

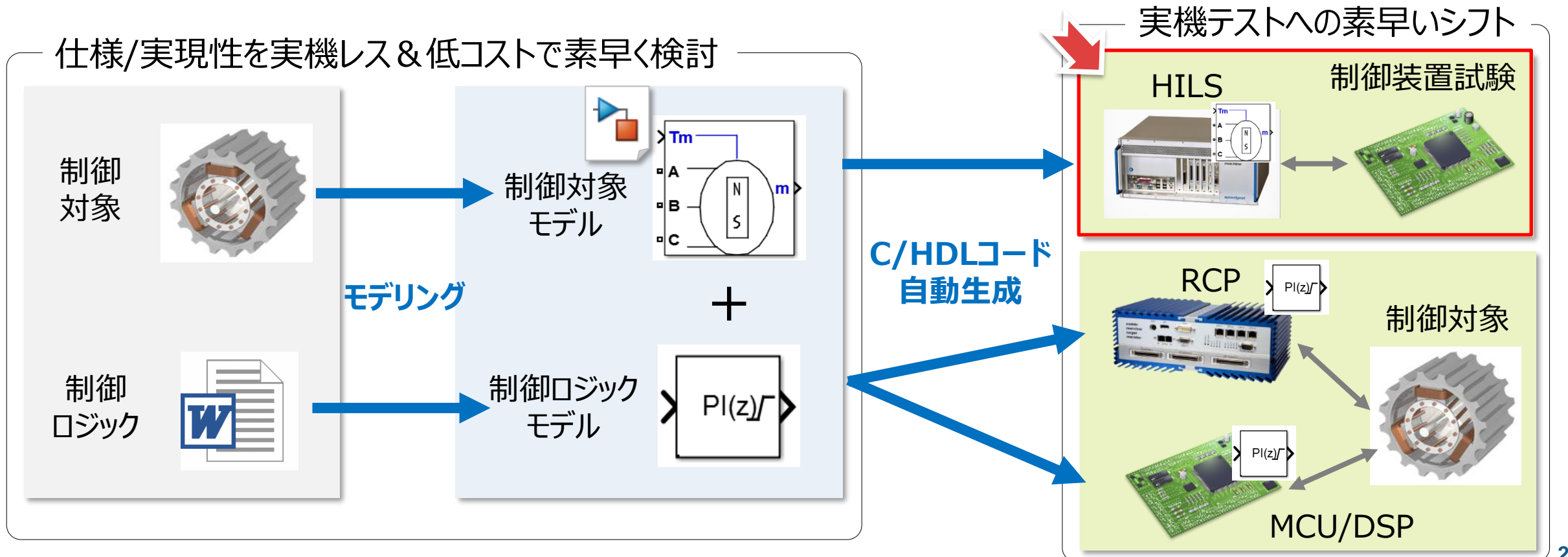
# ハードウェアインザループシミュレーション(HILS)による 量産/試作コントローラのテスト

MathWorks Japan  
アプリケーションエンジニアリング部 (制御)

R2017a

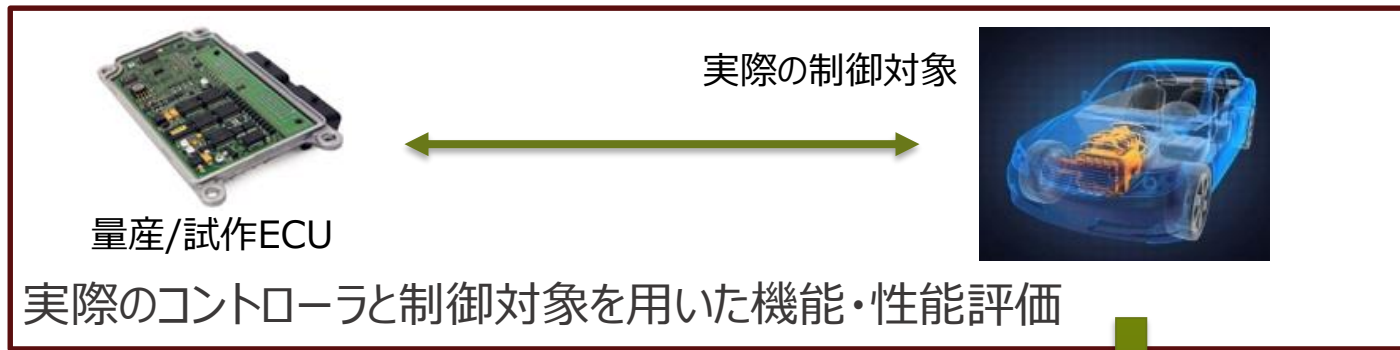
# モデルベースデザインが高機能・多機能化する製品の迅速な開発をサポート

- シミュレーションを通じた動作・性能検証とコード生成のテクノロジーを活用
  - ✓ シームレスな開発環境で素早い製品リリースを可能にします
  - ✓ 複雑な機能と高い信頼性を両立するためのテスト・検証ワークフローを実現します

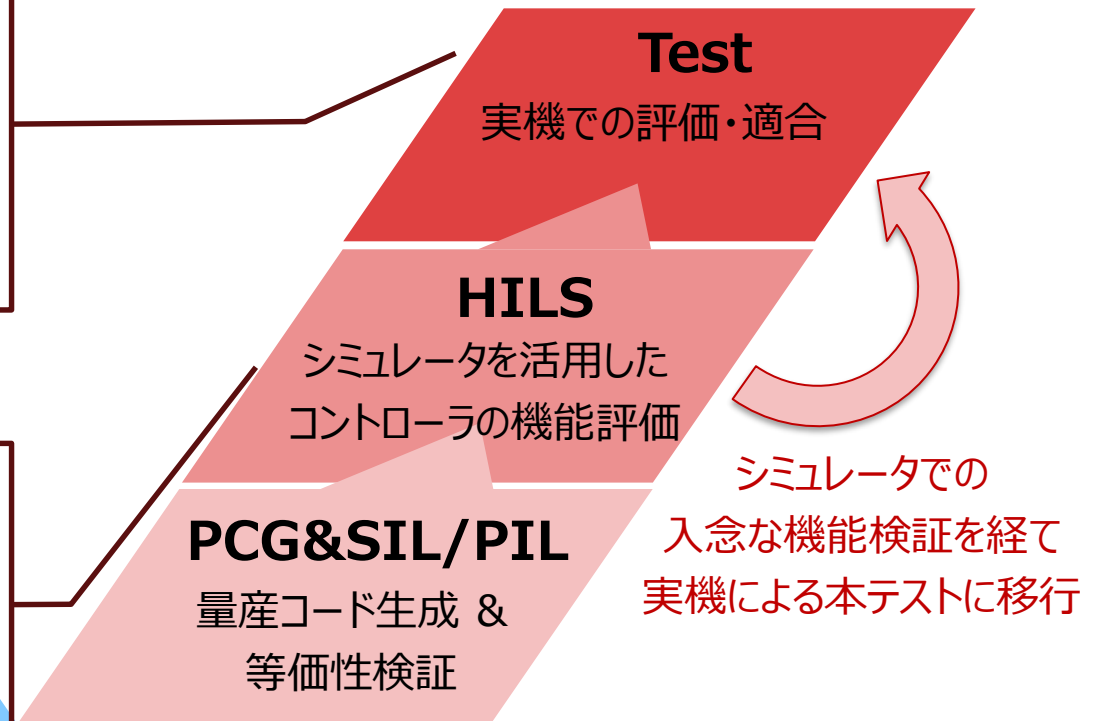


# HILS: Hardware-In-the-Loop Simulation

- 実装を終えた量産/試作コントローラを実機レスで詳細な機能チェック



実機挙動を再現したモデルをシミュレータに実装



## コンテンツ - Simulink Real-Time™によるHILS環境構築 -

- Simulink Real-Timeの主な機能とハードウェア構成
- MathWorksのプラントモデリングツールによるHILS環境構築
  - SimscapeによるプラントモデルのHILS実装
  - Powertrain Blocksetによる車両HILSの実装
- テストオートメーション
  - Simulink Test™を活用したテストの自動化
- まとめ

