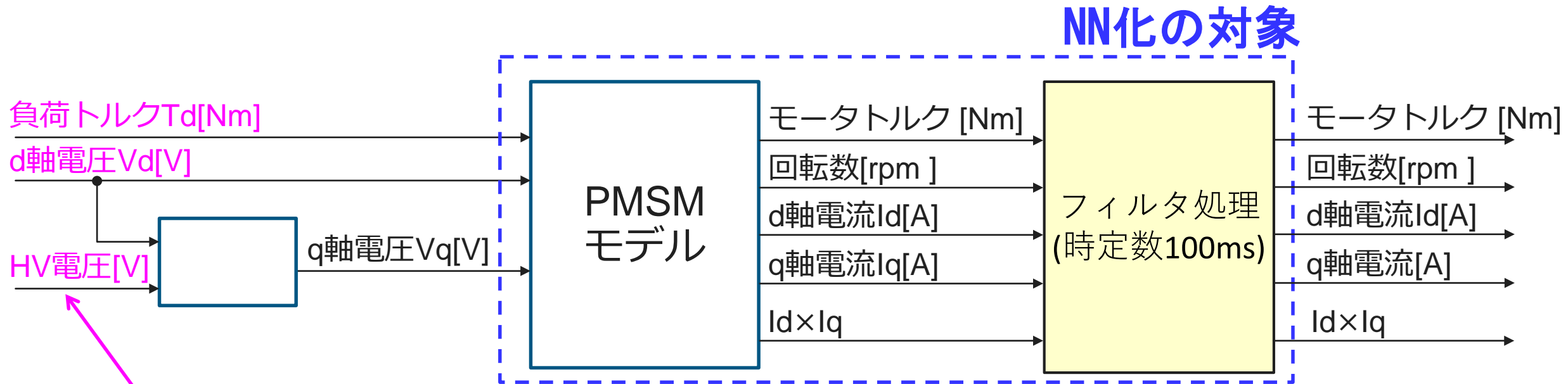
物理法則に則した状態変数のうち、非線形性を含む信号を追加。



3. 事例紹介1 (線形なモータモデルのNN化)

