

電動ビークルのエネマネ開発のシミュレーション技術 ～ マルチドメインのシステム全体を考慮した机上検証

MathWorks Japan
アプリケーションエンジニアリング部
福井 慶一



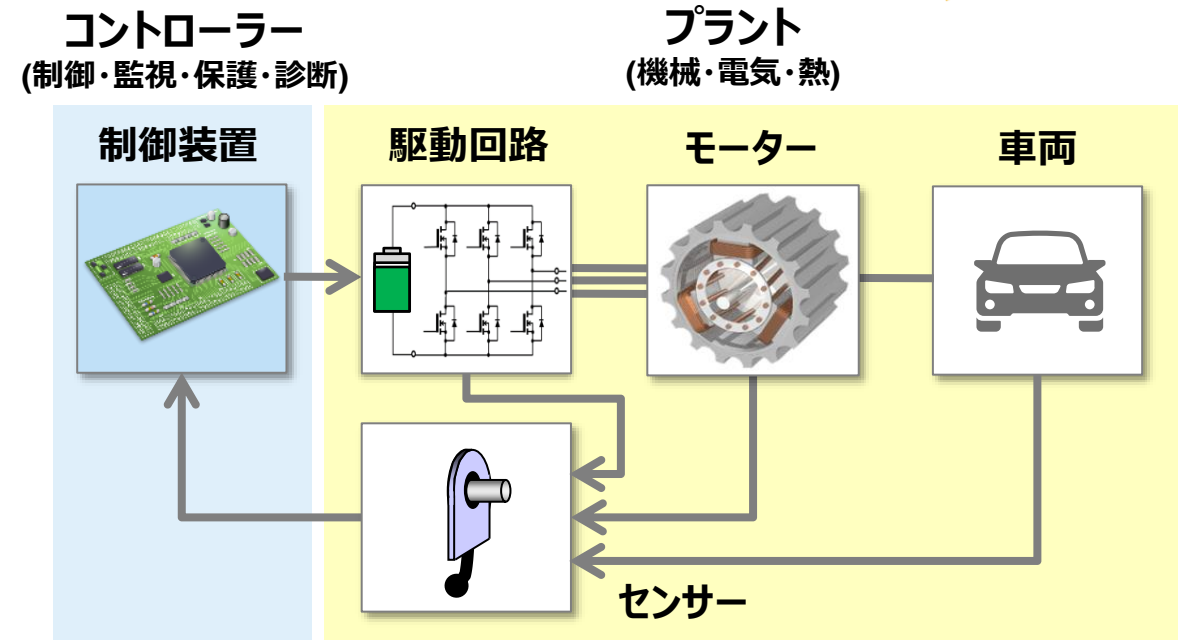
はじめに

本セッションの対象者

- 電動ビークルの機能・性能検討をしたい
(例: 走行モードに応じたEVの消費電力・電費・SOCの計算)
- 電動ビークルのエネマネ制御をしたい
(例: EVの航続距離を向上させる充放電・回生制御の設計)

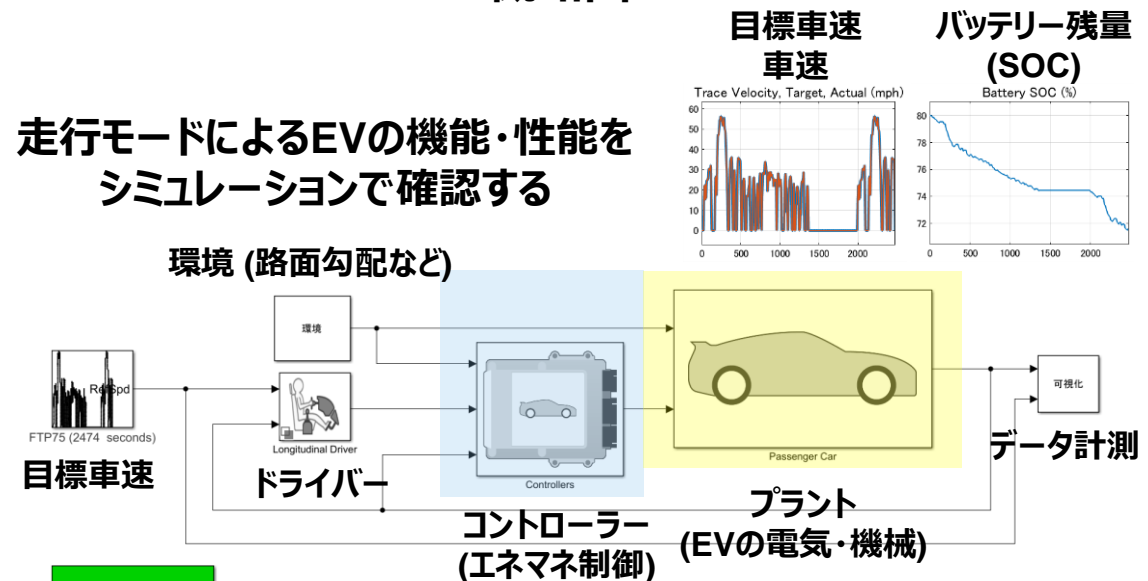
本セッションでお伝えしたいこと

- MATLAB製品を活用した
電動ビークルのシミュレーション適用例
 - 主に、EVを例題に紹介
 - 補足で、HEV、電動航空機、電動船舶も紹介



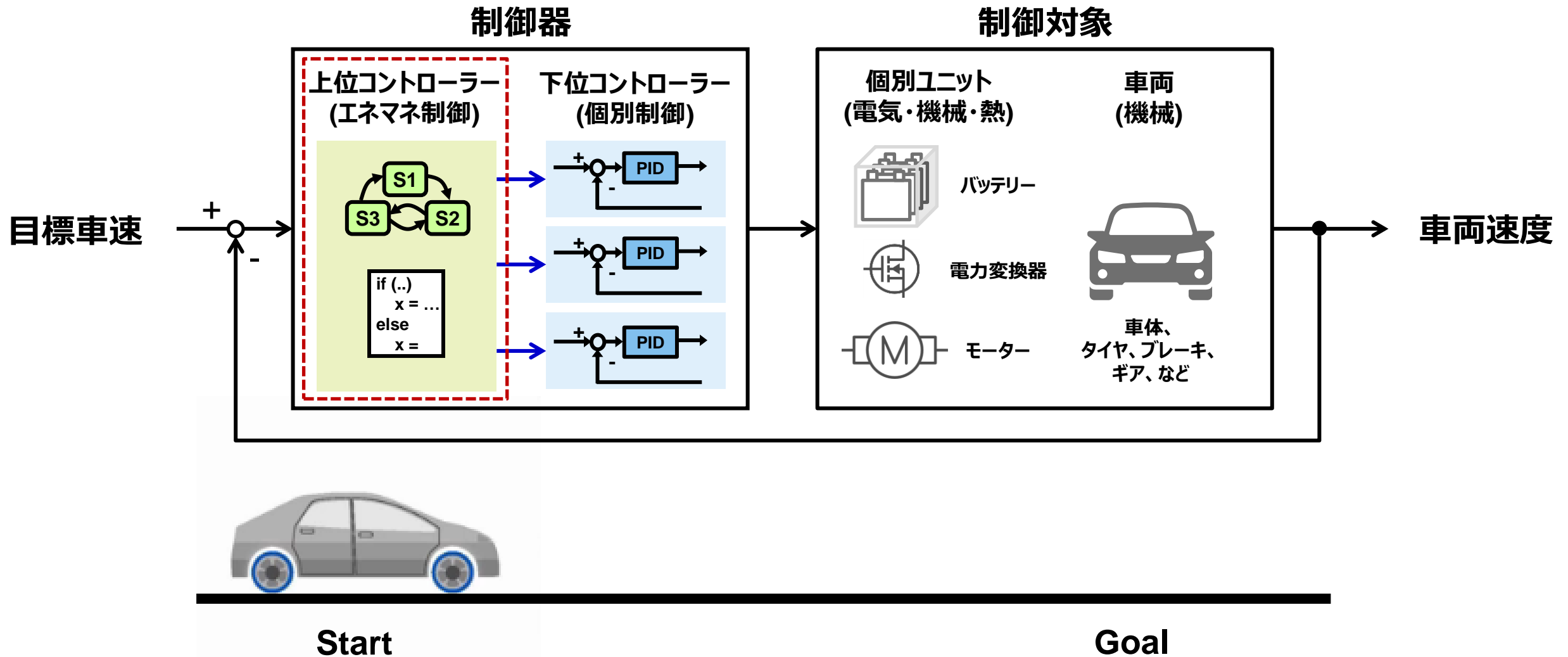
概略図

走行モードによるEVの機能・性能を
シミュレーションで確認する



Simulinkのブロック線図モデル

電動ビークル (EV) のエネマネ制御の効果を シミュレーションで評価する問題を考える



アジェンダ

- はじめに
 - 電動ビークルのエネマネ制御の課題、MATLAB/Simulinkソリューション
- 例題
 - EVのエネマネ制御
- Tips情報
 - HEVのエネマネ制御
 - 熱・熱流体、故障
 - 電動航空機、電動船舶
- まとめ

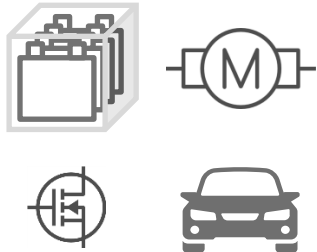
電動ビークルのエネマネ制御の課題

エネマネ制御の効果をシミュレーションで検討したいが、そこに至るまでに労力がかかる

1 EVの物理的な挙動を理解したい

電気・機械などの物理モデルを
全て一から作るのは大変

↓
EVに必要な物理モデルを
手軽に用意したい



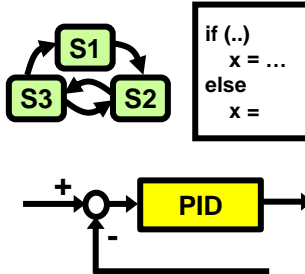
物理モデル



2 エネマネ制御の効果を検討したい

複雑なエネマネ制御モデルを
手早く作成するのが難しい

↓
様々なエネマネ制御モデルを
簡単に構築したい



制御設計



3 様々なテスト条件でシミュレーションしたい

電動ビークル全体モデルを
解析するのに時間がかかる

↓
主要な特長を抽出したモデルで
繰り返し手早く解析したい



- 電池容量、車両重量、など
- 制御ロジック
- 制御パラメーター

シミュレーション

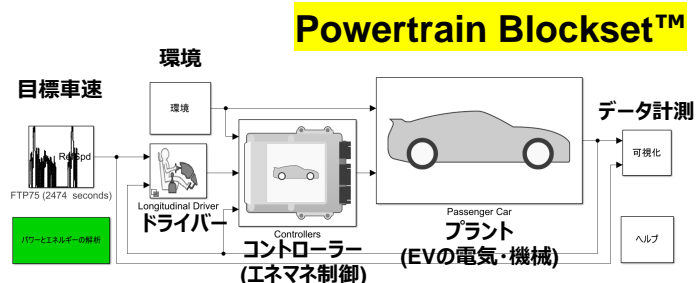


電動ビークルのエネマネ制御のMATLAB/Simulinkソリューション

EVのエネマネ制御の検討に必要な道具を使い、シミュレーションを手早く実施できる

1 EVの物理的な挙動を理解できる

電動ビークルのサンプルモデルを提供
(EV: 電気自動車、HEV: ハイブリッド自動車)

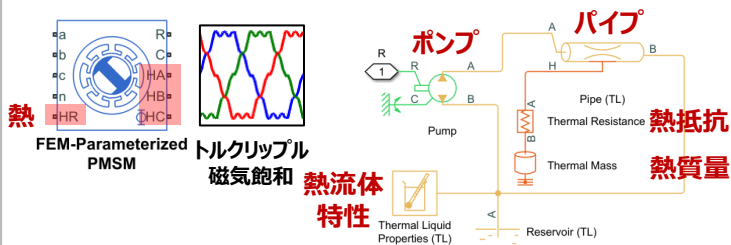


複合物理領域の物理モデルを提供
(電気、機械、熱、熱流体など)

Simscape™プロダクト

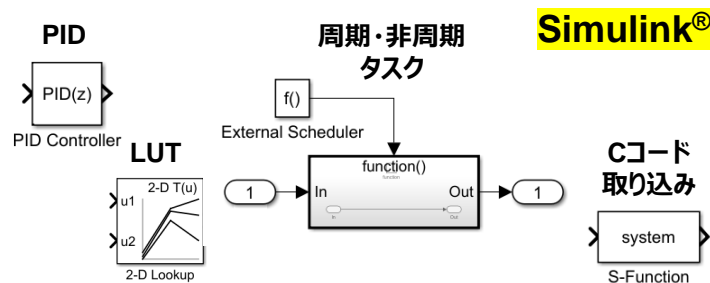
モーター (熱)

加熱・冷却システム (熱流体)

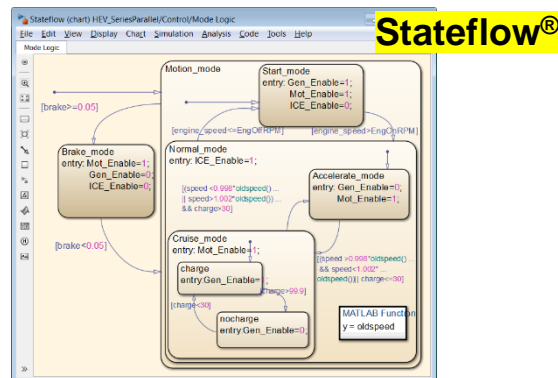


2 エネマネ制御の効果を検討できる

ブロック線図で制御ロジックを記述
(PID、LUT、周期/非周期タスク、Cコード取り込み)

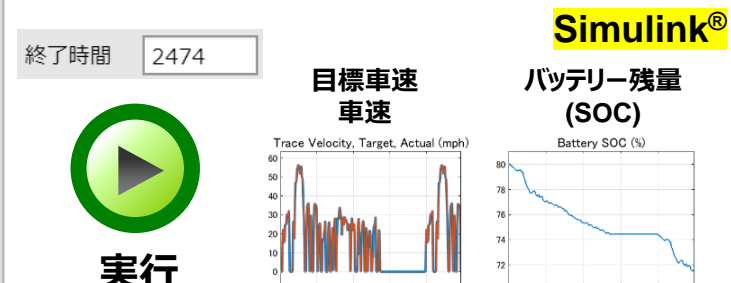


状態遷移図で制御ロジックを記述
(複数の制御モードの遷移、フェールセーフ制御)



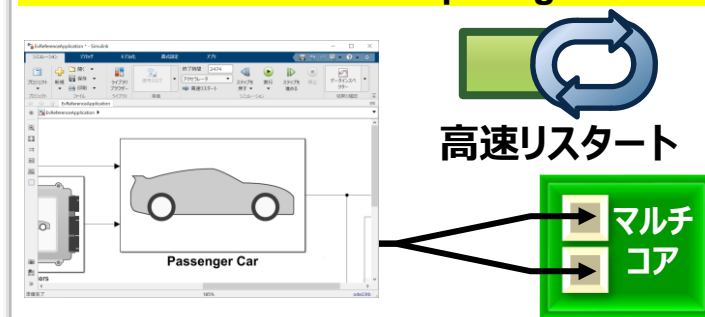
3 様々なテスト条件でシミュレーションできる

様々な信号の時間応答を確認
(実機では計測しにくい信号もモデルで計測可能)



パラメータスイープの計算高速化
(高速リスタート、繰り返し計算をマルチコアで並列処理)