# RCP・HILSテスト環境 Simulink Real-Time™ / Speedgoat

- 専用ハードウェアを活用したRCP/HILSテスト環境
- I/Oドライバブロックの活用で各種I/Oへ簡単アクセス
- パラメータ適合・信号測定専用GUIを提供
- 演算高速化のための各種機能を提供 (マルチコア/FPGAによる計算処理)

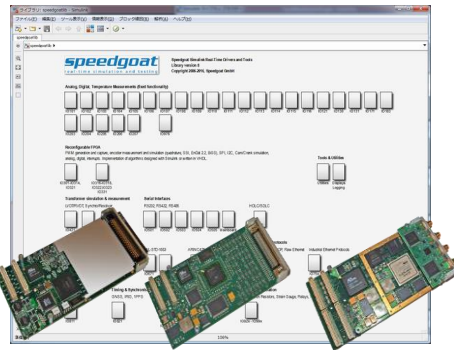
専用HW(Speedgoat)で  
モデルを実時間実行



# Simulink Real-Timeの主な機能

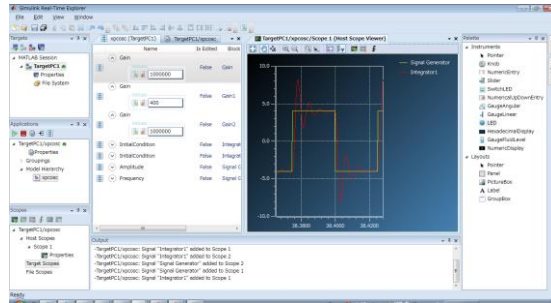
## 簡単なI/Oへのアクセス

ハードウェアアクセス用の  
ドライバブロックを提供



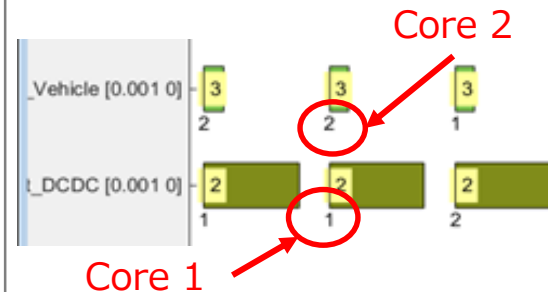
## 適合・測定用GUI

パラメータ調整・信号測定用  
GUIを標準で提供



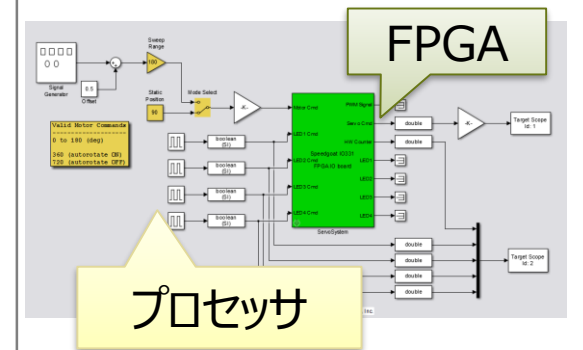
## マルチコア実行

サンプリング時間ごとに  
タスクとしてコア分散実行



## FPGA実装による高速化

HDL Coderで  
高速演算部分を実装



## ターゲットHW単独で可視化

ターゲットHW単独で  
可視化環境を提供



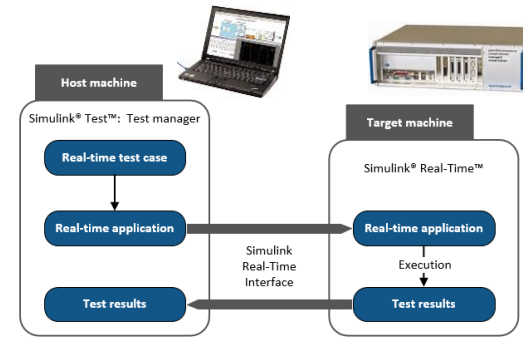
## アプリケーションの配布

適合用GUI含めた  
実行環境の配布



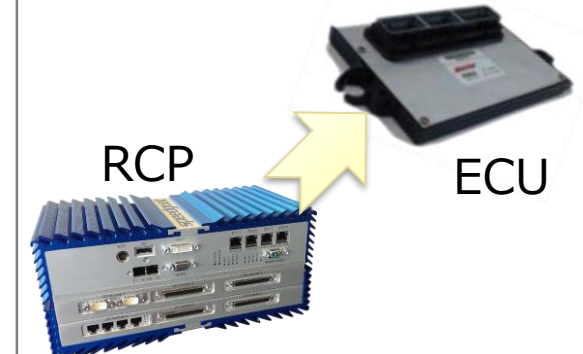
## テストの自動化

Simulink Testで  
テストシナリオを自動実行



## バイパス開発の環境

XCPで開発用ECUへの  
アルゴリズムを追加実装



# HILS環境で活用可能な機能およびツールチェーン

## データモニタ・パラメータ適合



MATLAB&Simulink および  
Simulink Real-Time Explorer

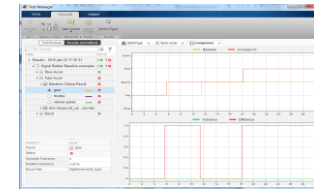


他社製適合ツール/  
ユーザー作成アプリ

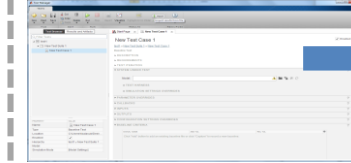
## テストシナリオの管理/結果の検証

### Simulink Test

#### テスト結果のレビュー



#### テスト項目の管理



## モデルのリアルタイム実行

専用HW Speedgoat (プロセッサボード+IOボード)

FPGA搭載IOボード

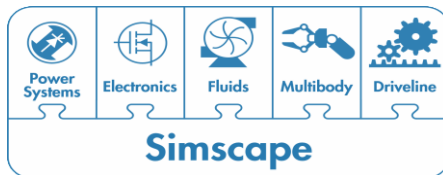


Simulink Real-Timeが  
標準で提供する機能

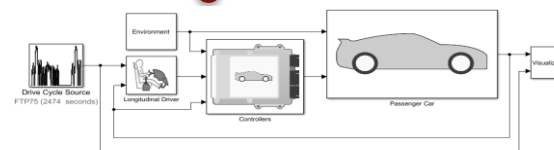
HDL Coder (※)

MATLAB Coder / Simulink Coder

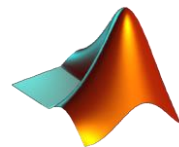
## モデリング



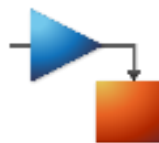
Simscape



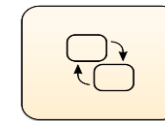
Powertrain Blockset



MATLAB



Simulink



Stateflow

※ Simscape・Powertrain Blocksetは、HDL CoderによるHDLコード生成には対応していません

# Speedgoatのハードウェアバリエーション

## Performance



**プロセッサ** Intel Core i7 3.5GHz (4 core)

**メモリ/HDD** 4GB / 64GB-SSD

### 用途/特徴

- ラボ向け据え置き型筐体
- HIL/RCP用途
- ハイスペックなプロセッサを活用して演算負荷の大きいプラントモデルを実行

## Mobile



**プロセッサ** Intel Core i7 2.5GHz (2 core)

**メモリ/HDD** 4GB / 64GB-SSD

### 用途/特徴

- フィールド・車載テスト向けハードウェア
- RCP用途
- 省スペース/CPUパフォーマンスのバランス型
- ファンレス仕様

## Baseline



**プロセッサ** Intel Quad Core 2GHz

**メモリ/HDD** 4GB / 64GB-SSD

### 用途/特徴

- 小型のエントリーモデル
- RCP用途 (バイパス開発)
- コンパクトなハードウェア構成  
19cm(幅)×19cm(奥行)×8cm(高さ)  
(拡張スロット無しの場合のサイズの目安)