◆ テストパターンの取捨選択

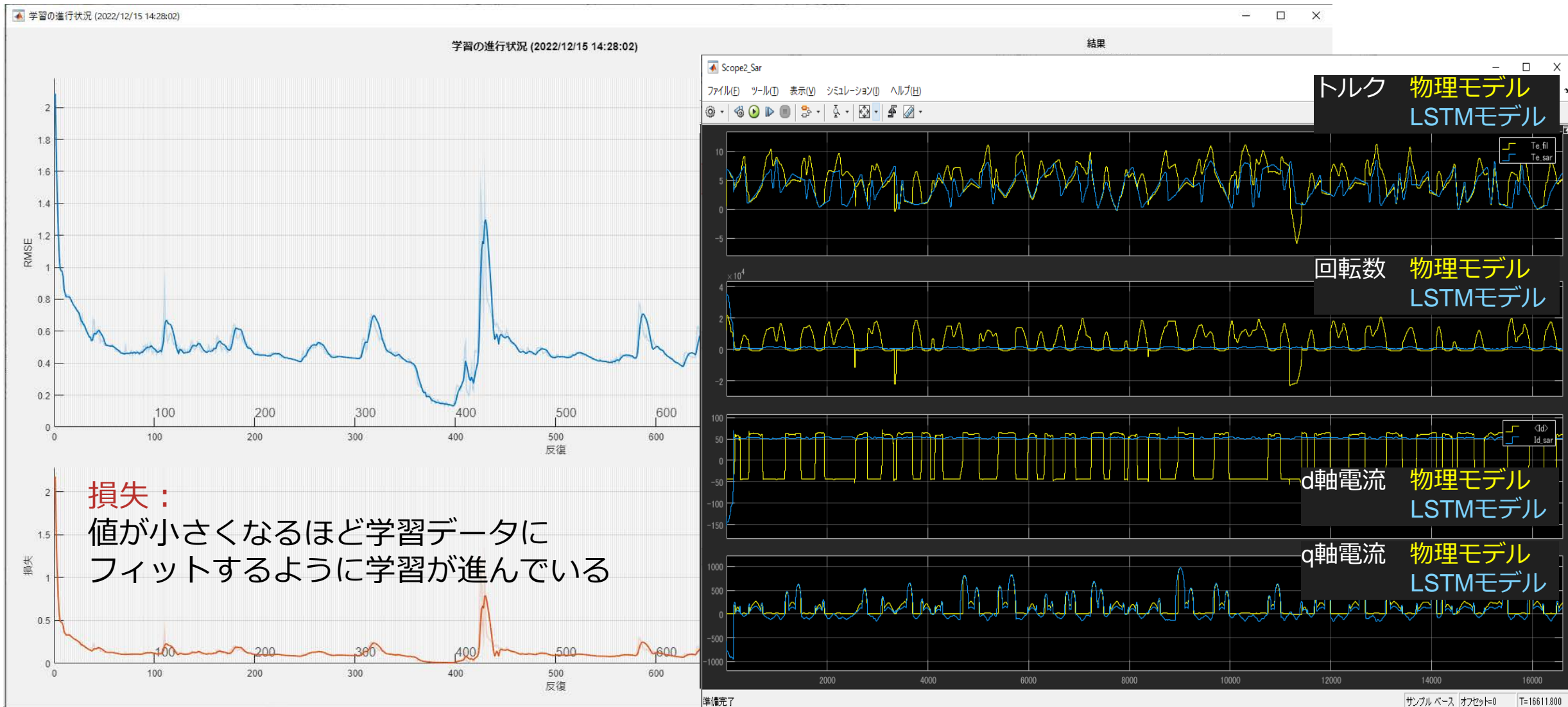
統計的に偏りのないテストパターンに対して、物理法則に反するテストパターンを削除



d軸電圧Vd[V]が電源電圧(HV電圧[V])を超えるテストパターンは削除

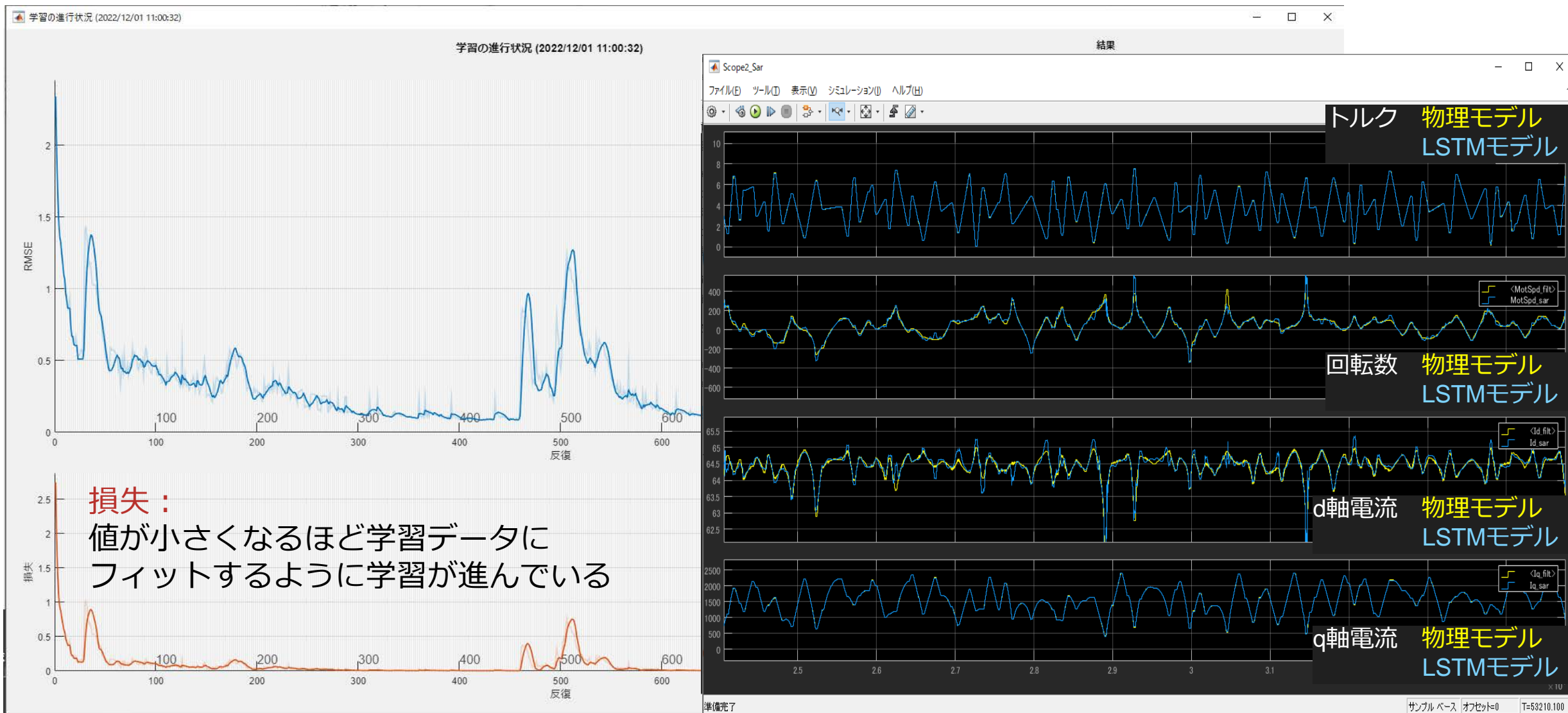
3. 事例紹介1 (線形なモータモデルのNN化)