MATLAB®, Parallel Computing Toolbox™

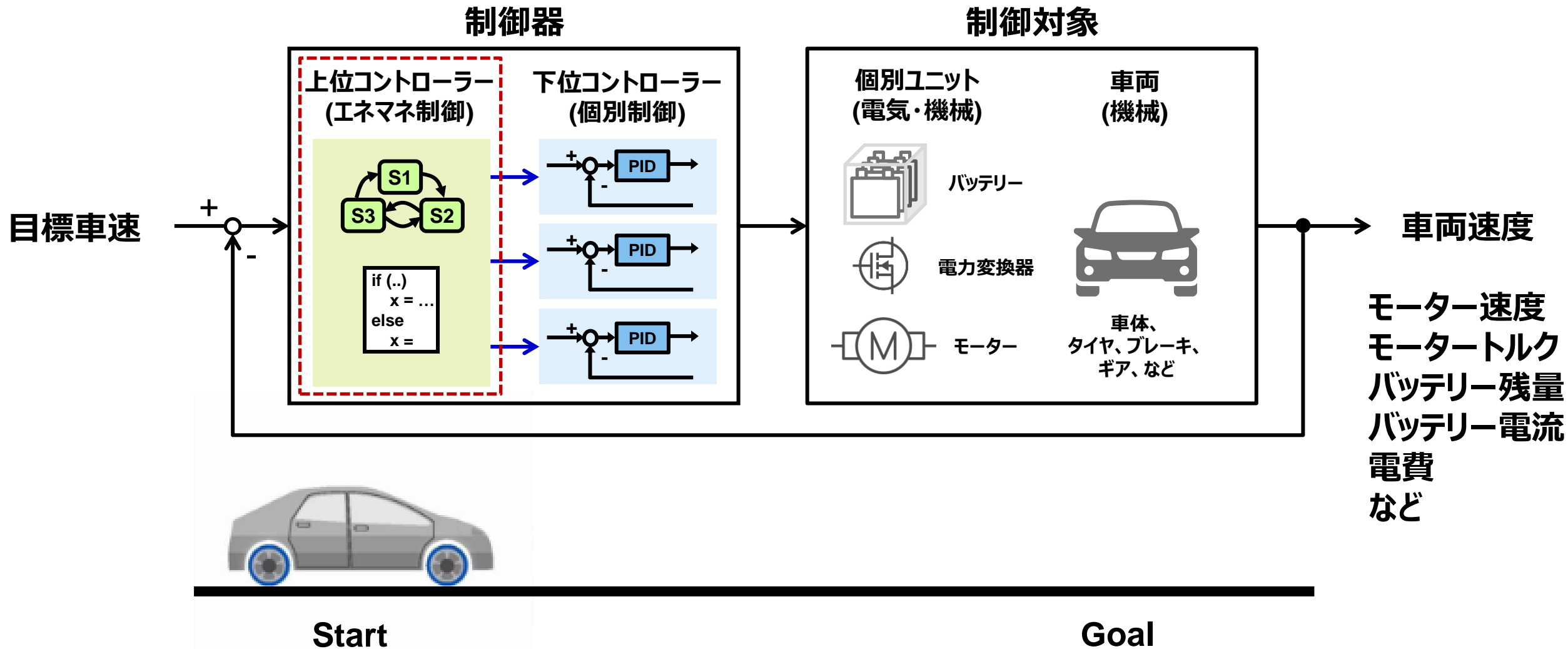


アジェンダ

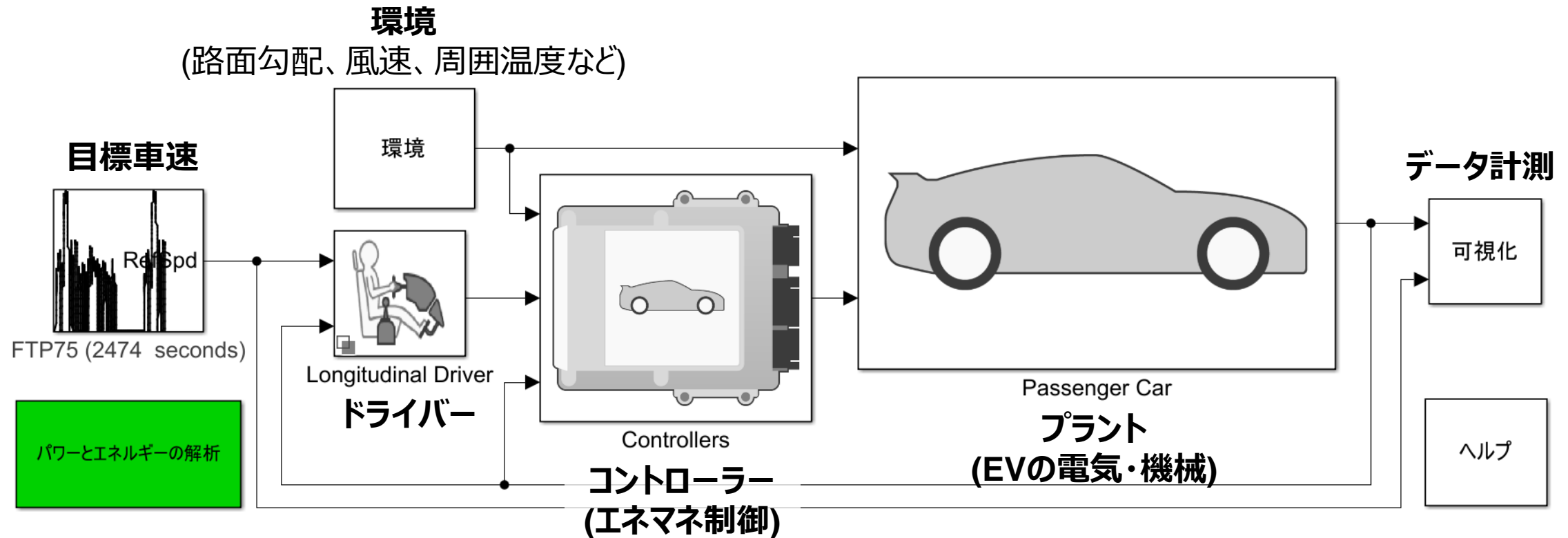
- はじめに
 - 電動ビークルのエネマネ制御の課題、MATLAB/Simulinkソリューション
- 例題
 - EVのエネマネ制御
- Tips情報
 - HEVのエネマネ制御
 - 熱・熱流体、故障
 - 電動航空機、電動船舶
- まとめ

例題: EVのエネマネ制御

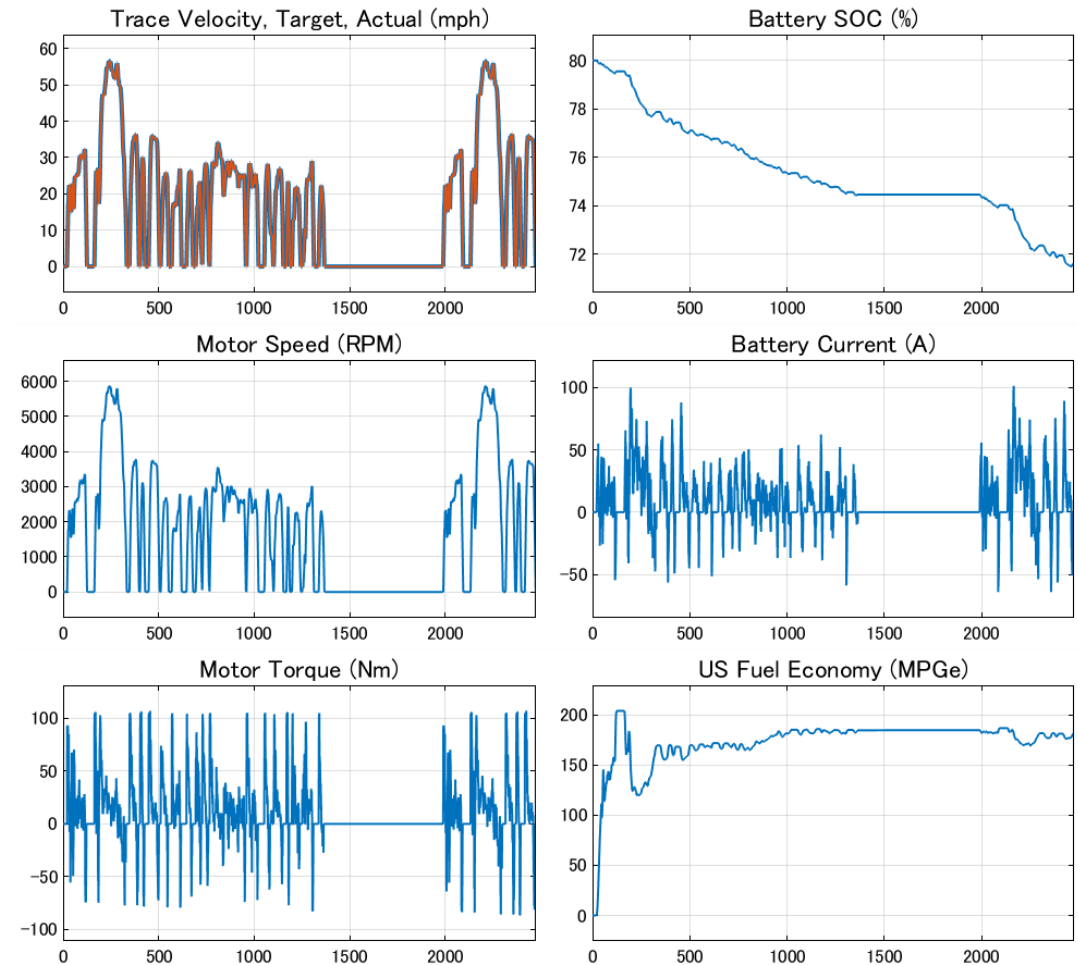
回生/機械ブレーキの協調制御の効果、バッテリー/モーターの挙動、電費を解析する



EVのシミュレーションモデルを構築して、様々なテスト条件を与えて、



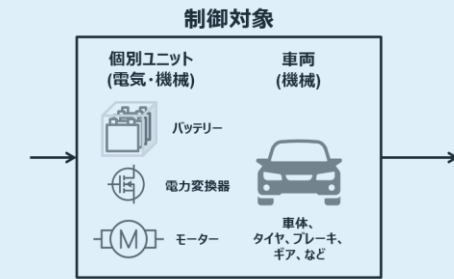
すぐにシミュレーションをして、エネマネ制御の効果・性能を評価できます



「例題: EVのエネマネ制御」～ 説明の流れ

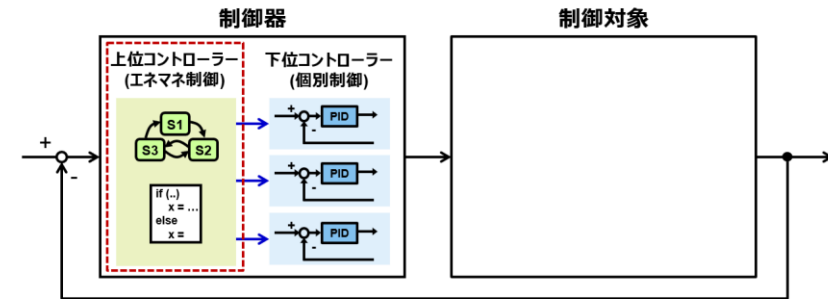
■ 制御対象モデル (プラントモデル)

- 電気系
- 駆動系



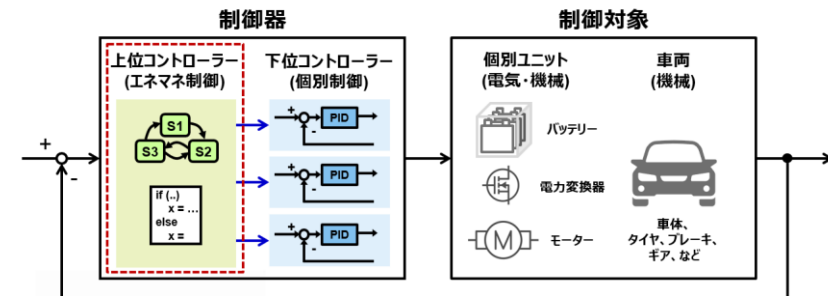
■ 制御器モデル (コントローラーモデル)