# HIL環境で利用可能なI/O構成

## アナログ・デジタル

- 豊富な入出力用途を持ったI/Oモジュールラインナップ
- 集積度の高いコネクタで数多くのチャンネル数を提供
- ターミナルボード・ブレイクアウトパネル

## エンコーダのエミュレーション

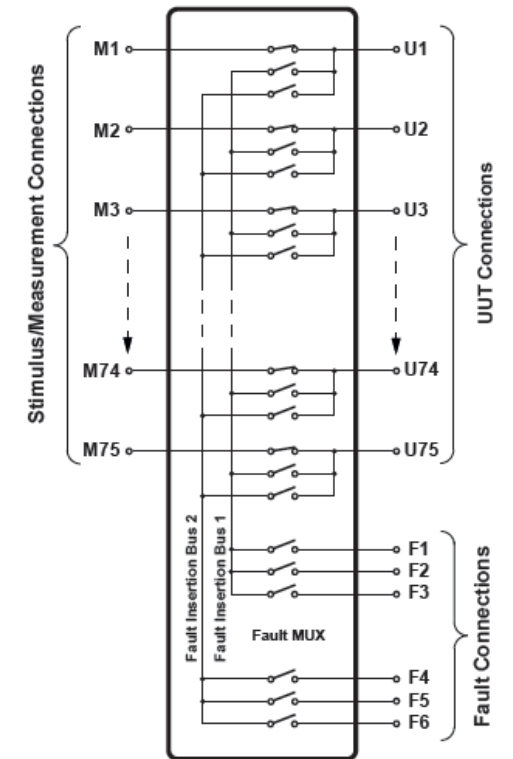
- アbsolute / インクリメンタル、ホールセンサ
- EnDat, BiSS
- シンクロ / レゾルバ, LVDT/RVDT
- カム / クランク

## 受動素子のエミュレーション

- 精密抵抗 (熱伝対 / RTD)
- ポテンシオメータ
- リードリレー
- 歪みゲージ、圧力センサ

## 故障挿入 (Fault insertion)

- 幅広いチャンネル数とフォルトバスの設定
- 安全が最優先されるアプリケーションの検証



# HIL環境で利用可能な通信プロトコル



## 一般的な製品開発

- Serial RS232, RS422, RS485, SDLC, HDLC
- UDP / TCP
- CAN / SAE J1939
- SPI Master and Slave
- I2C Master and Slave
- Shared/reflective memory (ScramNet GT / 5565PIORC)
- IRIG with GPS
- Precision Time Protocol (PTP)



## 産業オートメーション

- Profinet Controller (Master)
- Profinet Device (Slave)
- Modbus/TCP Client (Master)
- Modbus/TCP Server (Slave)
- Modbus RTU
- Profibus Master
- Profibus Slave
- EtherCAT Master
- EtherCAT Slave
- EtherNet/IP Scanner
- EtherNet/IP Adapter
- POWERLINK Controlled Node (Slave)



## 自動車

- XCP Master/Slave (CANape/INCA)
- CAN / SAE J1939
- LIN 2.1
- FlexRay
- Cam / Crank



## 航空宇宙

- ARINC 429
- ARINC 629
- ARINC 664P7/AFDX
- MIL-STD-1553

## コンテンツ - Simulink Real-Time™によるHILS環境構築 -

- Simulink Real-Timeの主な機能とハードウェア構成
- MathWorksのプラントモデリングツールによるHILS環境構築
  - SimscapeによるプラントモデルのHILS実装
  - Powertrain Blocksetによる車両HILSの実装
- テストオートメーション
  - Simulink Test™を活用したテストの自動化
- まとめ

# HILシミュレータの構築のためのプラントモデリングアプローチ

- 目的やアプローチに応じて、コード生成に対応した様々なプラントモデリング手法を提供

### Simulinkによる 数式・実験データのモデリング

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{1}{L}(V_{dc} - Ri - V_c) \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C}i \end{cases}$$