◆ 学習結果と検証結果の抜粋 (LSTM) カスタマイズ前



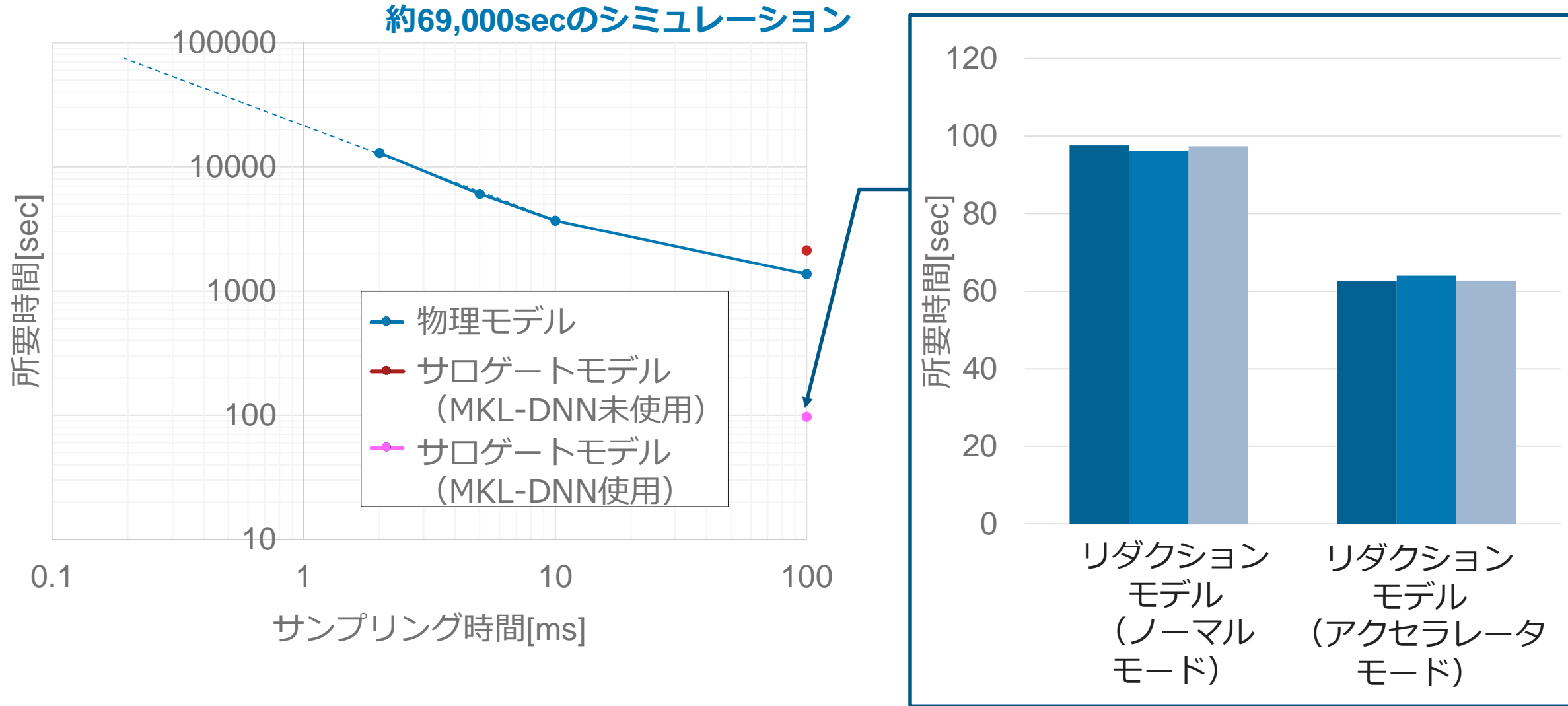
3. 事例紹介1 (線形なモータモデルのNN化)

◆ 学習結果と検証結果の抜粋 (LSTM) カスタマイズ後



3. 事例紹介1 (線形なモータモデルのNN化)

◆演算に要する時間の比較 (LSTM)



Agenda

1. 会社概要
2. 取組みの背景
3. 事例紹介1
4. 事例紹介2
5. 最後に

4. 事例紹介2（フィードバック系全体のNN化）

◆ 弊社側でのカスタマイズ内容

- ① サンプル時間の低速化に伴い、適切に信号処理
⇒ システム同定や制御工学に基づいて信号処理することで、過渡応答性を改善
- ② 対象のモータモデルに対して非線形要素を追加。
⇒ 物理法則に則した状態変数（非線形要素）を追加する事でオーバーフィッティングを回避。
学習結果が飛躍的に改善
- ③ テストパターンの取捨選択
⇒ 統計的に偏りのないテストパターンに対して、物理法則に反する組合せを削除
- ④ システムの拡張
⇒ モータ単体だけでなく、コントローラを含んだF/Bシステム全体に対して適用

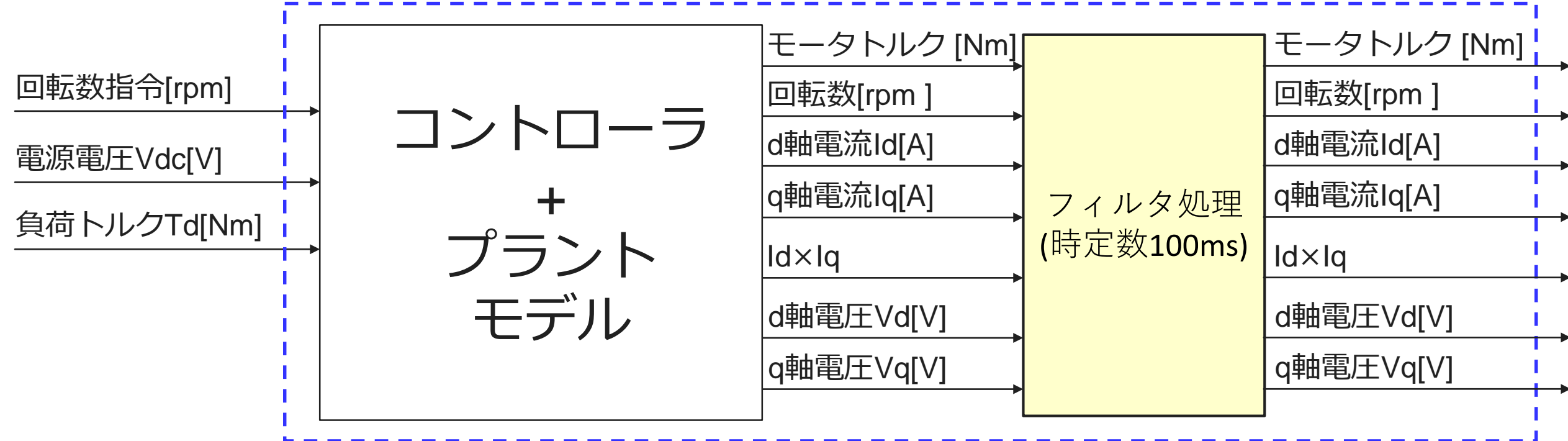
4. 事例紹介2 (フィードバック系全体のNN化)