- エネマネ制御
- ドライバー、走行モード

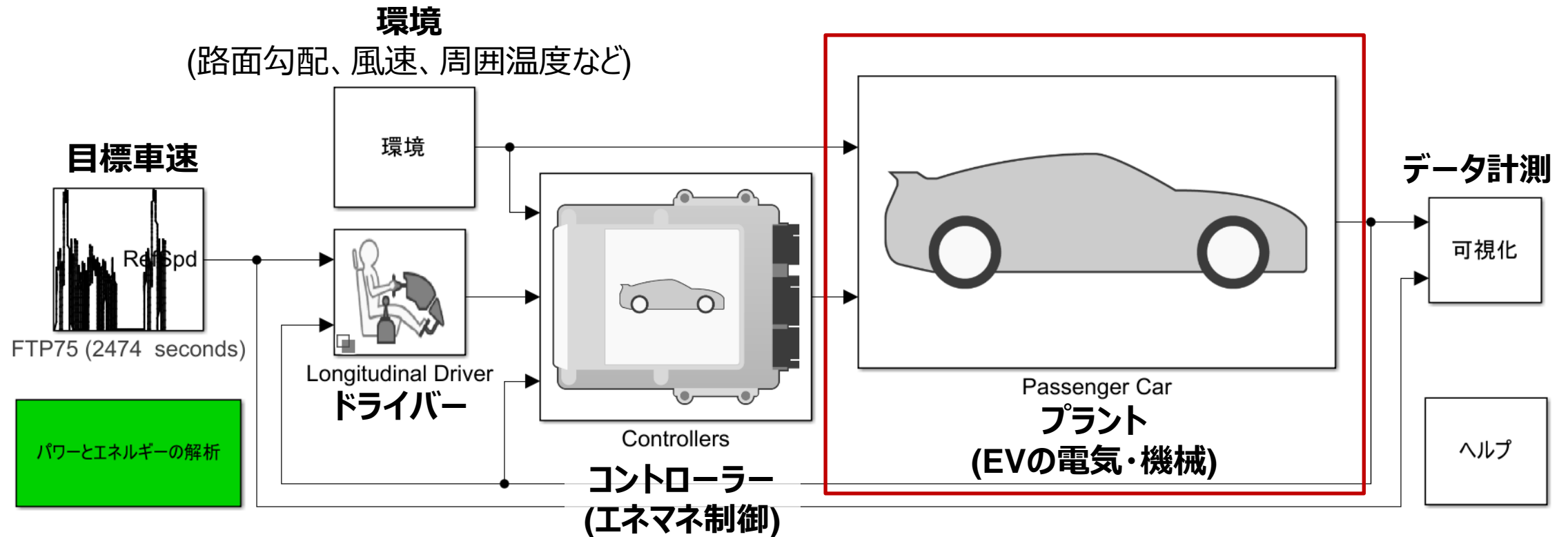


■ シミュレーション

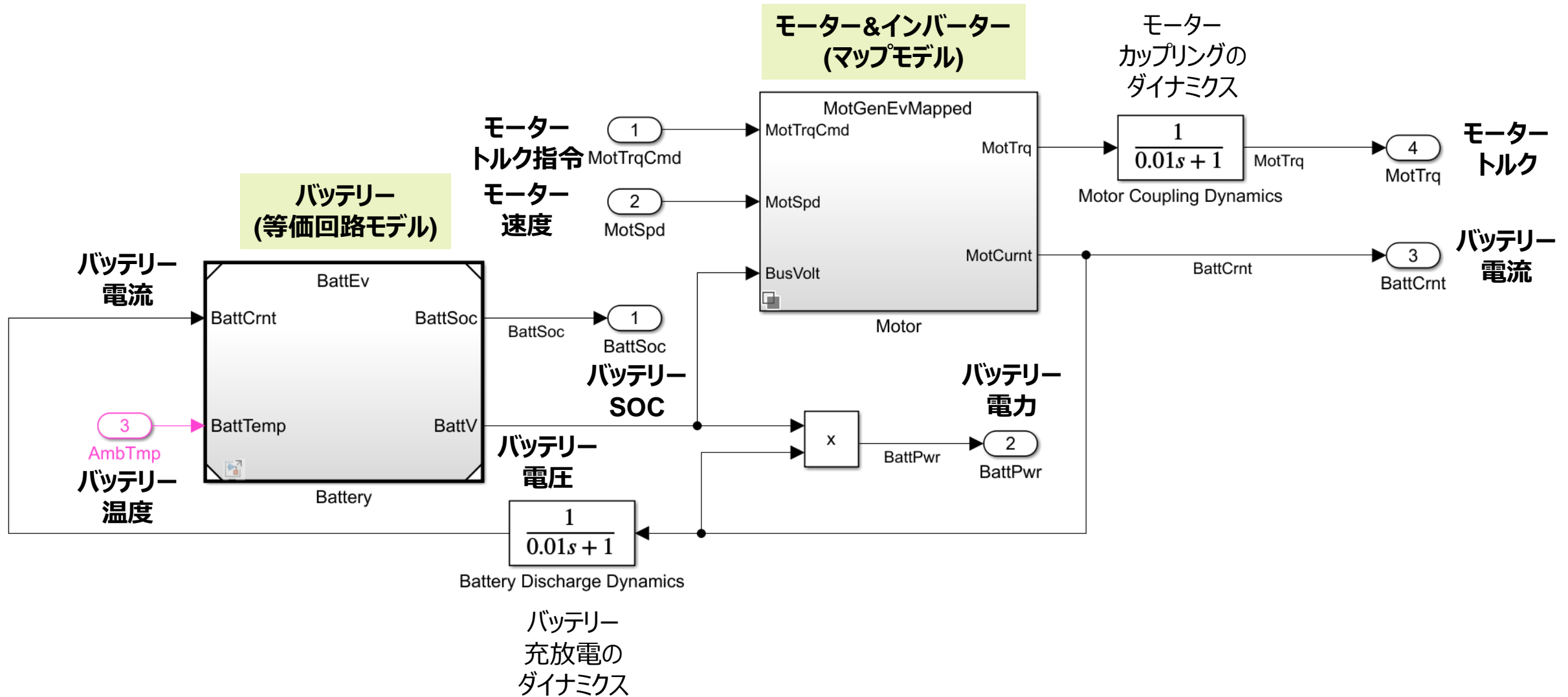
- デモ

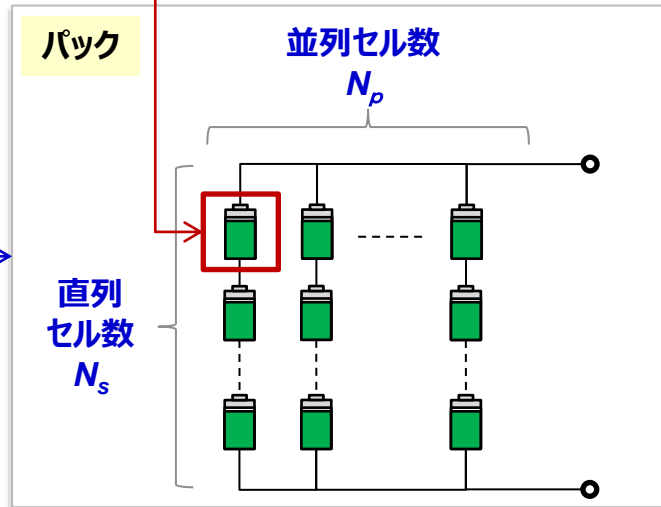


制御対象モデル (プラントモデル)



電気系





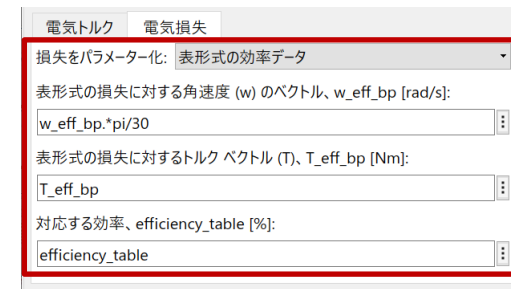
The diagram illustrates the Mapped Motor block, which is used for motor control. It features three input ports on the left and three output ports on the right. The inputs are:

- Battery Voltage (バッテリー電圧):** Input 3, labeled BusVolt.
- Motor Speed (モーター速度):** Input 2, labeled MotSpd.
- Motor Torque Command (モータートルク指令):** Input 1, labeled MotTrqCmd.

 The outputs are:

- Info:** A status output.
- Battery Current (バッテリー電流):** Output 2, labeled MotCurrnt.
- Motor Torque (モータートルク):** Output 1, labeled MotTrq.

 In the center of the block is a 'Mapped Motor' graph, which is a contour plot showing the relationship between motor speed and torque. The graph has a grid and a dashed line indicating a specific operating point or limit.



N-T特性 (定常状態)

トルク T [Nm]

T_{max}

$P = P_{max}$

効率 η [%]
(or 電気損失 P_{loss} [W])

速度 w [rad/s] (or N [rpm])

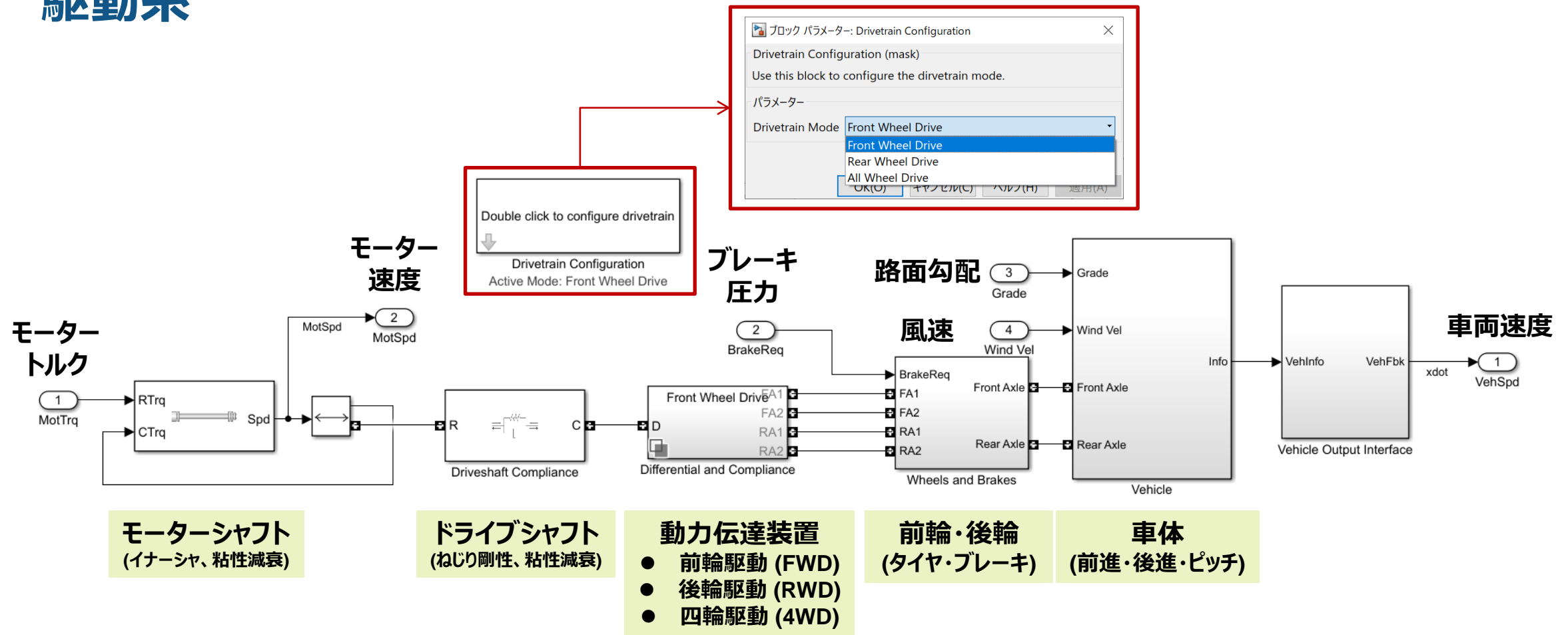
バッテリー電流の計算

$$P_{mech} = w \times T$$

$$I_{batt} = (P_{mech} + P_{loss}) / V_{batt}$$

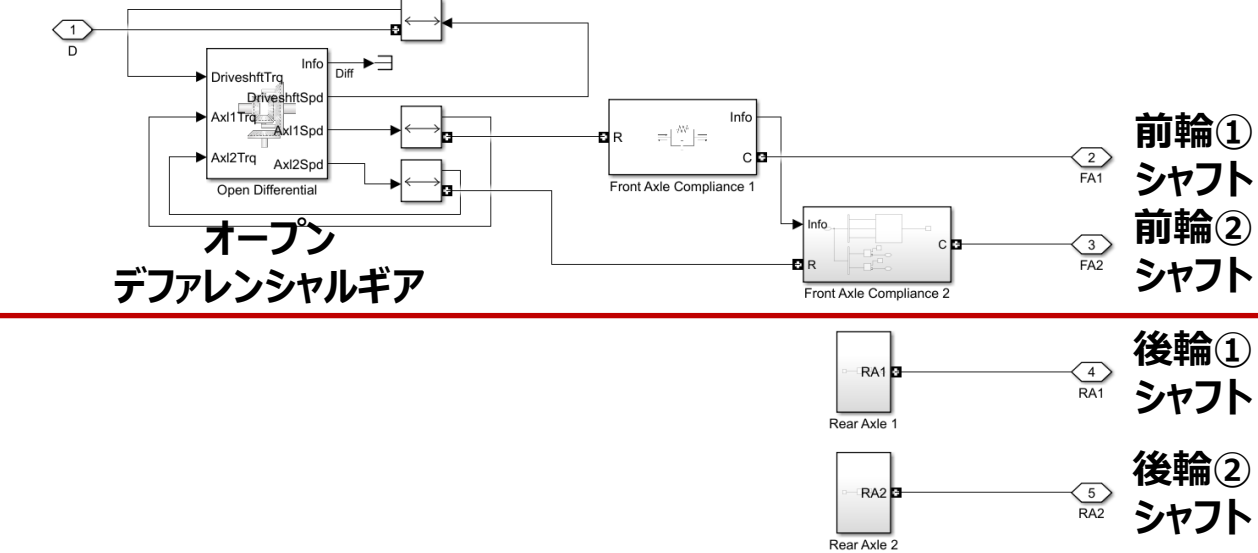
14

駆動系



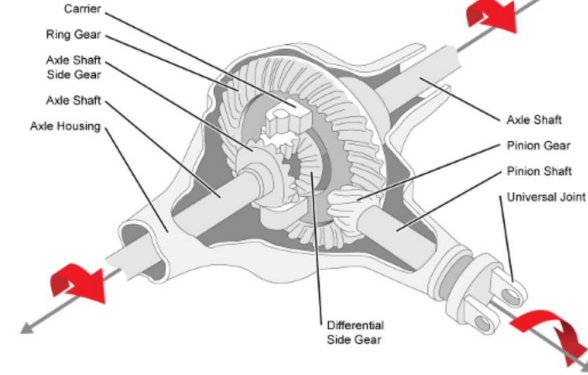
動力伝達装置 (例) 前輪駆動

ドライブ
シャフト



オープンデファレンシャルギア

前輪①
シャフト



前輪②
シャフト

ドライブ
シャフト

Block Options

効率係数: 定数
定数
駆動軸のトルク、回転数、温度

パラメーター

冠歯車 (内歯歯車) の位置: 中心線の左側

キャリアとドライブ シャフトの比率, Ndiff []:

Ndiff

キャリアの慣性, Jd [kg*m^2]:

Jd

キャリア減衰, bd [N*m*s/rad]:

bd

ギアの効率は、以下の設定が可能。

- 固定
- 可変 (トルク、速度、温度に依存)

車軸 1 の慣性, Jw1 [kg*m^2]:

Jw1

車軸 1 減衰, bw1 [N*m*s/rad]:

bw1

車軸 2 の慣性, Jw2 [kg*m^2]:

Jw2

車軸 2 減衰, bw2 [N*m*s/rad]:

bw2

車軸 1 の初期角速度, omegaw1o [rad/s]:

omegaw1o

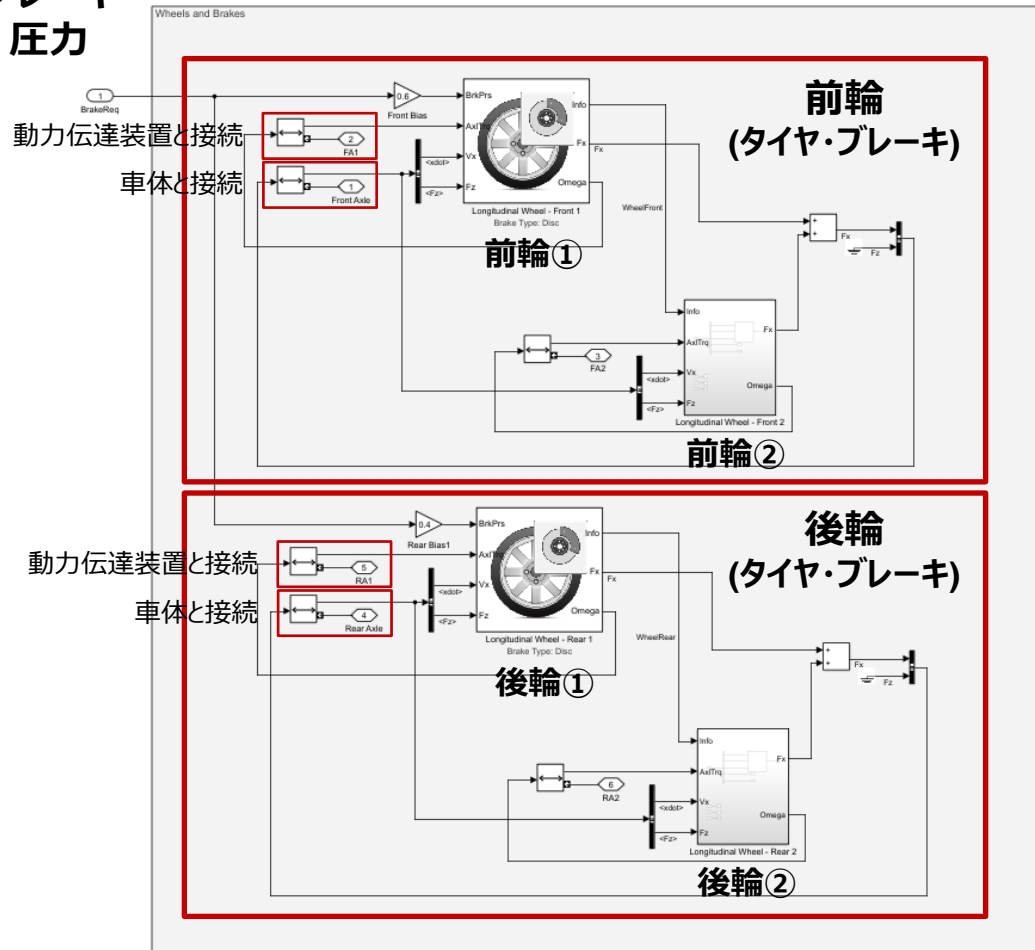
車軸 2 の初期角速度, omegaw2o [rad/s]:

omegaw2o

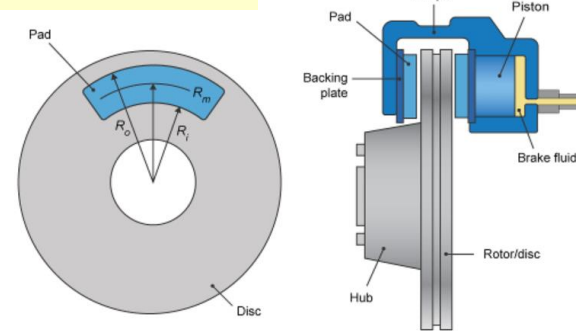
定数効率係数, eta []: 1

前輪・後輪

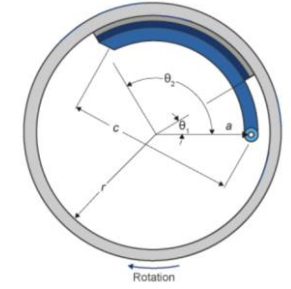
ブレーキ 圧力



ディスクブレーキ



ドラムブレーキ



ブロック オプション

縦方向の力: マジック フォーミュラ定数値

転がり抵抗: 圧力と速度

ブレーキ タイプ: ディスク

垂直方向の運動: なし

縦方向のスケーリング係数、lam_x []: lam_x ☐ 入力摩擦スケール係数

パラメーター

- ▶ ホイールのダイナミクス
- ▶ 縦方向
- ▶ 転がり抵抗
- ▶ ブレーキ
- ▶ シミュレーションの設定

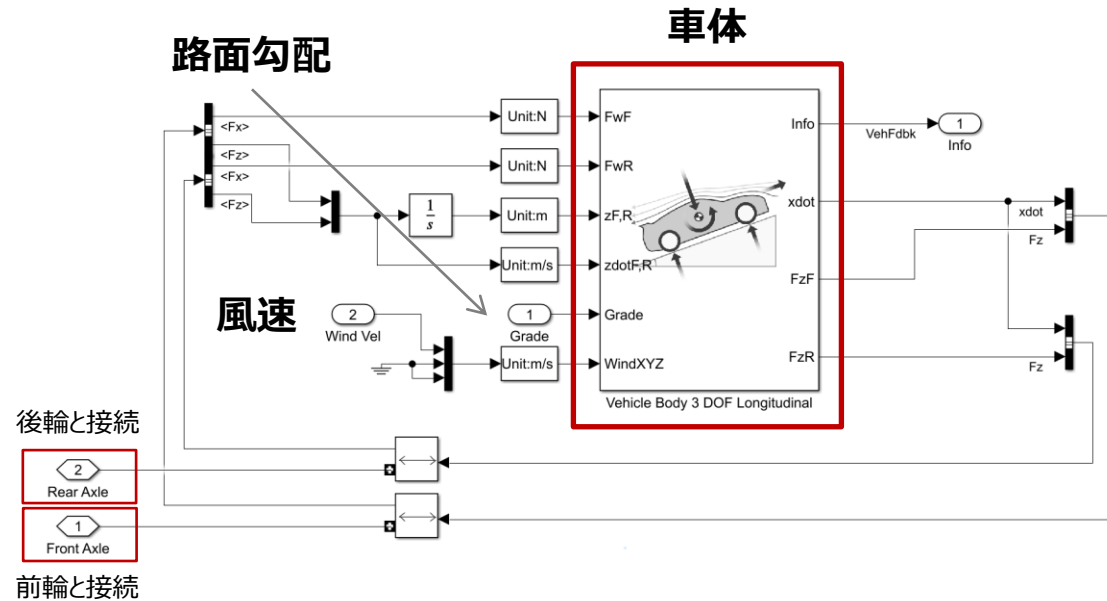
タイヤ



$$F_x = f(\kappa, F_z)$$

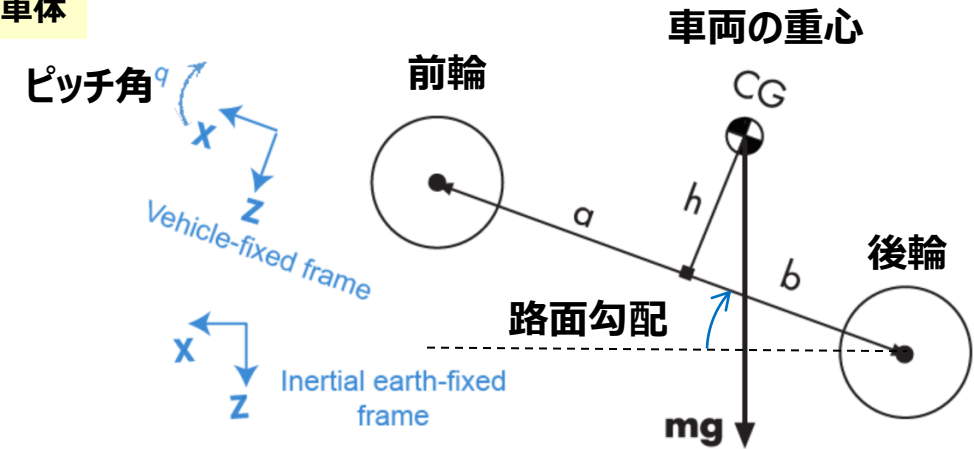
F_x [N]: タイヤの駆動力
 κ : タイヤのスリップ率
 F_z [N]: タイヤの垂直荷重

車体



Vehicle Body 3DOF Longitudinal ([Link](#))

車体



ブロック オプション

地面との交互作用のタイプ: 車軸変位、速度

☐ 外力

☐ 外部モーメント

☐ 気温

車両パラメーター

縦方向のパラメーター

垂直方向のパラメーター

ピッチ パラメーター

サスペンションと地面の交互作用

サスペンション パラメーター

Environment Parameters

縦方向のパラメーター

前車軸の車輪数、NF []: NF

後車軸の車輪数、NR []: NR

質量、m [kg]: Mass

CG から前車軸までの水平距離、a [m]: a_CG

CG から後車軸までの水平距離、b [m]: b_CG

車軸より上の CG の高さ、h [m]: h

空気抵抗係数、Cd []: Cd

全面投影面積、Af [m^2]: Af

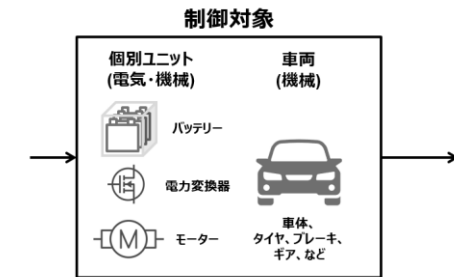
初期位置、x_o [m]: x_o

初期速度、xdot_o [m/s]: xdot_o

「例題: EVのエネマネ制御」～ 説明の流れ

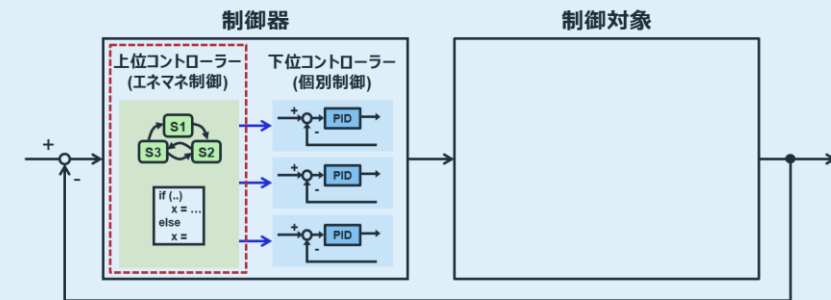
■ 制御対象モデル (プラントモデル)

- 電気系
- 駆動系



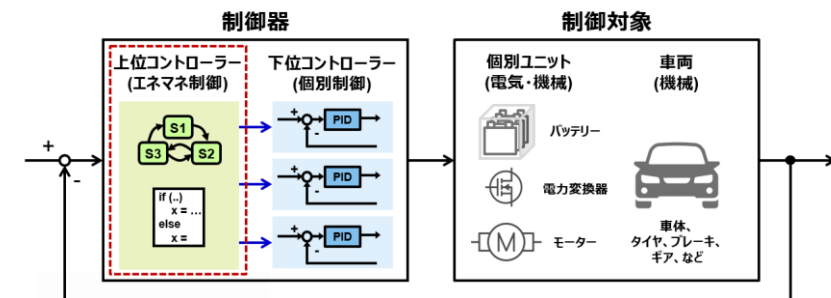
■ 制御器モデル (コントローラーモデル)

- エネマネ制御
- ドライバー、走行モード

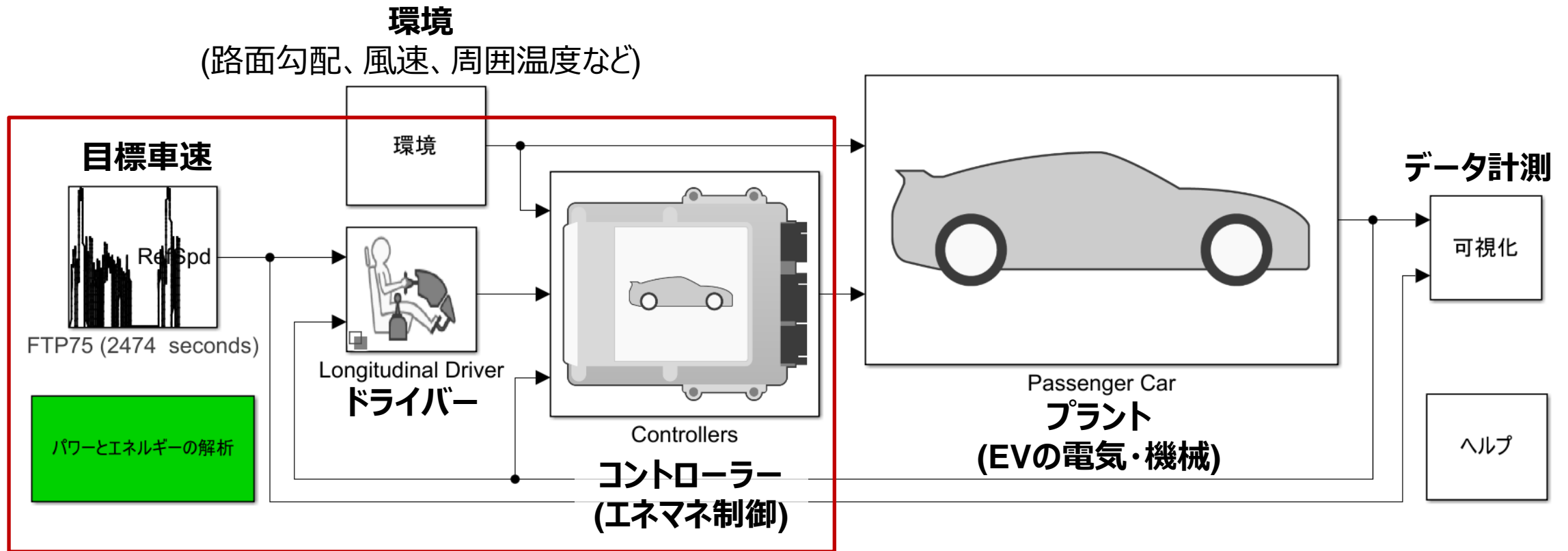


■ シミュレーション

- デモ

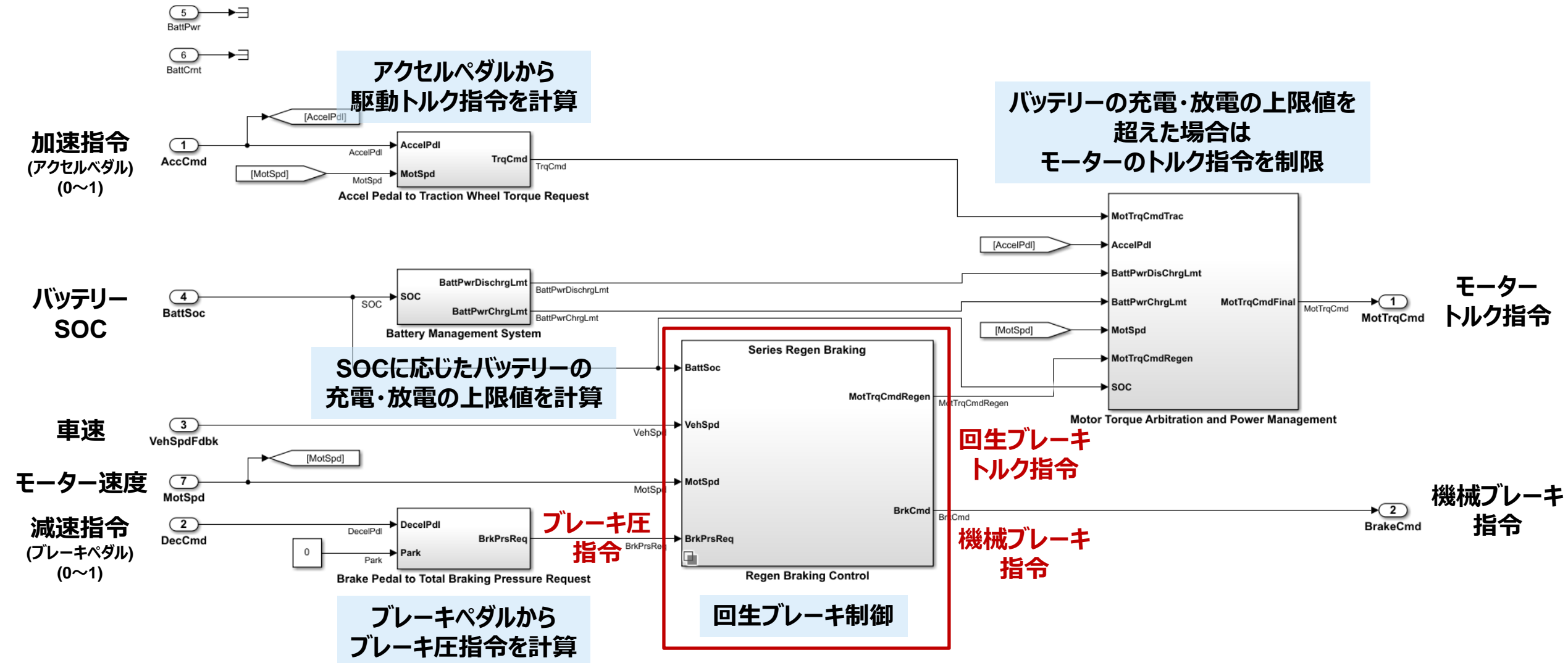


制御器モデル (コントローラーモデル)