**Simulink**

### マルチドメイン・プラントモデリング

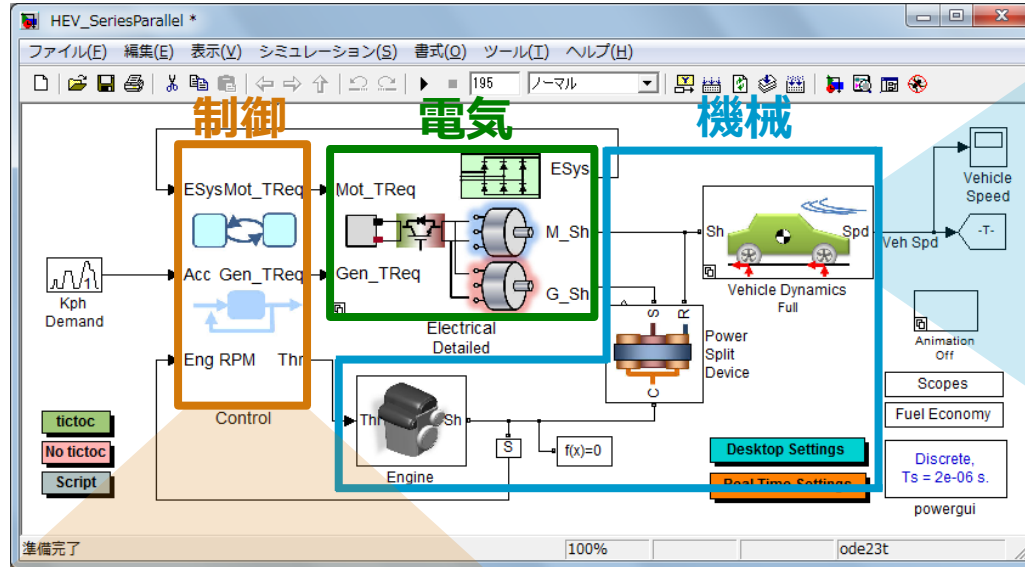
**Simscape**

### パワートレイン・モデリング

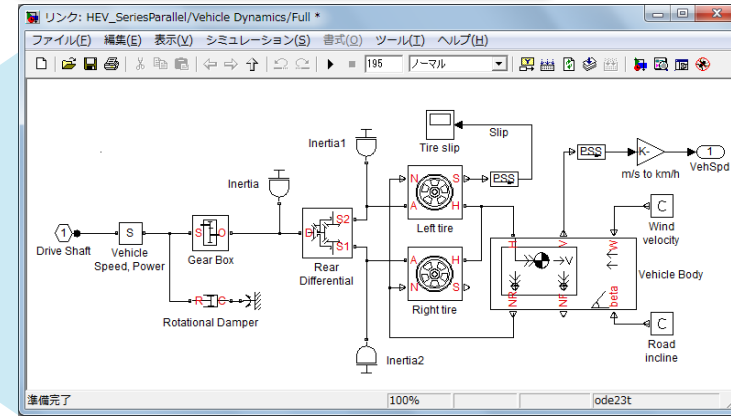
**Powertrain Blockset**

# Simscapeによるマルチドメイン物理システムのモデリング例

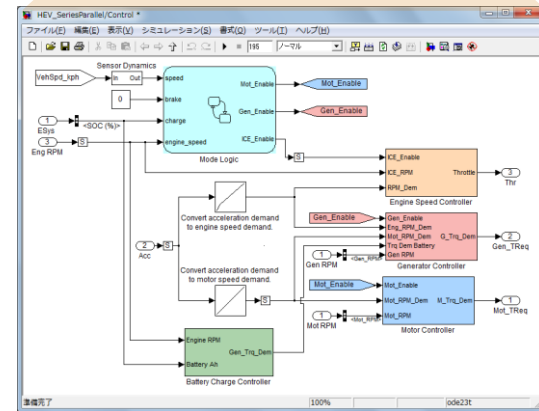
## ハイブリッド自動車



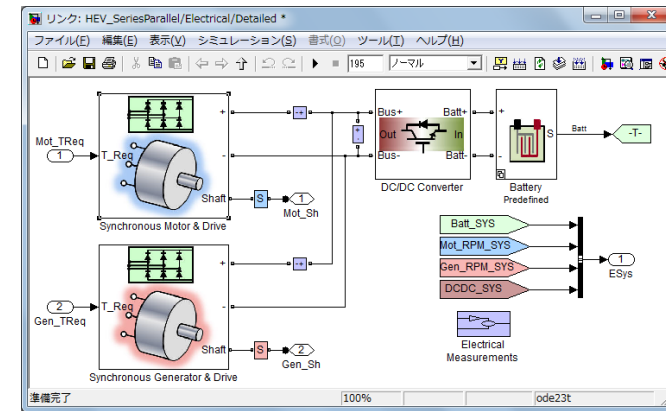
## Simscape Driveline 機械系モデル



ギア・差動ギア・タイヤ・車両ボディ  
エンジン・遊星ギア



## SimulinkとStateflowによる制御ロジック



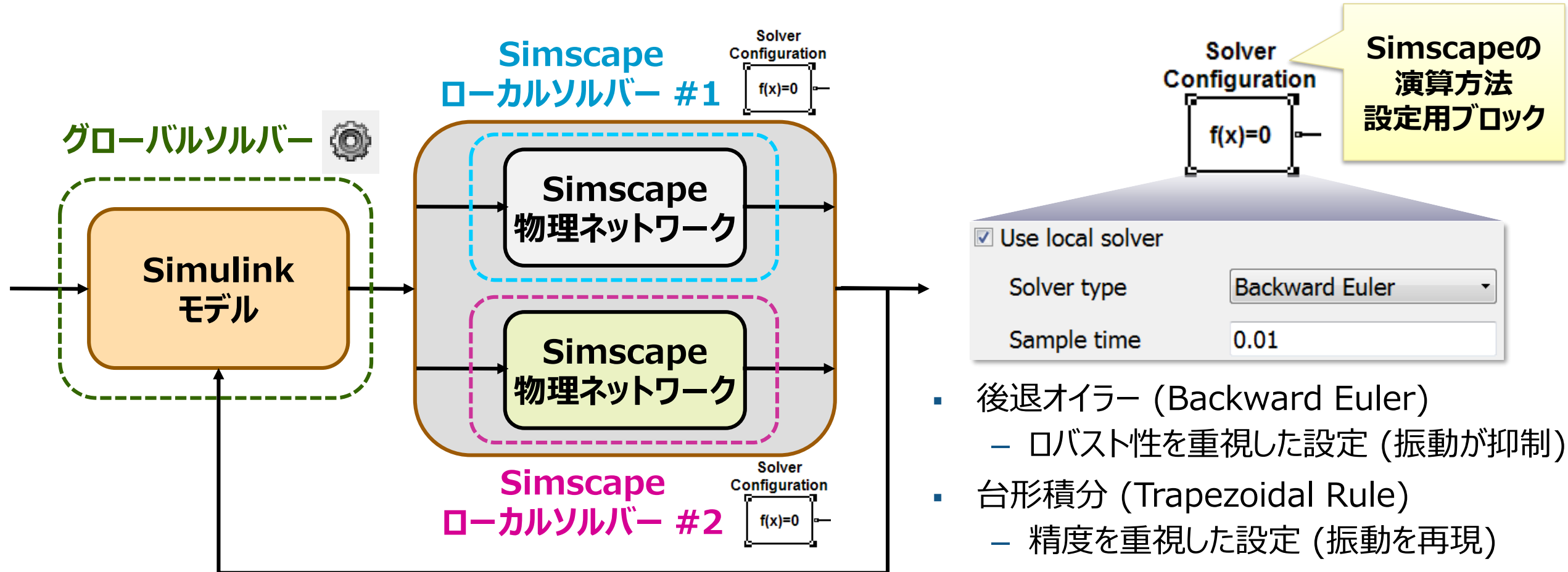
## Simscape PowerSystems

## 電気系モデル

- 三相モータ
- 三相発電機
- 三相インバータ
- DC/DCコンバータ
- バッテリー

# 物理モデリングのローカルソルバーとモデルのパーティショニング

- Simscapeはネットワークの分割とそれぞれの演算方法(解法)の指定が可能です
  - 精度を考慮しながら演算負荷のある程度の調整が可能です

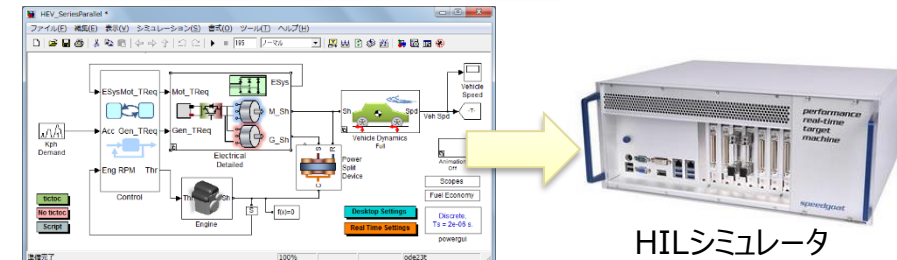
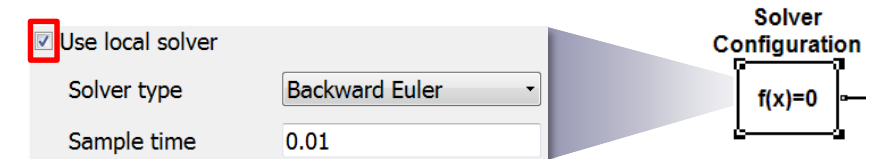


- 後退オイラー (Backward Euler)
  - ロバスト性を重視した設定 (振動が抑制)
- 台形積分 (Trapezoidal Rule)
  - 精度を重視した設定 (振動を再現)

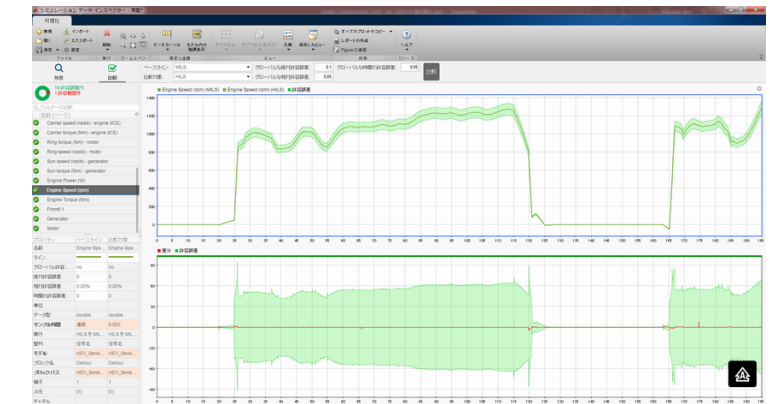
# Simscapeで構成されたモデルのHILS実装

Demo Movie

- SimscapeでデザインしたHEVモデルをHILS環境にビルド
  - SimscapeローカルソルバーONで固定ステップ演算として実装
  - 実行スピードとシミュレーション精度のトレードオフを検証
    - SimulinkのSimulation Data InspectorでHILSテストの結果をMILSと比較



固定ステップ実行に設定して実装



MILSとHILSの結果を比較

# SimscapeはR2016aで高速化

## コード生成とローカルソルバの併用で、最大5倍の高速化

シミュレーションタイプ°	R2015b 所要時間	R2016a 所要時間	速度向上
Desktop simulation	10.4 s	8.0 s	<b>1.3 倍</b>
Simulink Coder™ Rapid Simulation Target (RSim)	12.2 s	6.1 s	<b>2.0 倍</b>
Simulink Coder (GRT) with local solver	15.2 s	3.1 s	<b>4.9 倍</b>