◆ コントローラ+プラントモデルを含んだF/B系に対するNN化

学習条件

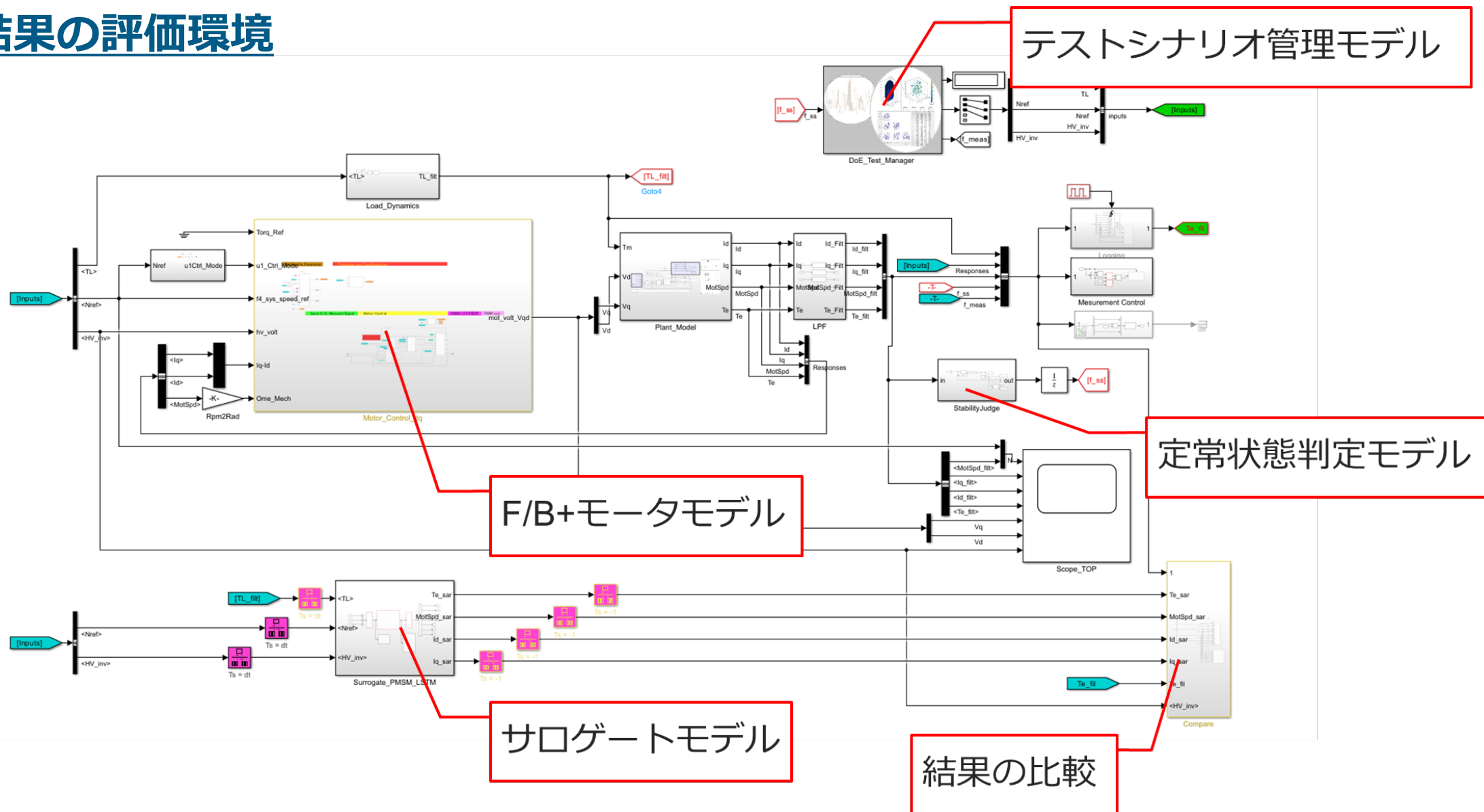
- ・ サンプルング (間引き) : 100ms
- ・ LSTMノード数 : 50
- ・ エポック数 : 1000
- ・ ミニバッチサイズ : 10000