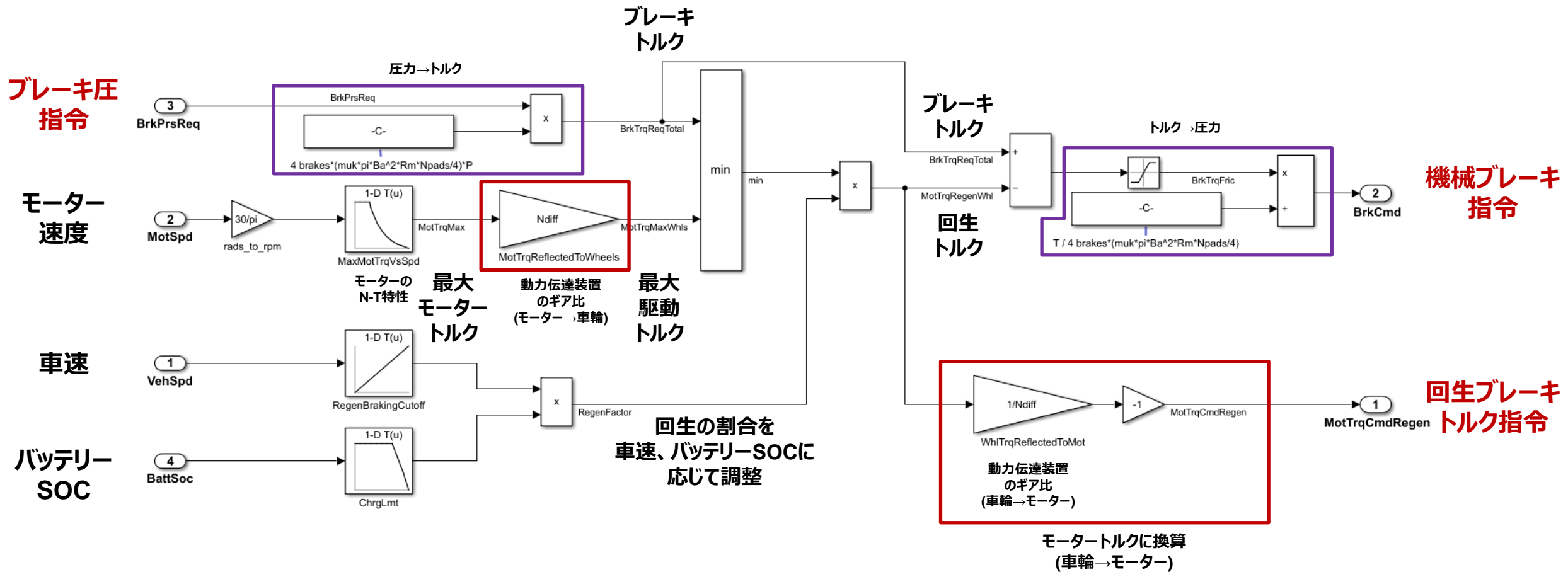
エネマネ制御

加速・減速指令などから回生やSOCを考慮してモータートルク・機械ブレーキ指令を計算

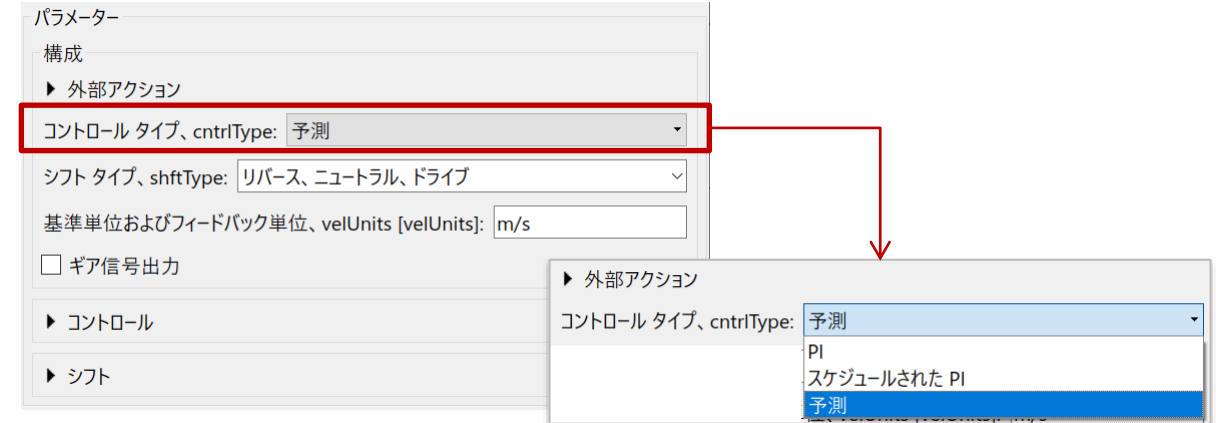
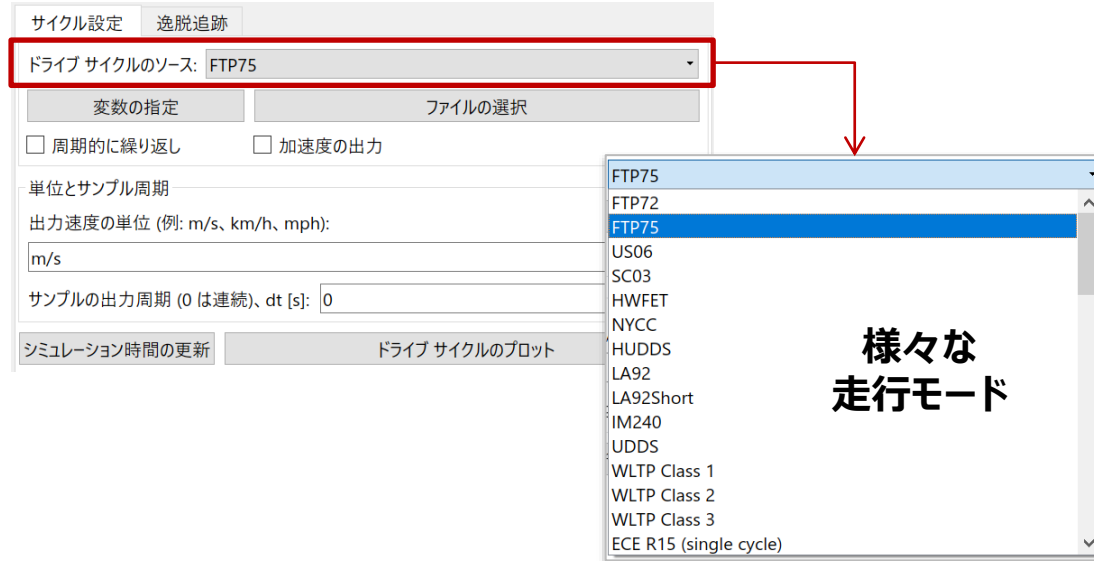
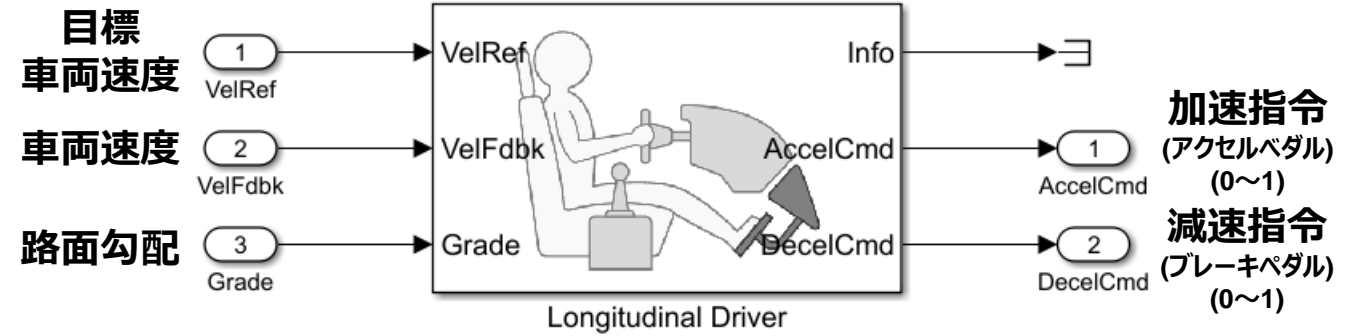
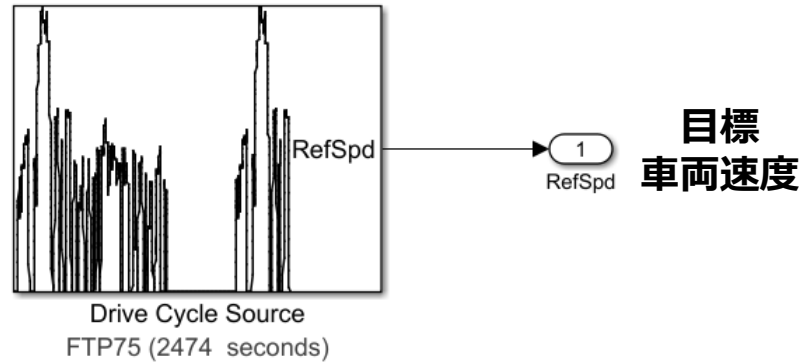


回生ブレーキ制御

ブレーキ圧指令に対して、回生ブレーキを多く使い、足りない分は機械ブレーキを使用



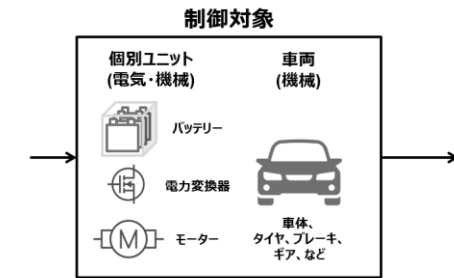
走行モード、ドライバー



「例題: EVのエネマネ制御」～ 説明の流れ

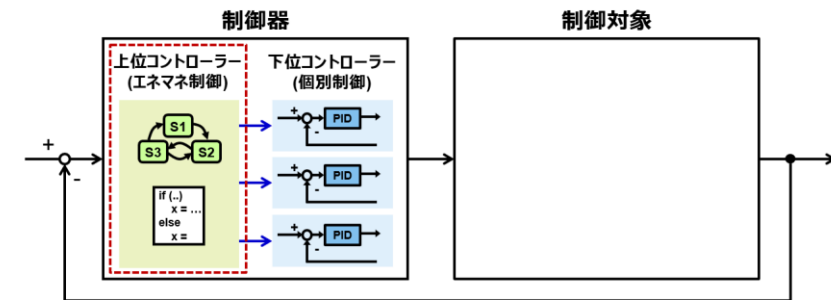
■ 制御対象モデル (プラントモデル)

- 電気系
- 駆動系



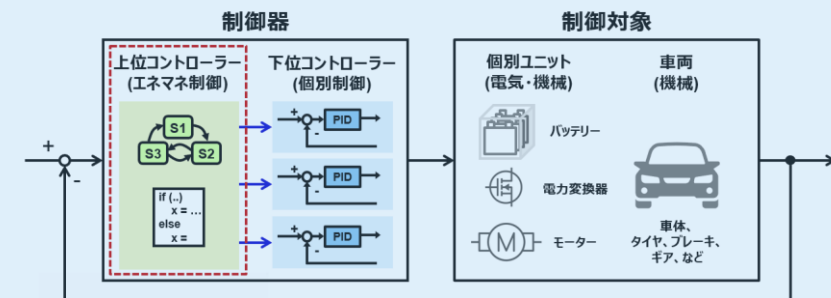
■ 制御器モデル (コントローラーモデル)

- エネマネ制御
- ドライバー、走行モード



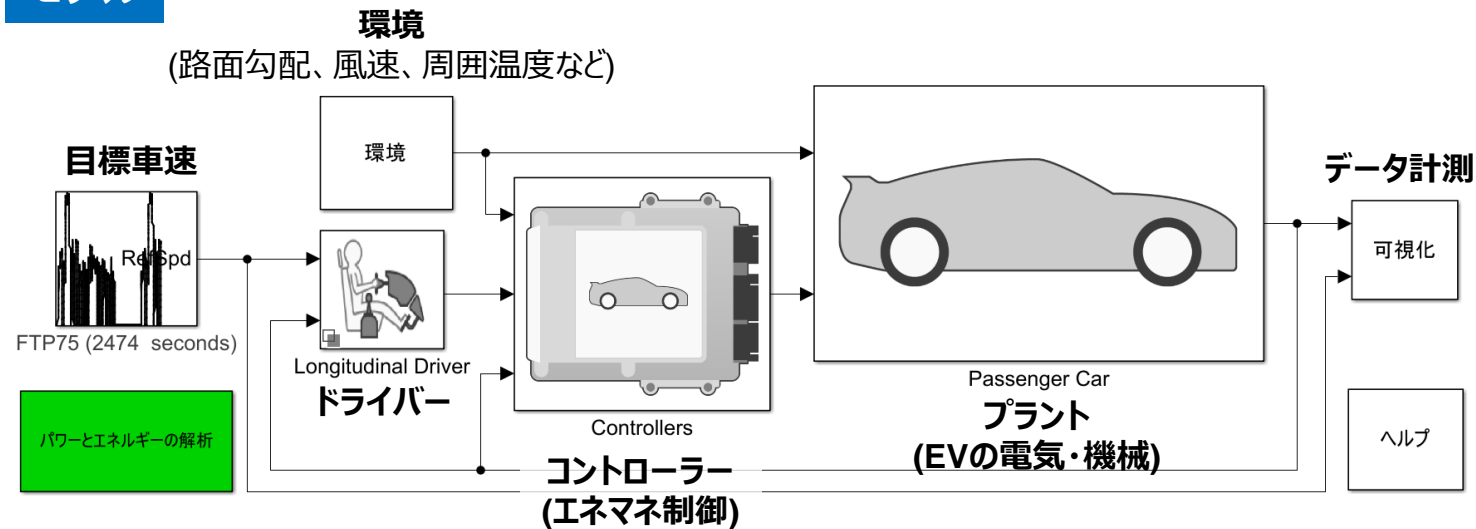
■ シミュレーション

- デモ

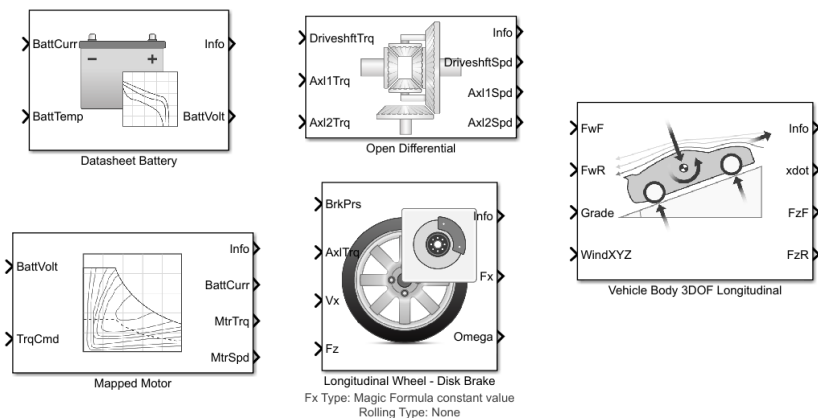


デモ内容のまとめ「EVのエネマネ制御のシミュレーション」

モデル



EVの各種コンポーネント



効率・損失の計算

Overall Summary

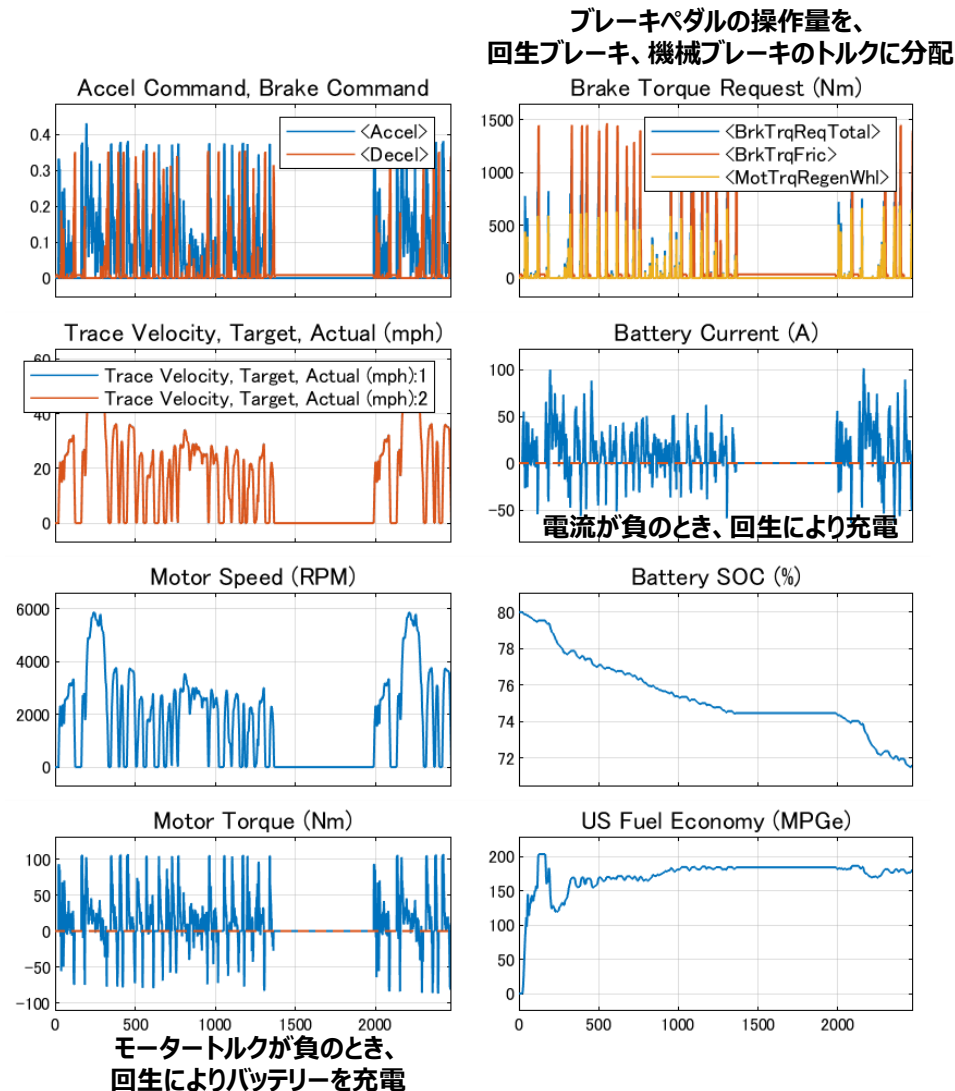
Display the final energy values for each subsystem.