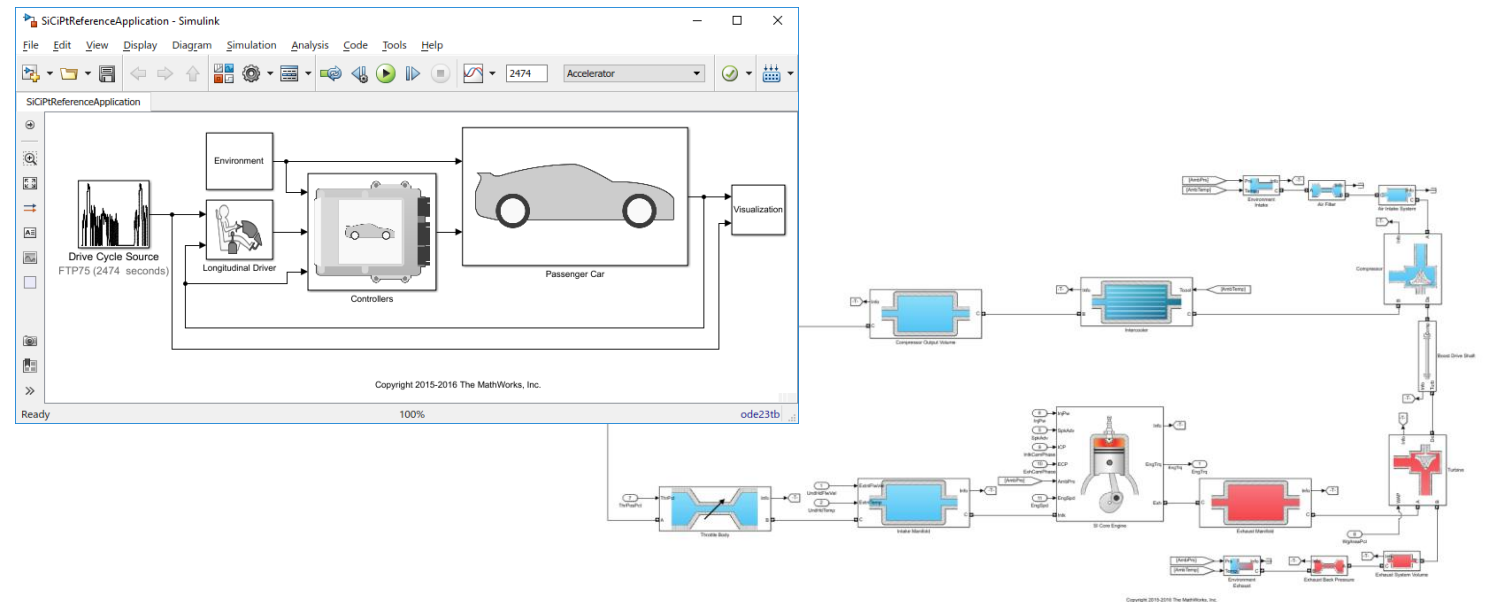
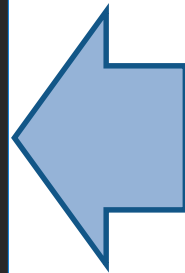
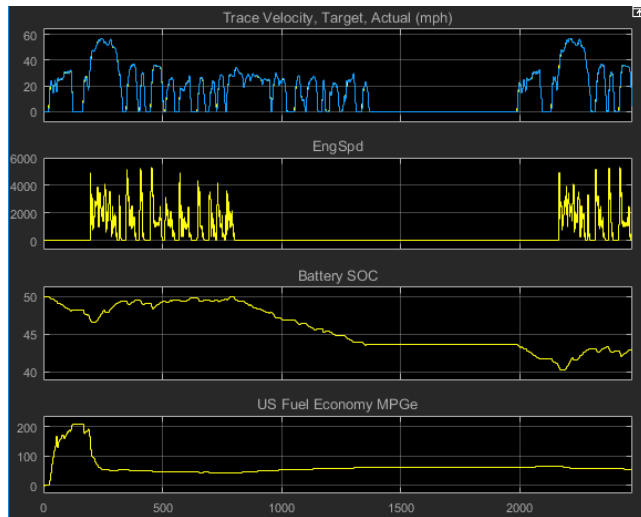
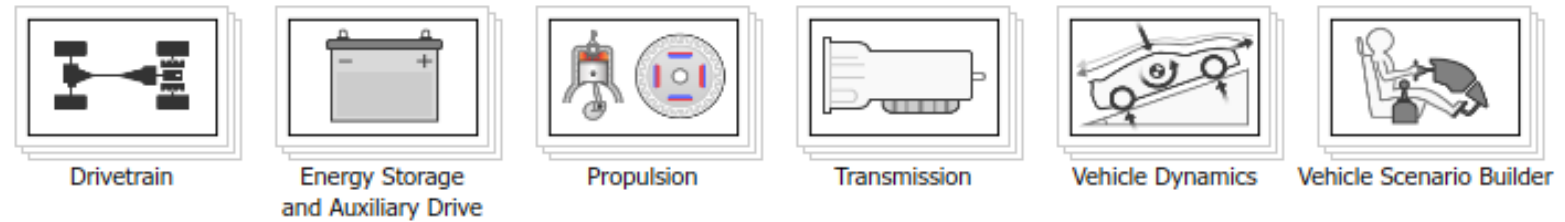
(例：約200ノードの中型電気ネットワークモデルのベンチマーク結果)

⇒ 計算速度が重視されるHILSでの適用可能範囲も広がりました



# Simulinkベースのパワートレインプラントモデル Powertrain Blockset

- 汎用のパワートレインによるフルビークルモデル：
  - 汎用エンジン (Spark Ignition / Compression Ignition)
  - EV
  - マルチモードHEV
- オープンかつカスタマイズ可能
- 実時間を上回る実行速度



# Powertrain Blocksetのリアルタイム実行時のベンチマーク

- Simulinkベースでモデリングされているため高速な演算が可能です

## Conventional Vehicle

Engine type	Average Turnaround (s)	Maximum Turnaround (s)
SI	15.3E-6	19.2E-6
SI Mapped	09.6E-6	11.1E-6
CI	14.9E-6	17.8E-6
CI Mapped	09.7E-6	16.4E-6

## Electric Vehicle

Engine type	Average Turnaround (s)	Maximum Turnaround (s)
Dynamic	07.4E-6	09.9E-6
Mapped	07.7E-6	10.5E-6

- テスト環境のスペック
  - CL630 ATX mainboard
  - Intel Core i7 3.5 GHz CPU
  - 4GB DDR3 RAM (2x2GB)
  - 60GB SSD
- Simulinkソルバー
  - ode4 with FixedStep of 0.001 sec.

## コンテンツ - Simulink Real-Time™によるHILS環境構築 -

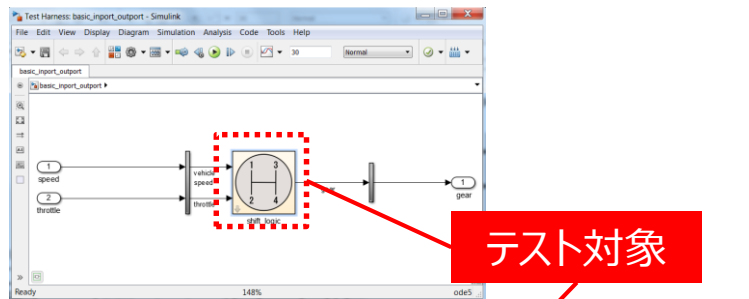
- Simulink Real-Timeの主な機能とハードウェア構成
- MathWorksのプラントモデリングツールによるHILS環境構築
  - SimscapeによるプラントモデルのHILS実装
  - Powertrain Blocksetによる車両HILSの実装
- テストオートメーション
  - Simulink Test™を活用したテストの自動化
- まとめ