NN化の対象



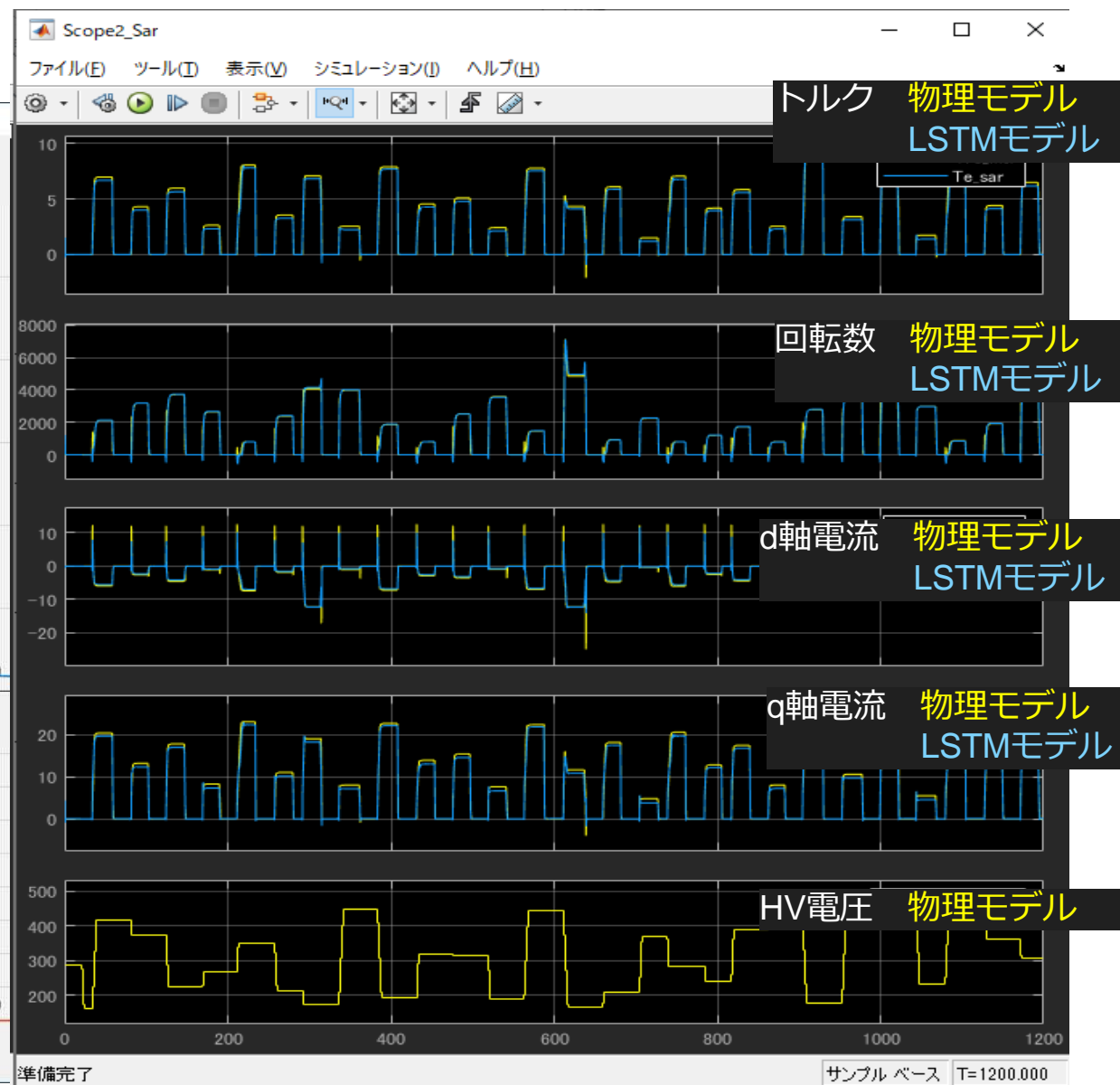
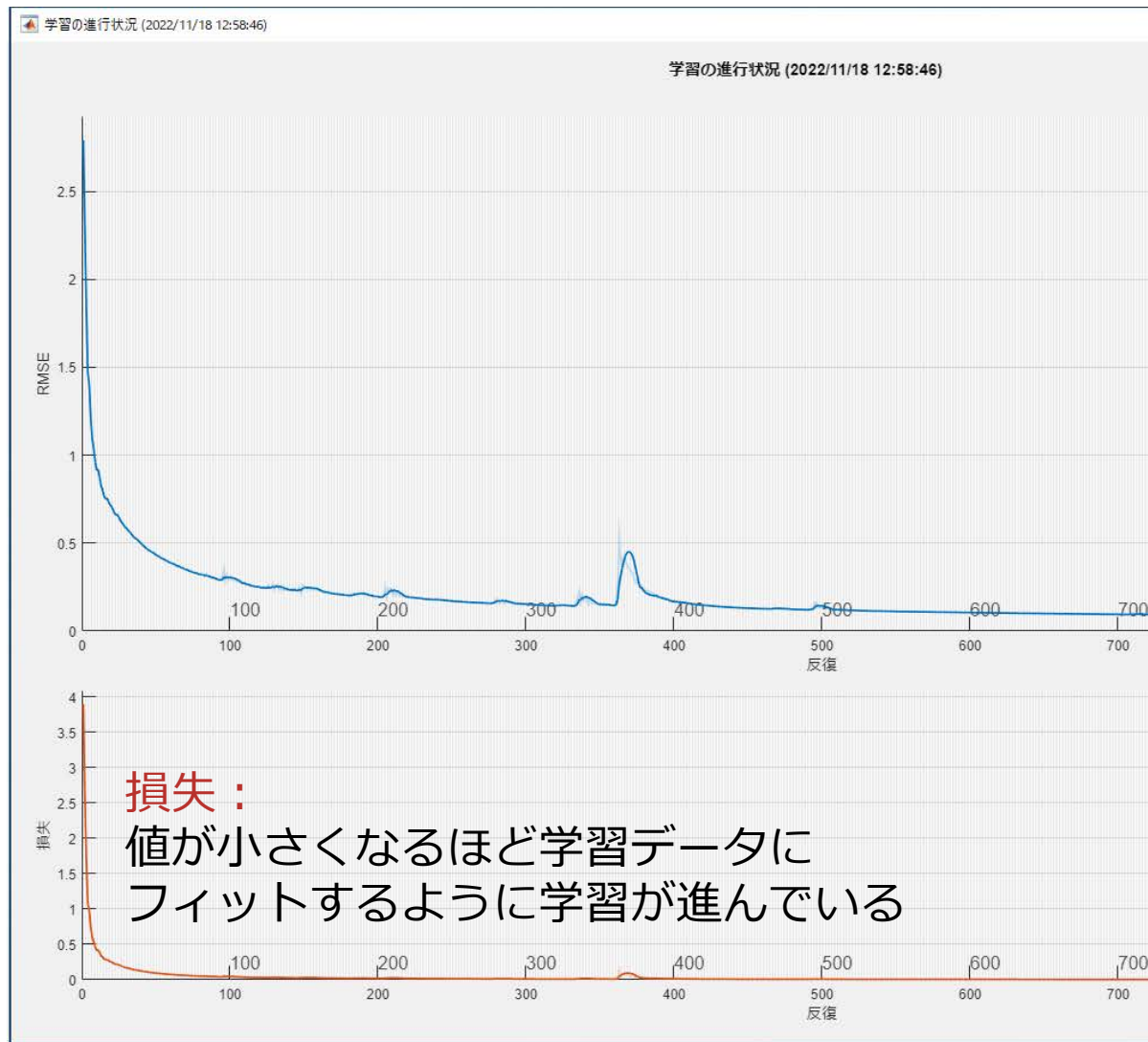
4. 事例紹介2 (フィードバック系全体のNN化)