VehPwrAnalysis.dispSysSummary

System Name	Efficiency	Energy Loss (MJ)
EvReferenceApplication	0	-7.36
Passenger Car	0	-7.36
Drivetrain	0.55	-5.98
Differential and Compliance	0.985	-0.16
Front Axle Compliance 1	1	0
Front Axle Compliance 2	1	0
Open Differential	0.985	-0.16
Driveshaft Compliance	1	0
Rotational Inertia	0.986	-0.155
Vehicle	0.83	-1.93
Vehicle Body 3 DOF Longitudinal	0.83	-1.93
Wheels and Brakes	0.709	-3.73
Longitudinal Wheel - Front 1	0.807	-1.08
Longitudinal Wheel - Front 2	0.807	-1.08
Longitudinal Wheel - Rear 1	0.0283	-0.785
Longitudinal Wheel - Rear 2	0.0283	-0.785
Electric Plant	0.883	-1.39
Battery	0.996	-0.0442
Lithium Ion Battery Pack	0.996	-0.0442
Motor	0.887	-1.34
Mapped Motor	0.887	-1.34

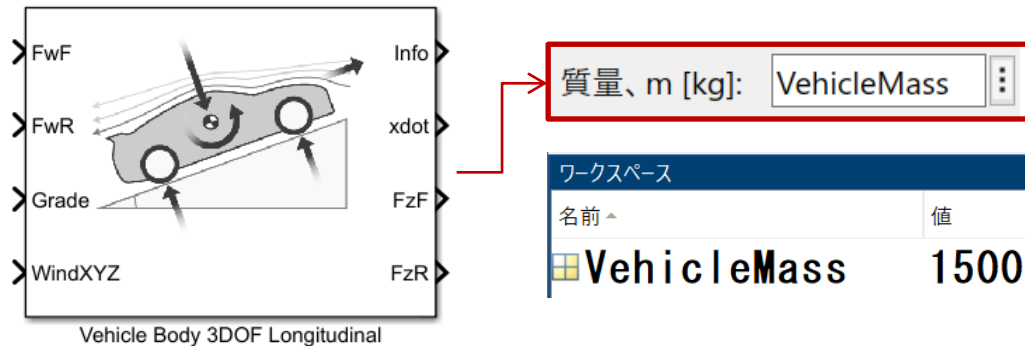
解析結果

路面勾配0[deg]の道を走行時の結果

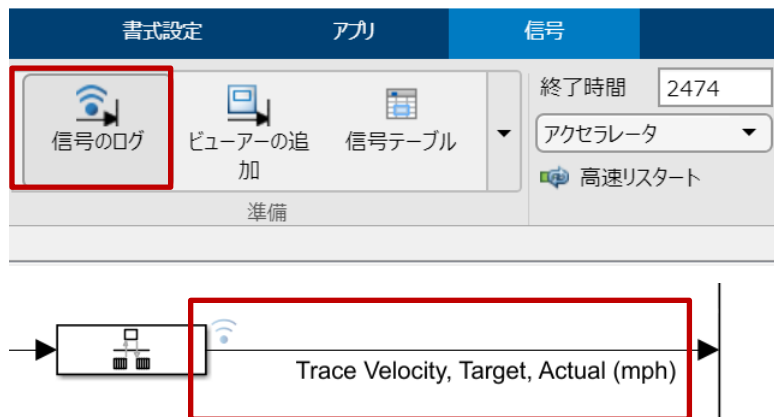


Tips情報:「パラメータスイープの計算高速化」

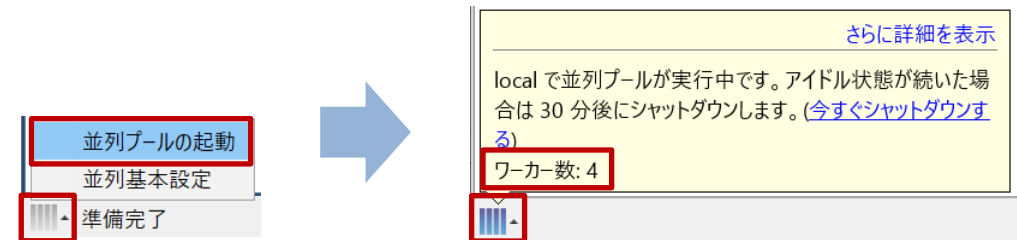
- 1 パラメータスイープする変数 (例: VehicleMass[kg]) を MATLABワークスペースに設定する。



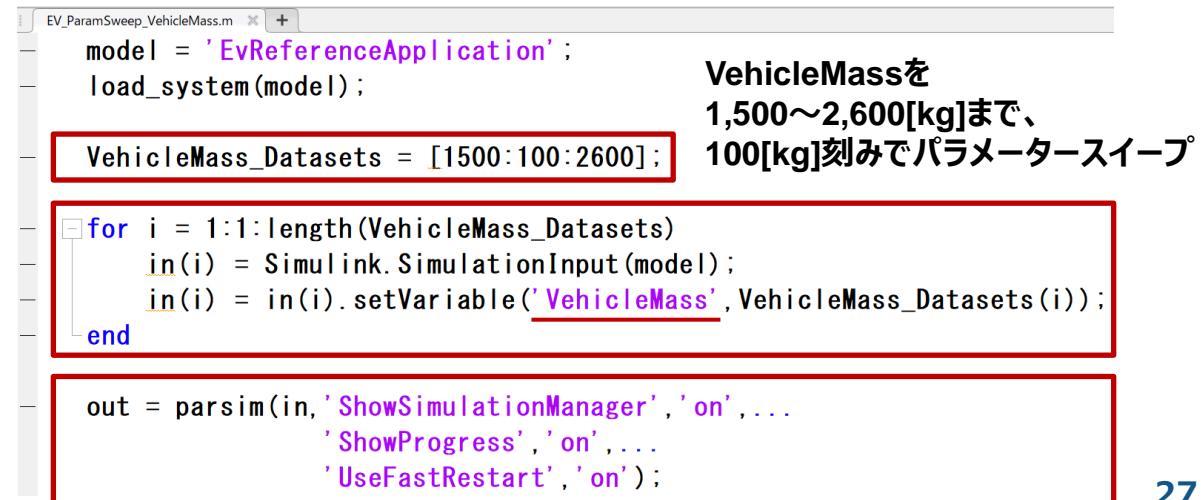
- 2 解析結果を取得したいSimulinkの信号線に名前を付けて、信号線を選択して、「信号のログ」をクリックする。



- 3 MATLABのGUIの左下側の「並列プールの起動」をクリックして、複数コアを使用する設定を行う。

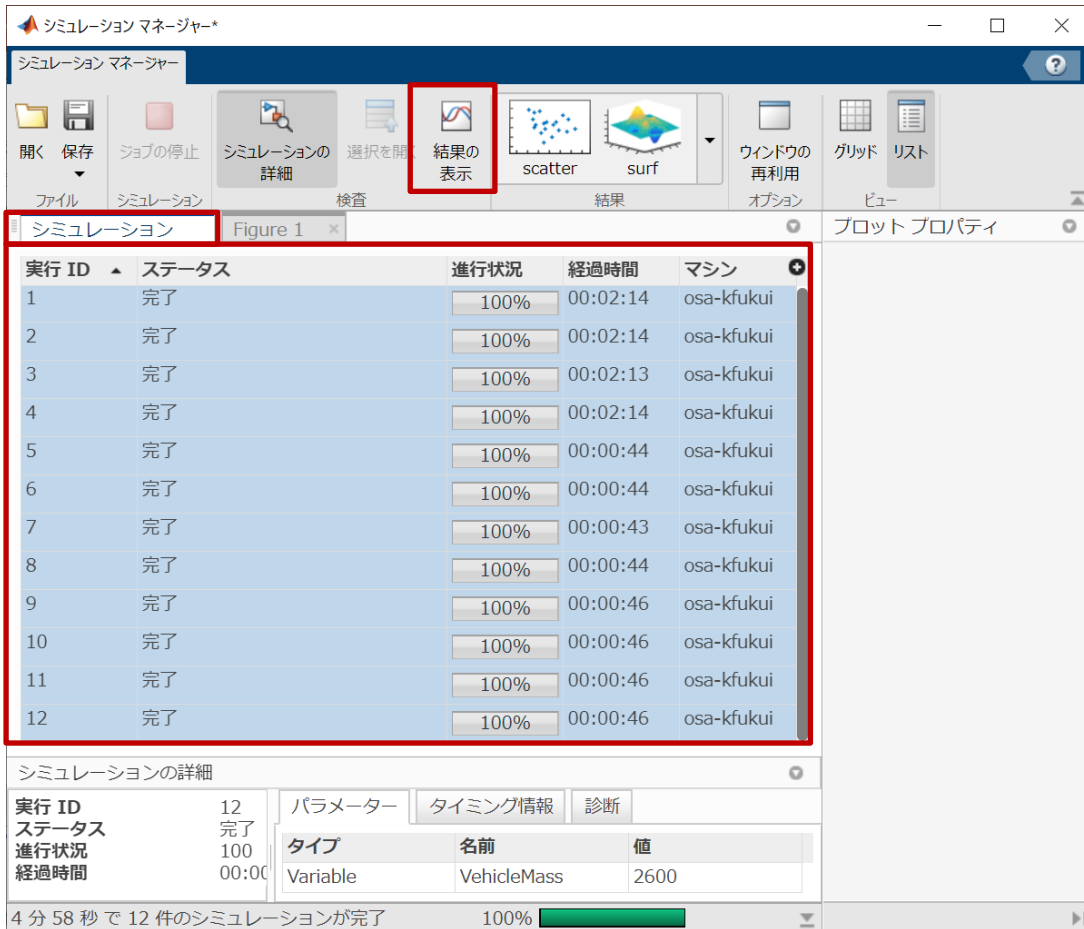


- 4 パラメータスイープの並列処理のプログラムを記述して実行する。
(※ parsimコマンド ([Link](#)))



Tips情報:「パラメータスイープ」の計算高速化

5 「シミュレーションマネージャー」で、並列計算の進行状況を確認できる。確認したい結果を選択して、「結果の表示」をクリックする。



6 「シミュレーションデータインスペクター」で、確認したい信号を選択して、時間波形を表示する。

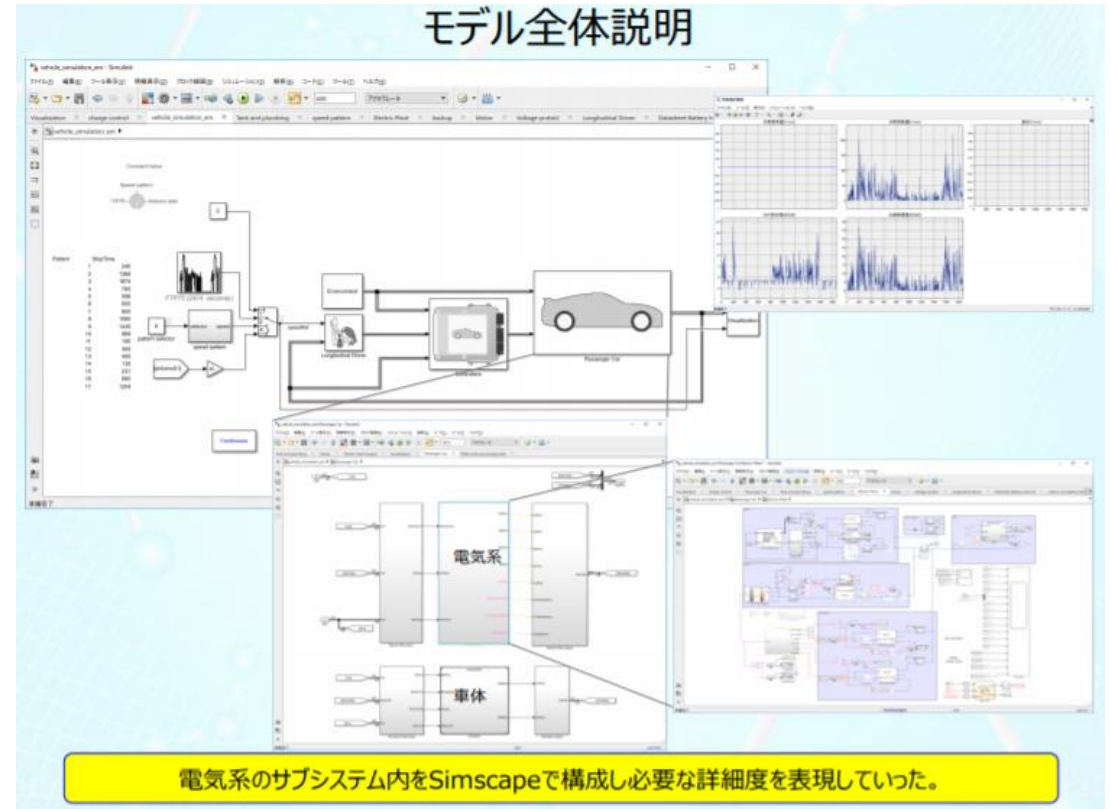


ユーザー事例: 株式会社アツミテック 内山直樹様 「燃料電池車の水素供給マネジメントシステムの検討」

水素貯蔵材料研究から水素貯蔵システム研究へ

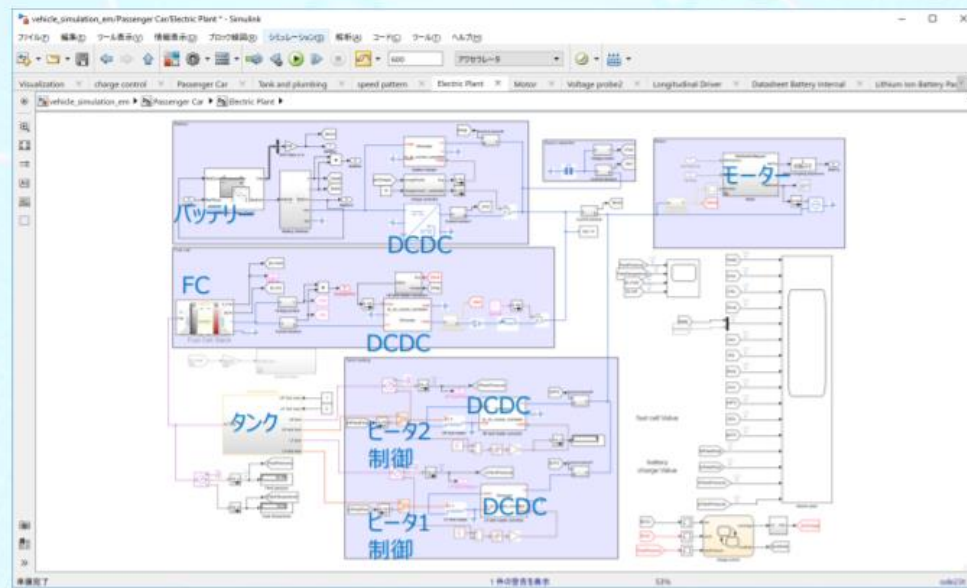
- #1)
車輦の種々の走行パターンから必要水素量の算出を行う。
- #2)
水素タンク内における水素量、圧力、温度の過渡的な変化も考慮し、要求水素量を満足していることを確認する。
- ※水素吸蔵合金、水素吸着材料の水素放出特性を実際の材料を用いて測定を繰り返し、流体解析プログラムを用いた理論式とのコリレーションが必要
- #3)
エネルギーマネジメントの効果（特に水素燃料の効率的な利用）を確認する。
- ・車両の加速時：バッテリーと燃料電池を併用し、パワーコンバータに供給する電気エネルギーの配分を制御。
 - ・車両の減速時：モータ（ジェネレータとして動作）の回生エネルギーによるバッテリーの充電量を制御。