# Simulink Testが提供する主な機能

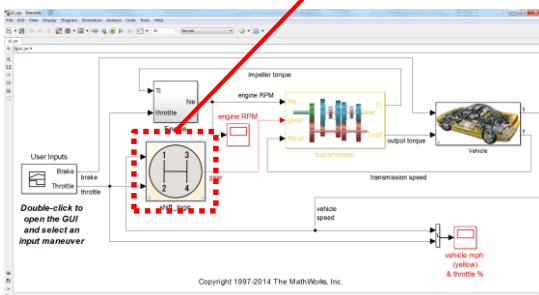
## テストハーネス作成

モデル全体・サブシステム単体・参照モデルに対して複数のテストハーネス(テスト用モデル)を簡単定義

### テストハーネス



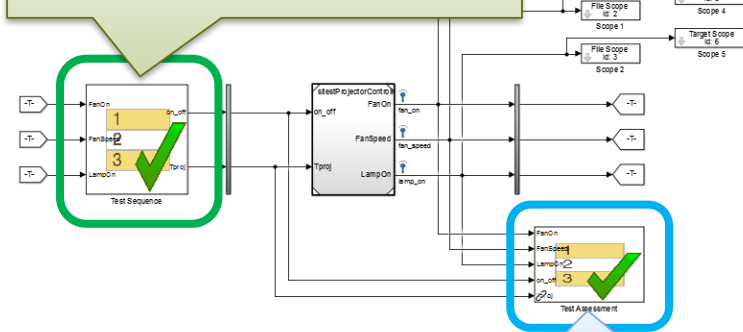
### メインモデル



## テスト信号作成/検証自動化

専用ライブラリブロックの活用で複雑なテスト信号作成とテスト結果の検証自動化が可能

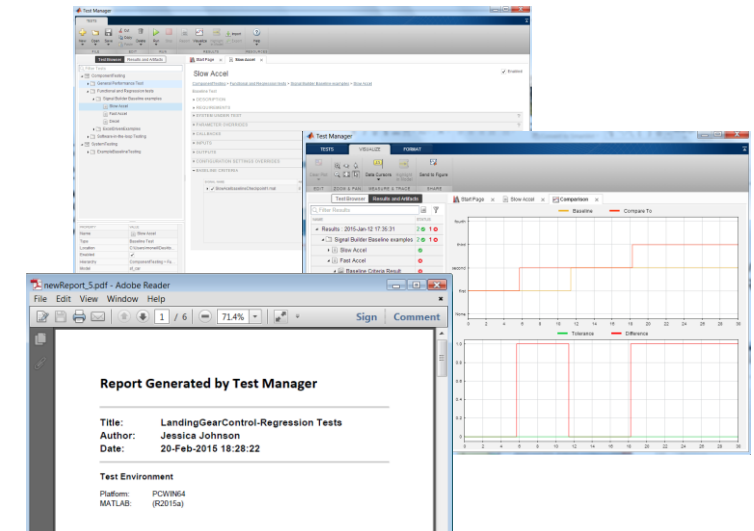
### テストパターン作成ライブラリ (Test Sequenceブロック)



### テスト結果評価ライブラリ (Test Assessmentブロック)

## 定型テストの自動化

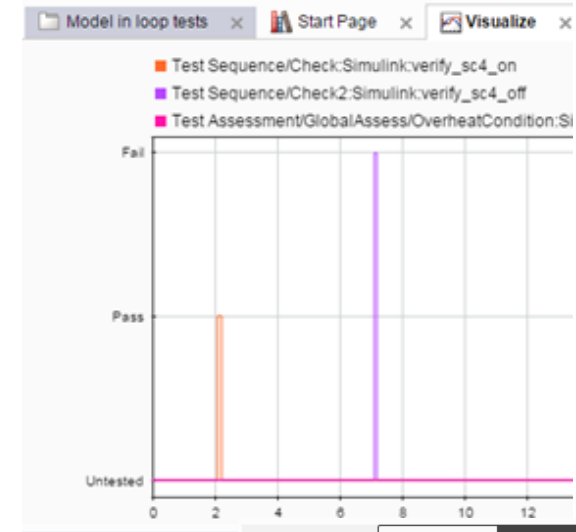
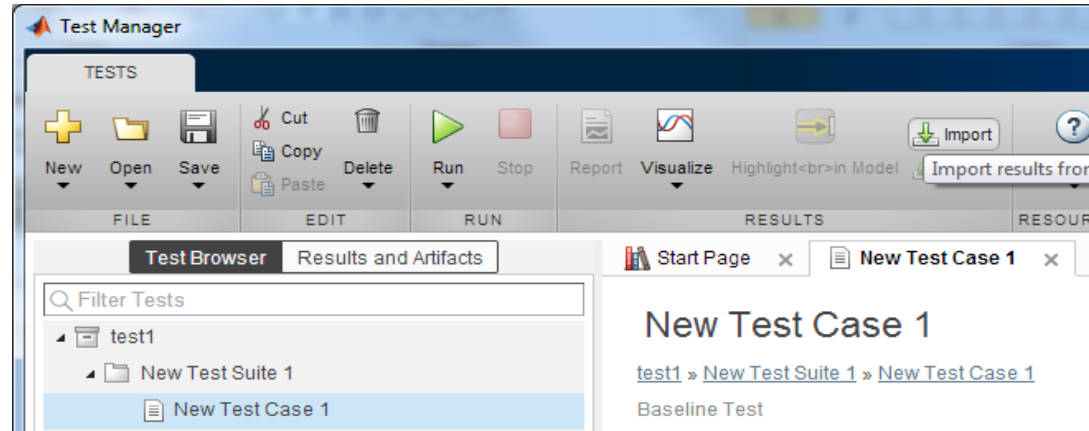
テストマネージャーによるMIL/SIL/PIL/HILテストの自動化・レポート作成・テスト管理



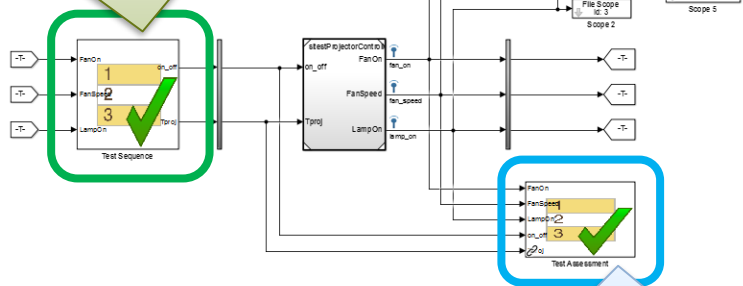
(テスト対象としてモデル全体 or テストハーネスを指定可能)

# Simulink TestによるHILテストの実行の自動化

1 テストマネージャーに  
テスト項目を登録



テストパターン作成ライブラリ  
(Test Sequenceブロック)



テスト結果評価ライブラリ  
(Test Assesmentブロック)