◆ 学習結果の評価環境



4. 事例紹介2 (フィードバック系全体のNN化)

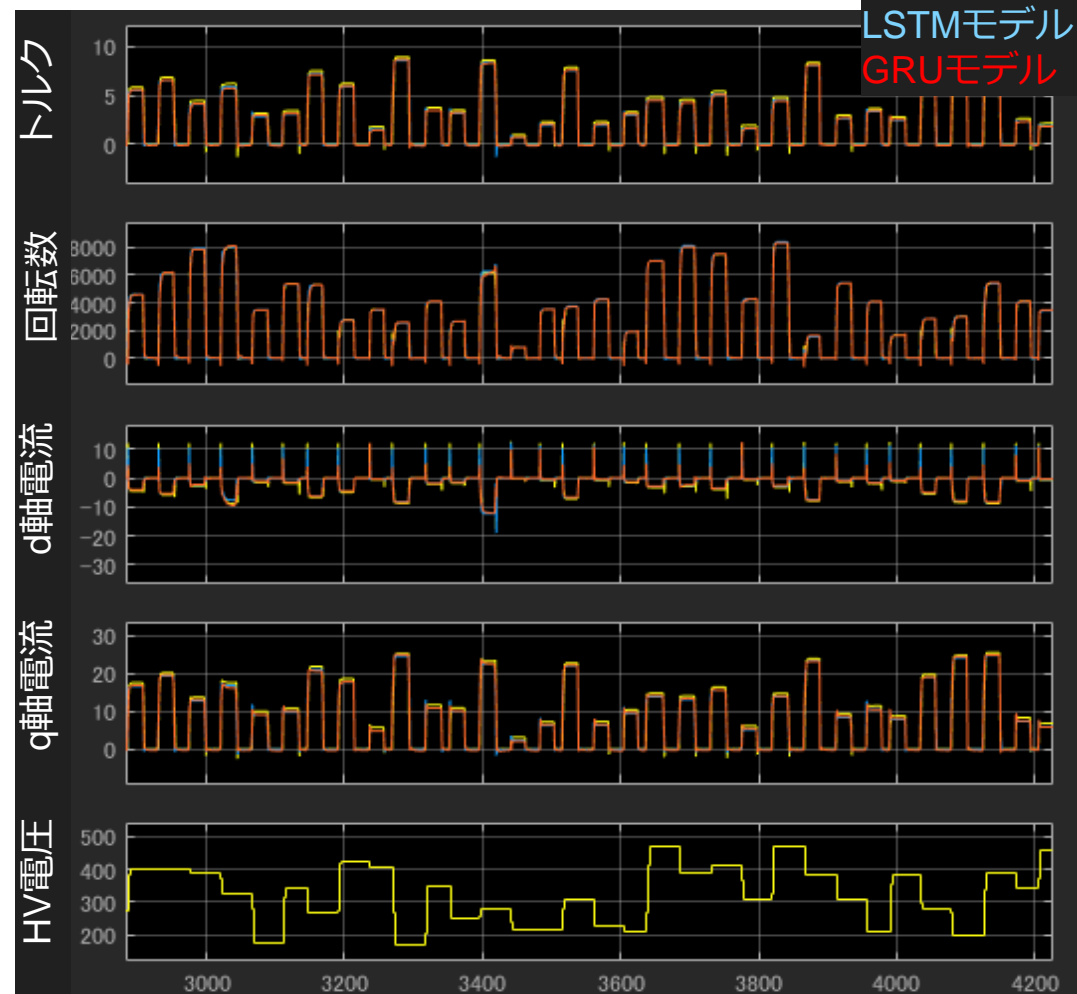
◆ 学習結果と検証結果の抜粋



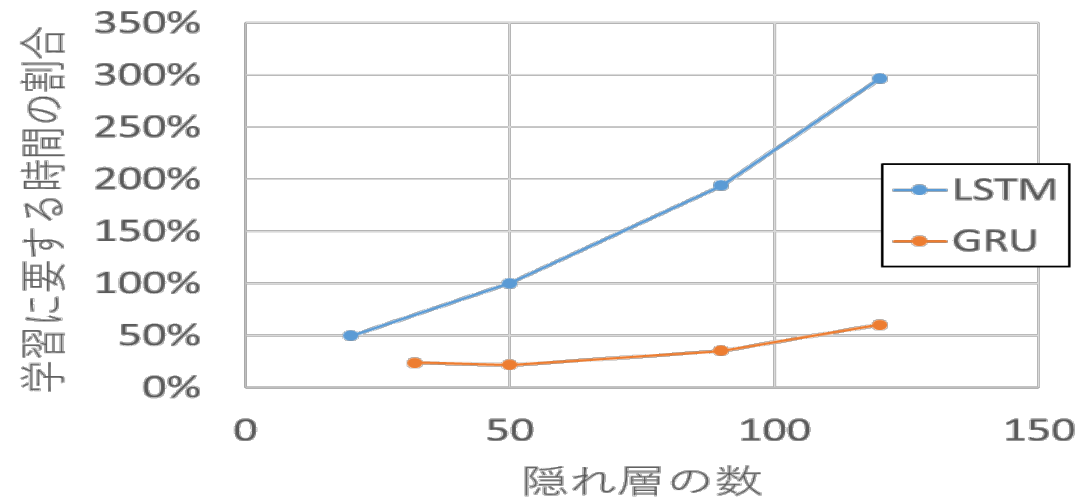
4. 事例紹介2 (フィードバック系全体のNN化)