モデル全体説明



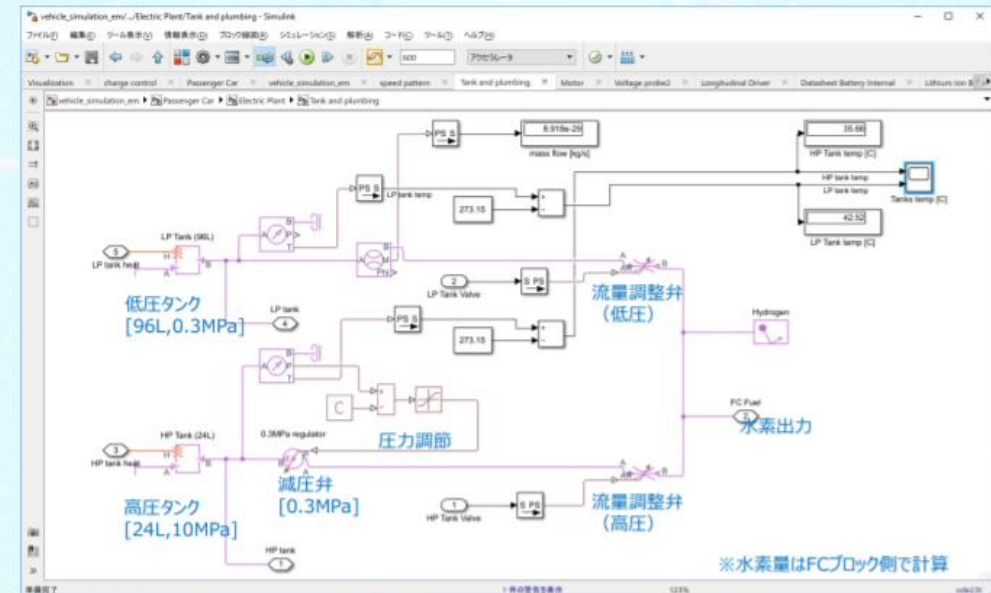
ユーザー事例: 株式会社アツミテック 内山直樹様 「燃料電池車の水素供給マネージメントシステムの検討」

モデル全体説明 電気系



Powertrain Blocksetでは電気系がSimscapeブロックではないため、Simscapeの電気系ドメインへの変換（Simulink電圧/電流 → Simscape電圧源/電流源）を意識しモデリングを行った。

モデル全体説明 タンク



高圧(プリチャージ)/低圧(メイン)の2タンクシステムとしてモデル化したが、吸着現象についてはSimscape標準ブロックに表現されていないので、カスタマイズを行った。

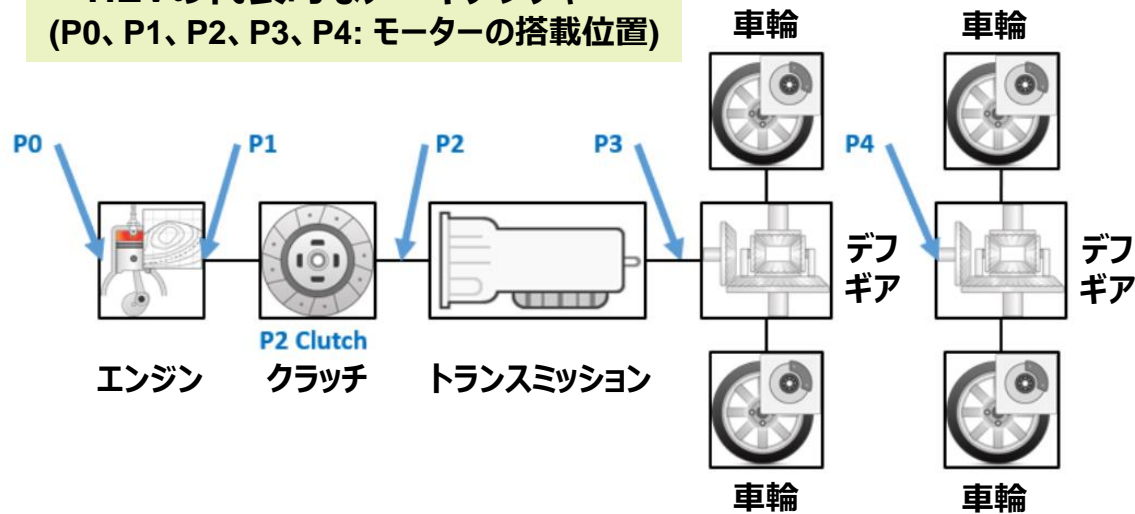
アジェンダ

- はじめに
 - 電動ビークルのエネマネ制御の課題、MATLAB/Simulinkソリューション
- 例題
 - EVのエネマネ制御
- Tips情報
 - HEVのエネマネ制御
 - 熱・熱流体、故障
 - 電動航空機、電動船舶
- まとめ

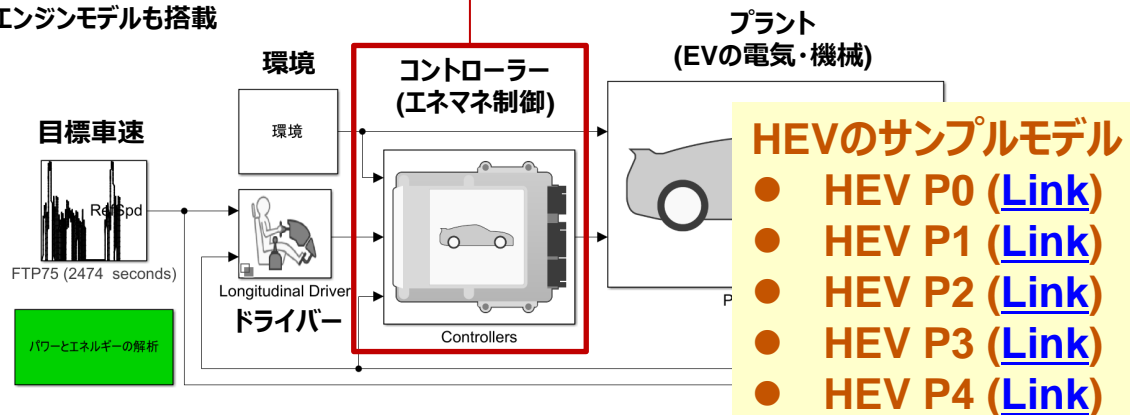
HEVのエネマネ制御①

HEVの代表的なアーキテクチャー (P1～P4) のエネマネ制御のテンプレートモデル

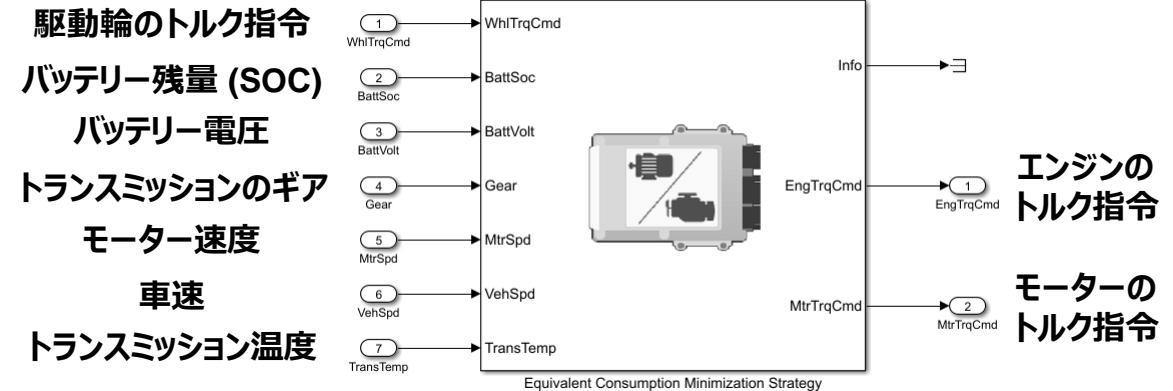
HEVの代表的なアーキテクチャー
(P0、P1、P2、P3、P4: モーターの搭載位置)



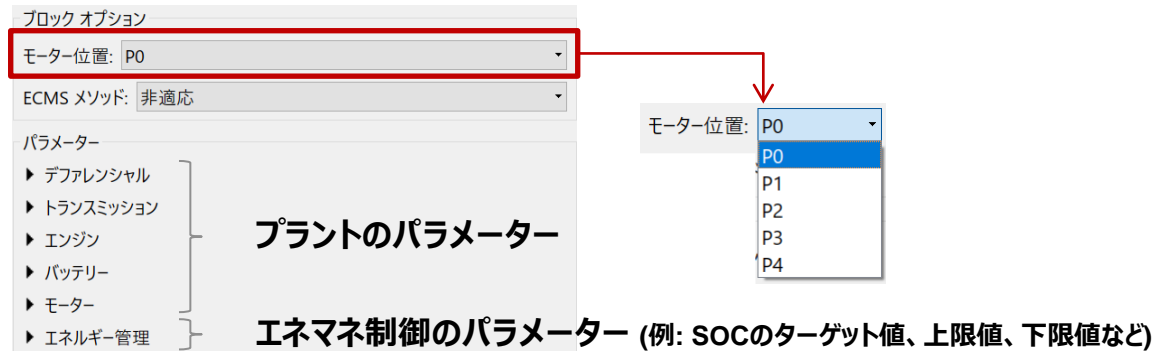
HEVのサンプルモデルでは
エンジンモデルも搭載



HEVのエネマネ制御
(等価燃料消費最小化戦略)



バッテリーのSOCを維持しながら、エネルギー消費を最小限に抑えるように、
エンジンとモーターのトルク配分を最適化するエネマネ制御ロジック

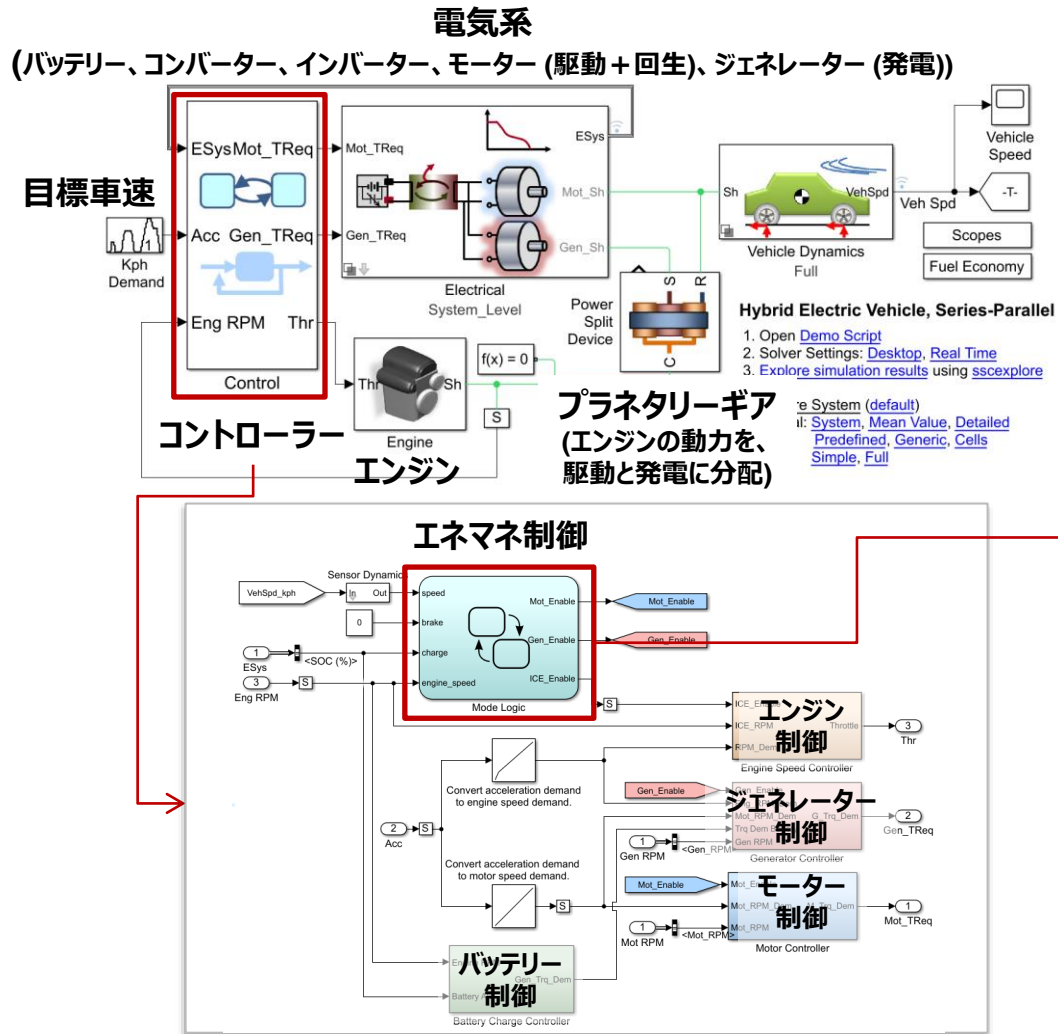


参考文献

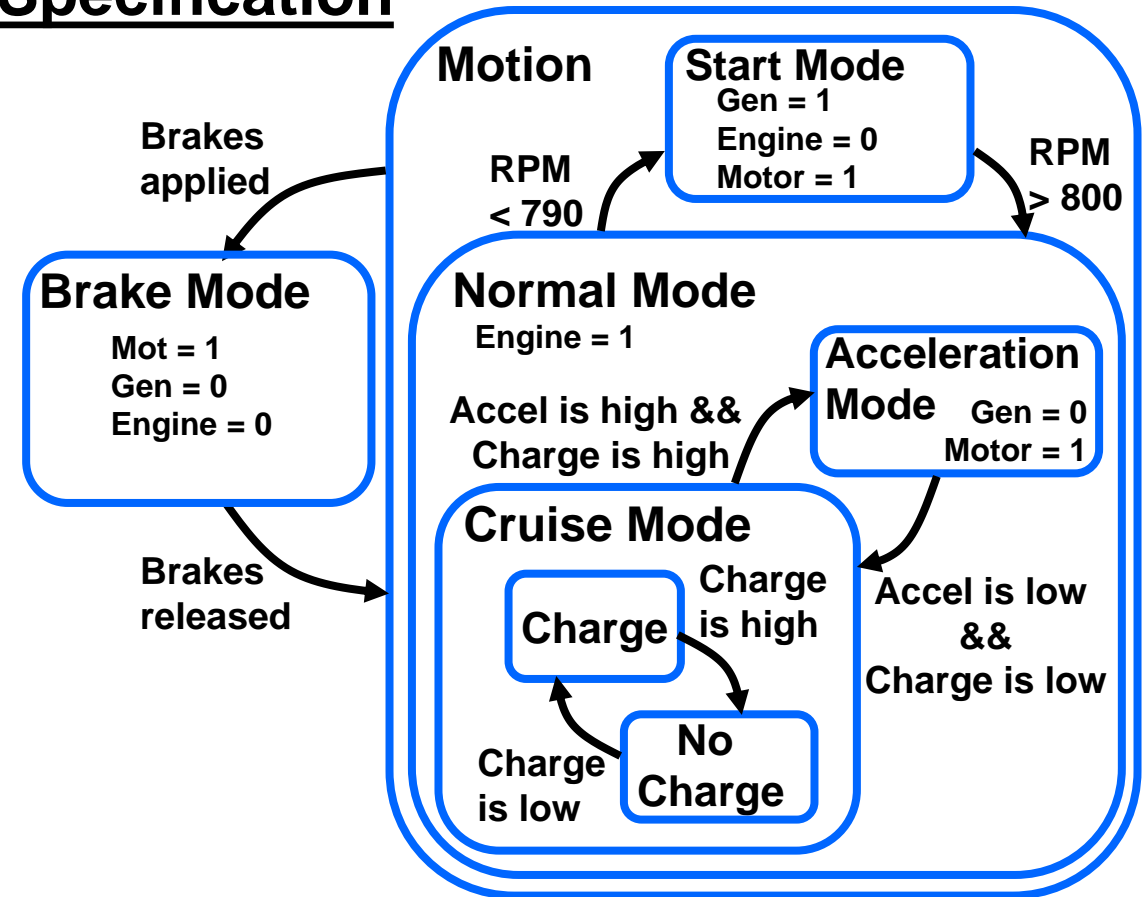
Onori, S., Serrao, L., and Rizzoni, G., Hybrid Electric Vehicles Energy Management Systems. New York: Springer, 2016. ([Link](#))