2 HILアプリケーションを  
ダウンロード

4 検証結果の  
収集

5 テスト結果の  
確認・検証



HILハードウェア



評価対象の  
コントローラ

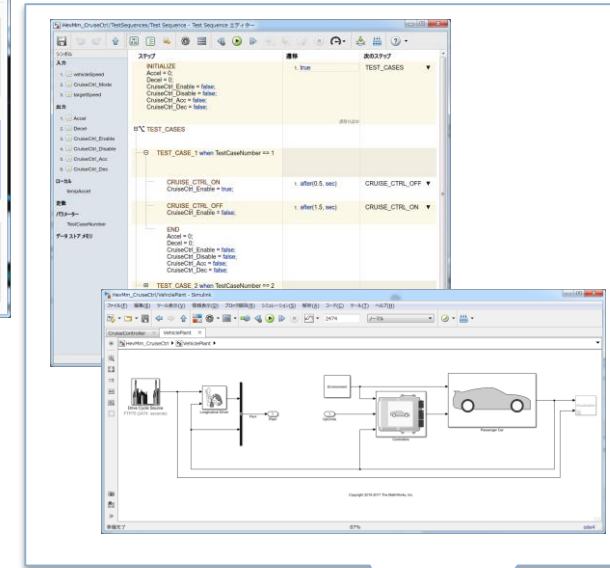
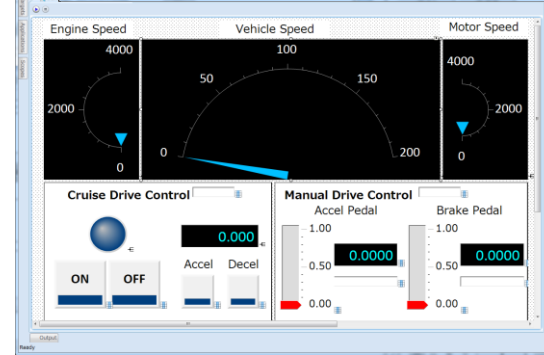
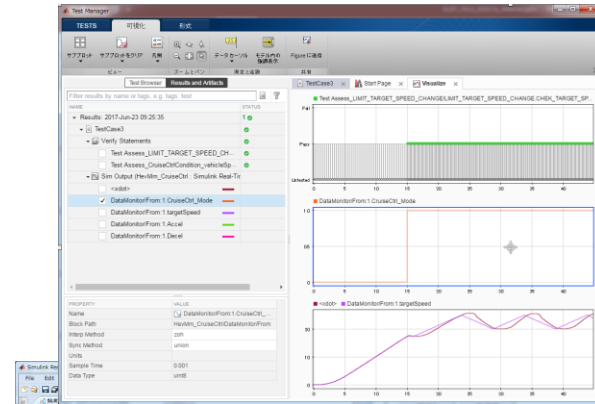
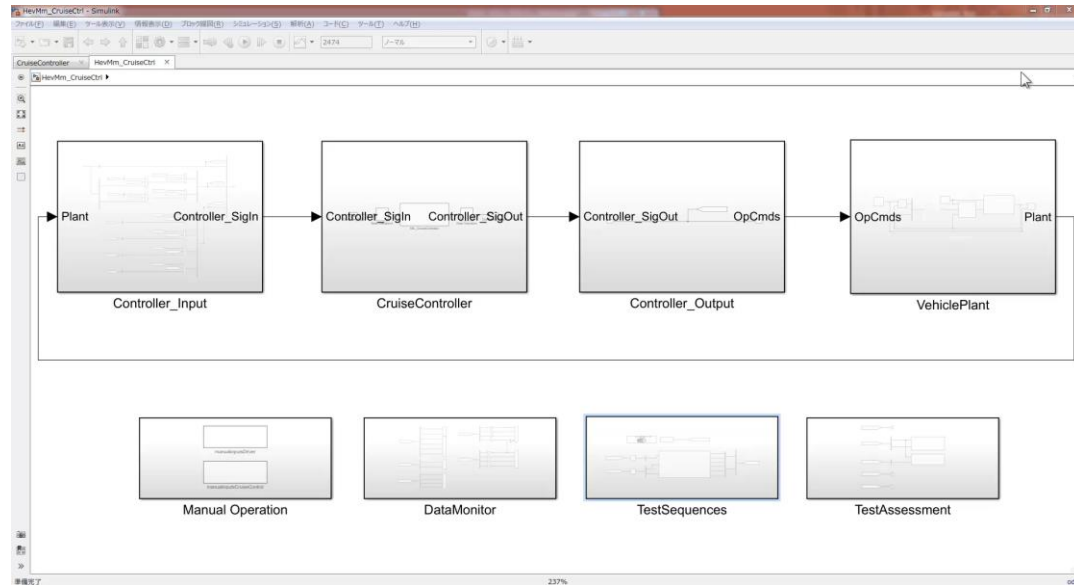
3 HILSによるテストの実施

NAME	STATUS
RTT req scenario 4	✗
Verify Statements	✗
Test Sequence/Check:Simulink:verify_sc4_on	✓
Test Sequence/Check2:Simulink:verify_sc4_off	✗
Test Assessment/GlobalAssess/OverheatCondition:Si	✓
Test Assessment/GlobalAsses...	✗
Test Assessment/GlobalAsses...	✗
Test Assessment/GlobalAsses...	✓
Sim Output (sltestProjectorControl : )	

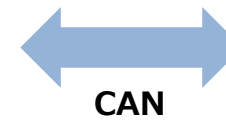
# Simulink Real-Time & Simulink Testによる自動テスト

Demo Movie

- クルーズコントロールのアルゴリズムのチェック
  - クルーズ走行をコントローラがCAN経由で指令
  - 車両モデルはPowertrain Blocksetを利用
  - Simulink Testでテスト実行
    - テストマネージャーによるテスト実行管理・結果のレビュー
    - Test Sequence / Test Assessmentブロックによるテスト信号作成・結果判定自動化



コントローラ



HILシミュレータ

# Simulink Testのテストマネージャー

- テスト項目の管理・結果確認のための各種インターフェイスを提供します
  - テストマネージャーの設定は.mldatxファイル
  - Simulinkエディタメニュー→[解析]→[テストマネージャー]

## テスト項目の作成

**Test File**  
Create a blank test file

**Test Suite**  
Create a container for test cases

**TEST CASE TEMPLATES**

**Baseline Test**  
Compare simulation output to a fixed baseline signal

**Equivalence Test**  
Compare output of two simulations

**Simulation Test**  
Perform a simulation with no criteria

**Real-Time Test**  
Perform a simulation on real-time target

**AUTO CREATE**

**Test File from Model**  
Create a test file from model

**Test for Subsystem**  
Create a new baseline, equivalence, or simulation test for subsystem

## テストの実施/結果の可視化

## テスト内容の設定

▼ SYSTEM UNDER TEST

Model: sf\_car テスト対象のモデルの指定

▼ TEST HARNESS

Harness: sf\_car\_Harness1 テストハーネスの指定

▶ SIMULATION SETTINGS OVERRIDE

▼ PARAMETER OVERRIDES

PARAMETER SET / WORKSPACE

▼  Parameter Set 1

WAIT 2 テスト実施時のパラメータリスト

▼ ITERATIONS

▼ TABLE ITERATIONS

NAME	DESCRIPTION	SIGNAL BUILDER GROUP	PARAMETER SET
<input checked="" type="checkbox"/> Iteration	None	[Default] None	Parameter Set 1
<input checked="" type="checkbox"/> Iteration1	None	[Default] None	Parameter Set 2
<input checked="" type="checkbox"/> Iteration2	None	[Default] None	Parameter Set 3

繰り返しシミュレーション実施時のパラメータリスト設定

■ SimulinkTest File

SLT\_sample\_sldemo\_absbrake.mldatx

# 入出力信号も考慮したテストパターンの作成

- Test Sequenceブロックで任意の信号作成が可能です
- 動的なテストシグナルの生成も可能

実行中に変化する別の信号も利用できます



テスト信号

2秒以降gearが3になるまで傾き2の単調増加

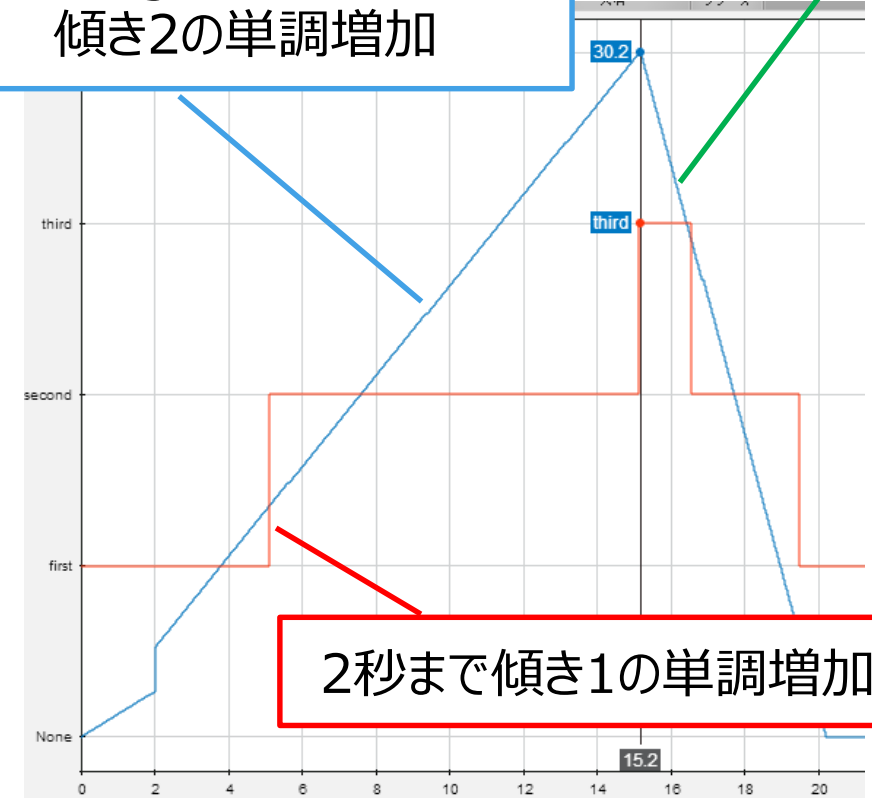
3になれば、傾き6の単調減少

処理内容

ステップの遷移条件

次のステップ

Step	Transition	Next Step
init_step speed = ramp (t); throttle = ramp (t);	1. after (2, sec)	step_2
step_2 speed = 2* ramp (t); throttle = 2* ramp (t);  peak_speed = speed; peak_throttle = throttle;	1. gear == 3	step_3