◆学習アルゴリズムの比較

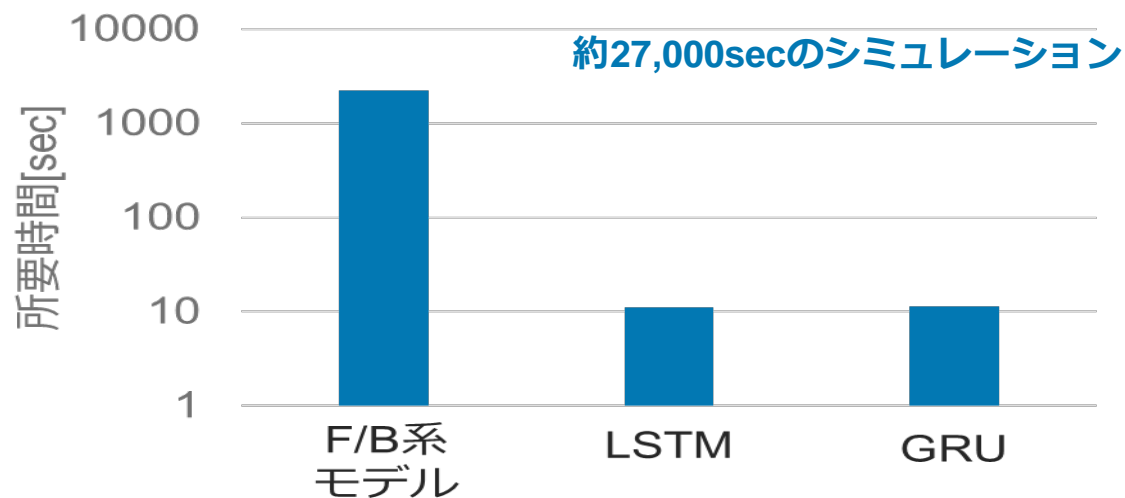
過渡応答結果の抜粋



学習に要する時間の比較



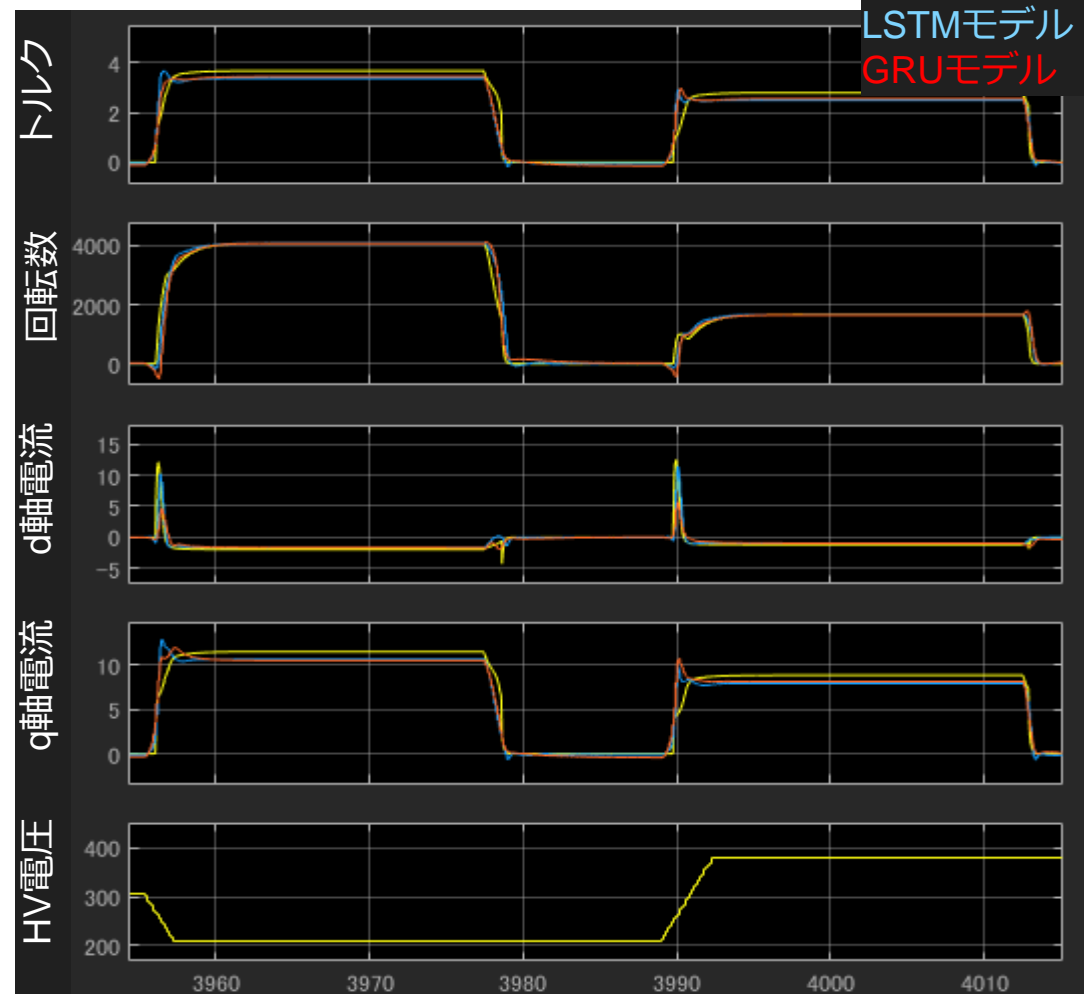
シミュレーションに要する時間の比較



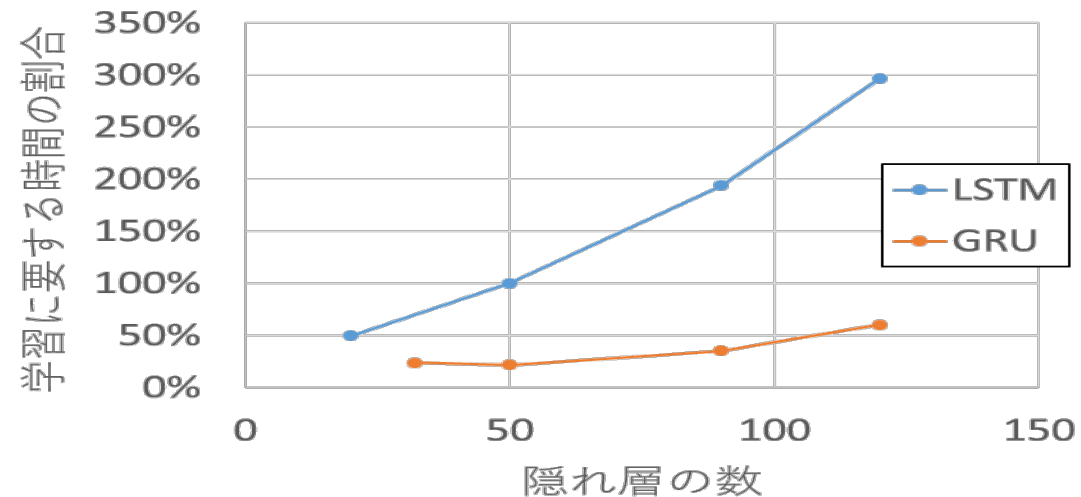
4. 事例紹介2 (フィードバック系全体のNN化)

◆学習アルゴリズムの比較

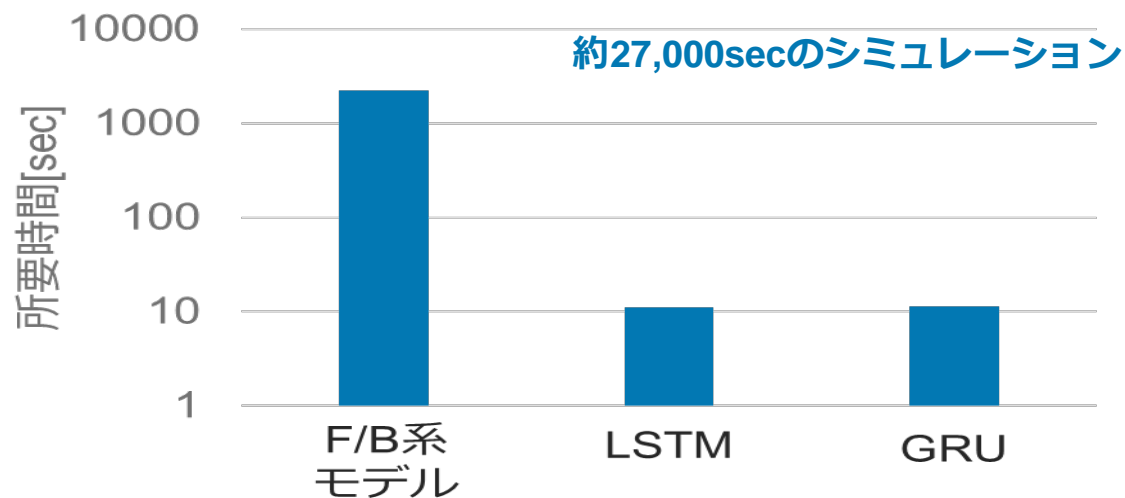
過渡応答結果の抜粋



学習に要する時間の比較



シミュレーションに要する時間の比較



Agenda

1. 会社概要
2. 取組みの背景
3. 事例紹介1
4. 事例紹介2
5. 最後に

5. 最後に

◆まとめ

- ニューラルネットワーク技術を活用してシステム検討に必要な高精度モデルが作成できた
- MKL-DNNを使用する事で劇的な高速化が実現できた
- 線形な教科書モデルだけでなく、コントローラを組み合わせたフィードバック制御系に対してもニューラルネットワーク技術を活用できた

◆今後の予定

- 実機データからサロゲートモデル作成を行い、
 - 机上モデルでは未考慮の振舞いを反映してさらなる高精度化をはかる
 - 因果関係とパラメータ推定が難しい熱や二相流体領域に対して適用

5. 最後に

◆ 業務を通して感じたこと

- ・ AIモデルでも制御工学の考え方は十分活用できる。
一方で、モノの動く原理・原則を十分に理解しないと結果は出ない
- ・ 量産開発の中で育つ感性と先行要素の中で育つ理論体系のバランスが重要。

◆ ツールメーカーへお願いしたい事

- ・ 新しいニューラルネットモデルへの対応と効果的なメモリの活用
- ・ MKL-DNNの環境を揃えるまでに苦労しました。
パッケージ化して配布して頂けるとありがたい。
 - 社内ネットワーク環境
 - リリースバージョン
 - サードパーティツール、環境変数

使用している製品

[MATLAB®](#)

[MATLAB® Coder™](#)

[Control System Toolbox™](#)

[Signal Processing Toolbox™](#)

[Deep Learning Toolbox™](#)

[Statistics and Machine Learning Toolbox™](#)

[MATLAB Coder Interface for Deep Learning Libraries](#)

[Simulink®](#)

[Stateflow®](#)

[Simulink® Coder™](#)

[Simscape™](#)

[Simscape™ Electrical™](#)

Let us Develop with Wisdom and Prosper in Harmony



The extensive mountains with lush greenery. The blue clear sky. A blue flash streaking far in the distance through such a beautiful scenery represents the Sanden-created 'comfort' that opens up a new era forever and ever.