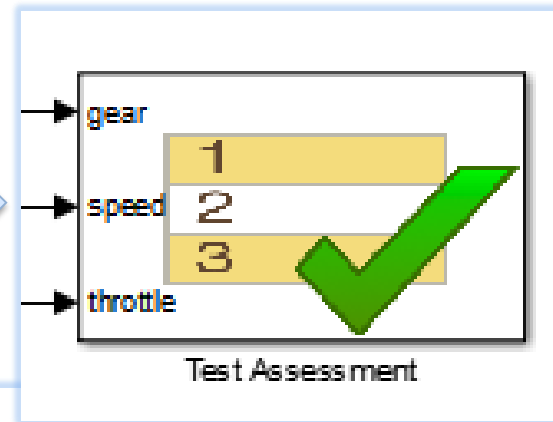
2秒まで傾き1の単調増加



# シミュレーション結果に対するチェックの定型化

- Test Assessmentブロックでシミュレーション結果に対する評価が行えます
  - テストシナリオを実行した際の結果判定の条件を記載

演算結果を入力



Verifyコマンドの引数として  
結果の判定基準を記述

```
GlobalAssess
  verify(~LampOn == true || FanOn == true,
    'Simulink:verify_lamp_implies_fan',...
    'Fan must be on if lamp is on');

  OverheatCondition when Tproj > 65
    verify(LampOn == false &&...
      FanOn == true && FanSpeed == High,...
      'Simulink:verify_overheat',...
      'In overheat condition lamp must be off and fan high');
```

When構文で  
特定条件のみ  
判定する表現も可能

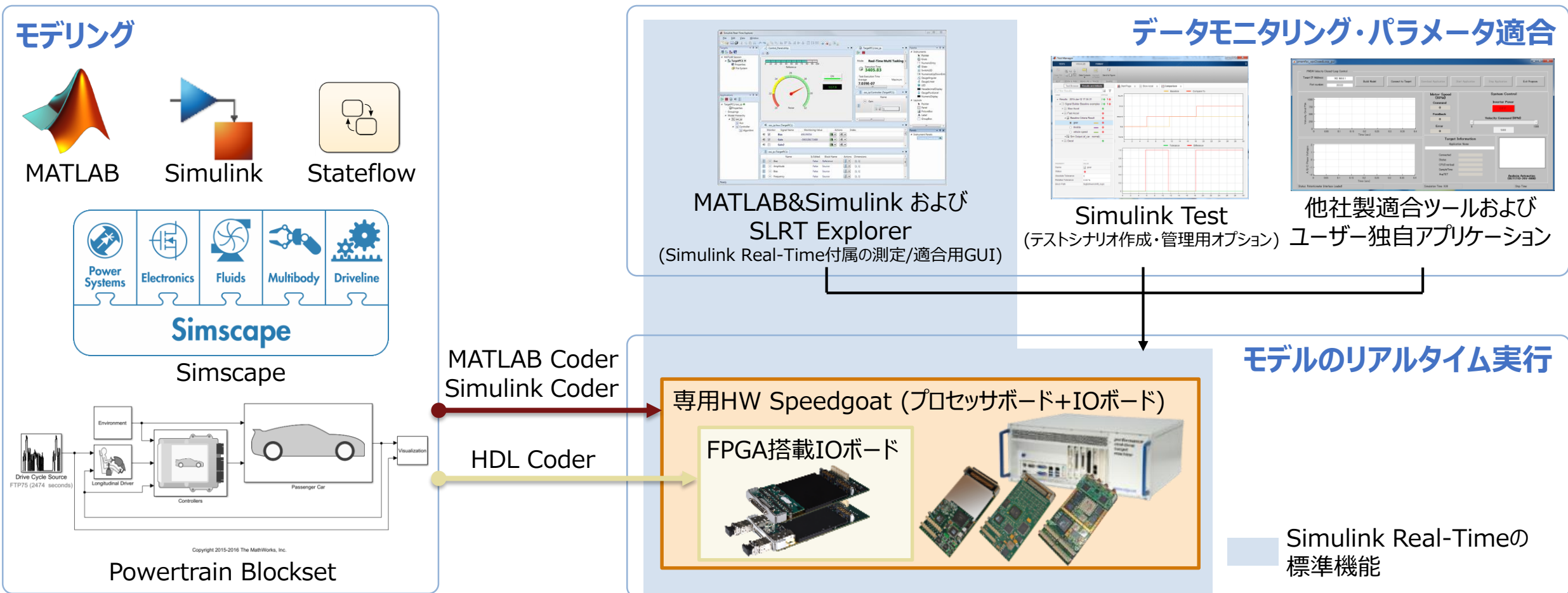


## コンテンツ - Simulink Real-Time™によるHILS環境構築 -

- Simulink Real-Timeの主な機能とハードウェア構成
  - MathWorksのプラントモデリングツールによるHILS環境構築
    - SimscapeによるプラントモデルのHILS実装
    - Powertrain Blocksetによる車両HILSの実装
  - テストオートメーション
    - Simulink Test™を活用したテストの自動化
- まとめ

# MathWorksのツールチェーンでシンプルにRCP環境を構築できます

- 様々なツールの互換性を気にせず、Simulinkをベースにスムーズにテスト環境を構築
- MATLAB&Simulinkの最新機能といち早く連携が可能です



## ご興味のあるお客様は是非MathWorksにお問い合わせ下さい

- 環境構築のご検討の際にはMathWorksにご相談下さい
  - MATLAB&Simulinkはじめ各種ツール:
    - ✓ トライアルライセンス(1ヶ月)でご評価いただけます
  - Simulink Real-Time:
    - ✓ 評価用ハードウェアのお貸し出しが可能です

シミュレーションだけでなく、  
実機テストフェーズでも  
MATLAB&Simulinkを  
是非ご活用下さい！



<お問い合わせ先>

御社営業担当 または MathWorksウェブサイト

[http://jp.mathworks.com/company/aboutus/contact\\_us/index.html](http://jp.mathworks.com/company/aboutus/contact_us/index.html)



Accelerating the pace of engineering and science

© 2017 The MathWorks, Inc. MATLAB and Simulink are registered trademarks of The MathWorks, Inc. See [www.mathworks.com/trademarks](http://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.

# 参考情報

# User Story: Gulfstream Aerospace, USA

## Hardware-in-the-Loop Simulation of Aircraft Engines



Gulfstream Aerospace Corporation (GAC), located in Savannah GA, USA, produces high-end civilian business jets.

MathWorks and Speedgoat are providing a complete Hardware-in-the-Loop solution to simulate two interconnected engines, tested against the full authority digital engine controller (FADEC).



Gulfstream®

Gulfstream G650 business jet

# User Story: AGCO, Germany/France/Finland

## Hardware-in-the-Loop Simulation of Tractors and Agricultural Machinery



- Automated testing of controllers for tractors and other agricultural machinery using Hardware-in-the-Loop test benches
- Drivetrain and engine models
- Implement a complete testing solution
- Improving the quality of the final product



“Speedgoat systems offer state of the art performance with application level support included, enabling detailed modeling of the tractor environment for ECU testing and development”

*Jürgen Weinbuch, AGCO Fendt*