HEVのエネマネ制御②

HEV (例: シリーズパラレル方式) の複雑なエネマネ制御をアニメーション付きの状態遷移図で構築



Specification

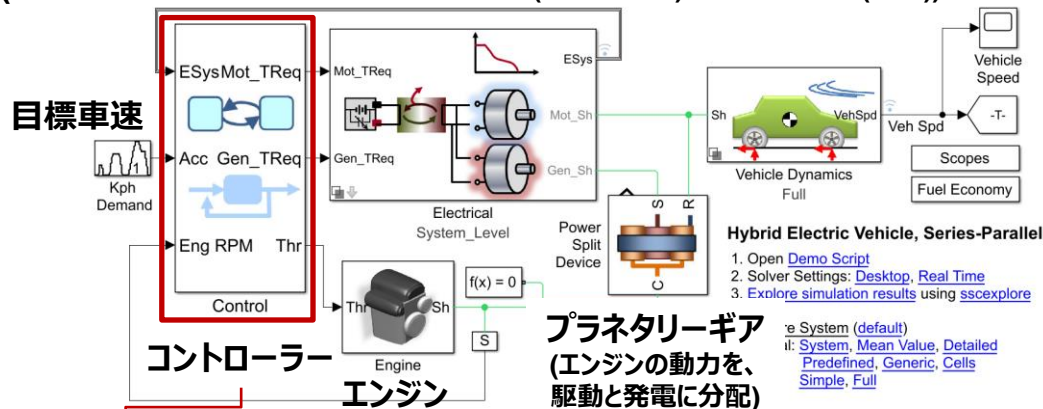


HEVのエネマネ制御②

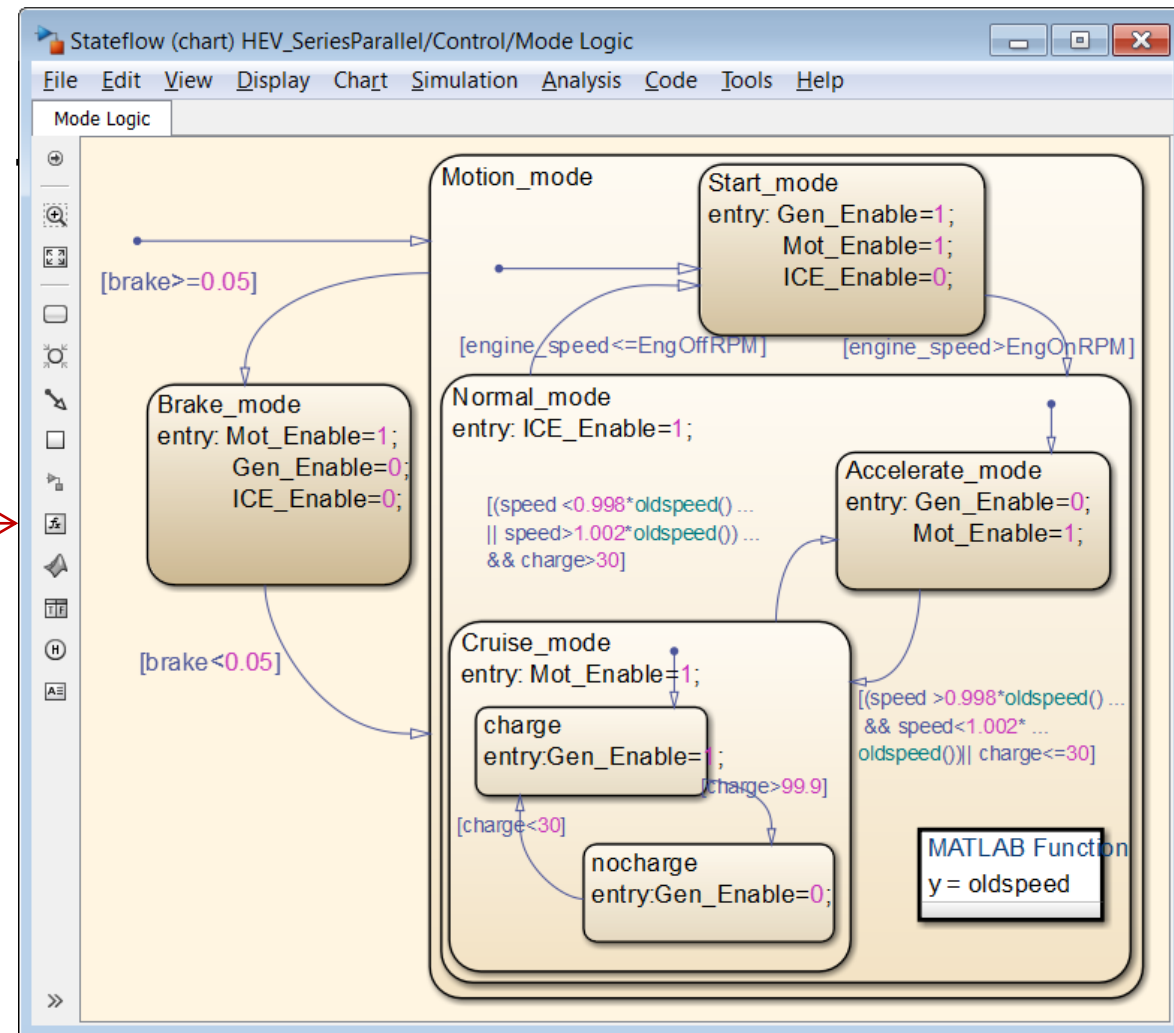
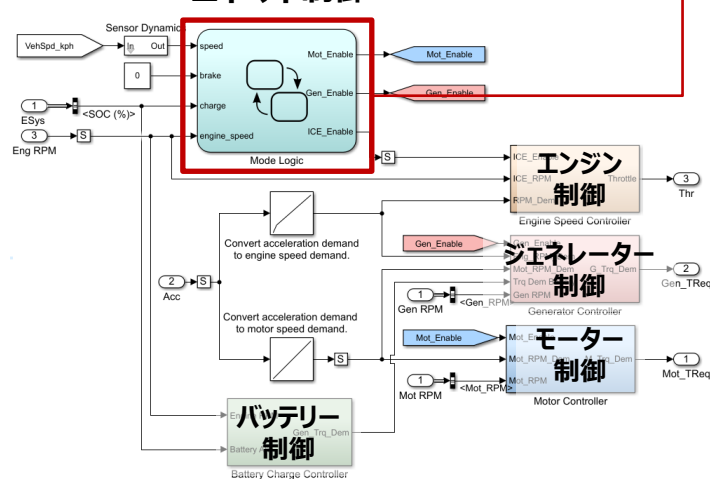
HEV (例: シリーズパラレル方式) の複雑なエネマネ制御をアニメーション付きの状態遷移図で構築

電気系

(バッテリー、コンバーター、インバーター、モーター (駆動+回生)、ジェネレーター (発電))



エネマネ制御



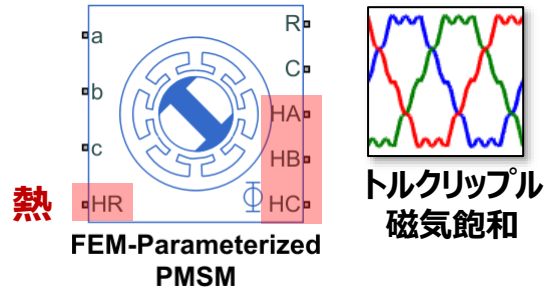
ビデオ: Electric Ship Modeling and Simulation ([Link](#))

サンプルモデル: Hybrid-Electric Vehicle Model in Simulink ([Link](#)) (その他、HEV Input Power-Split Reference Application ([Link](#)))

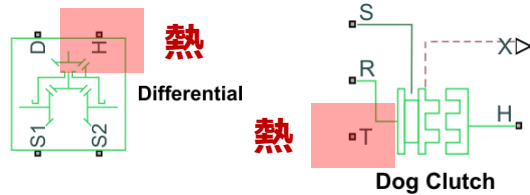
熱・熱流体、故障①

複雑な複合物理領域のモデリング支援機能

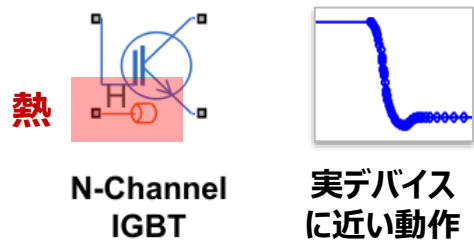
三相モーター



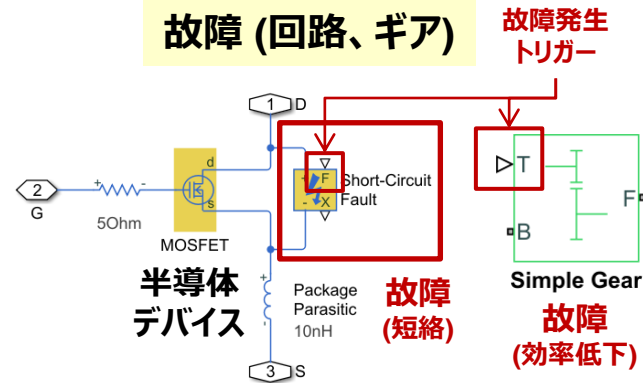
ギア、クラッチ



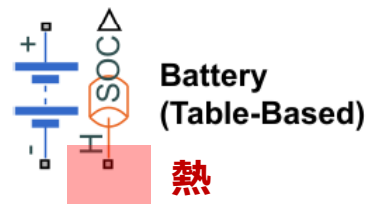
半導体デバイス



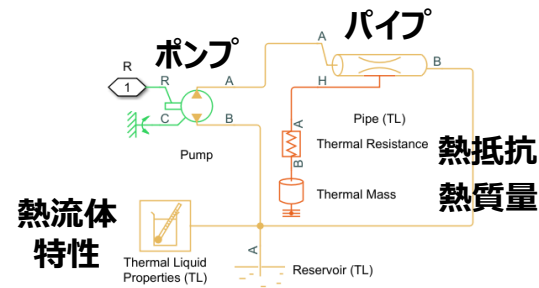
故障 (回路、ギア)



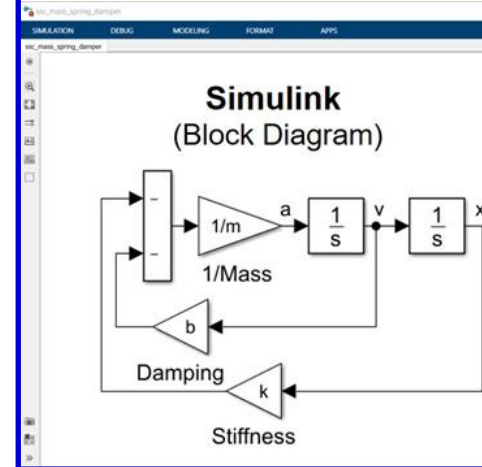
バッテリー



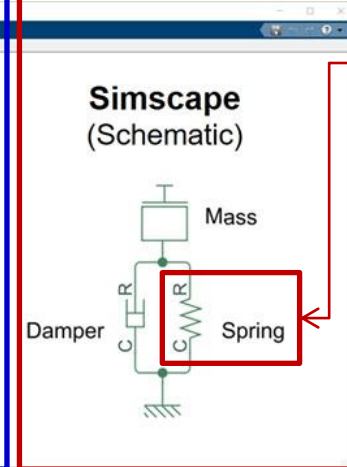
加熱・冷却システム



因果的 モデリング



非因果的 モデリング

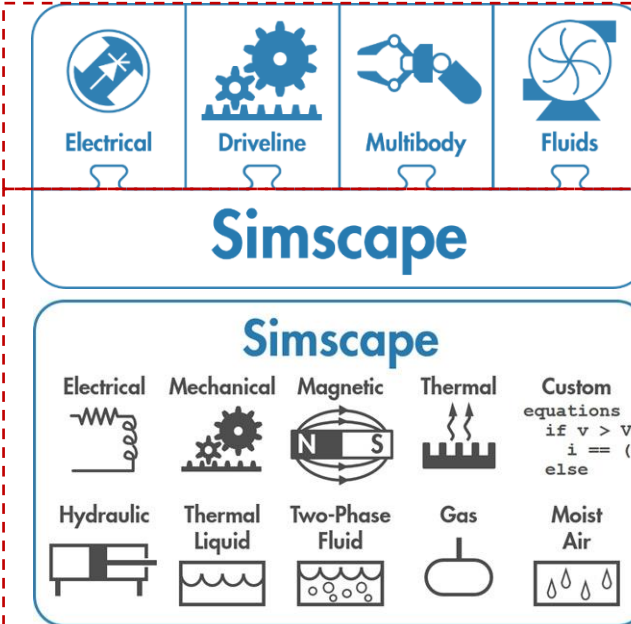


物理モデリング言語
(Simscape言語)

微分代数方程式を
そのまま記述できる

```
spring.ssc
equations
v == x.der;
f == spr_rate * x;
end
```

制御対象の物理構造を
意識しながら
モデルを構築できる

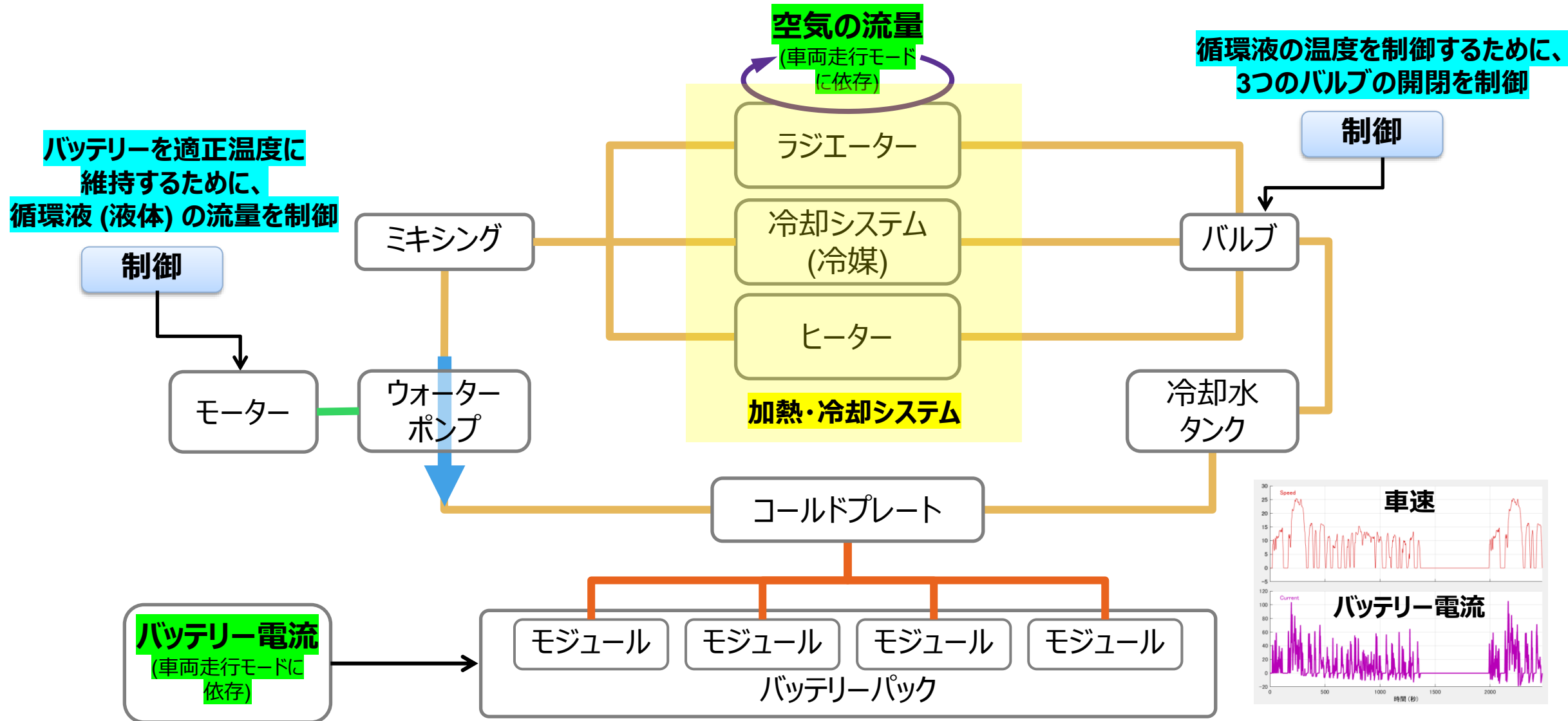


Simscapeの
アドオン製品
(拡張物理コンポーネント)

複合物理領域の
物理モデリング環境の
プラットフォーム
(基本物理コンポーネント)

熱・熱流体、故障②

バッテリーを適正温度に維持するために、流体を使って加熱・冷却するシステムを構築

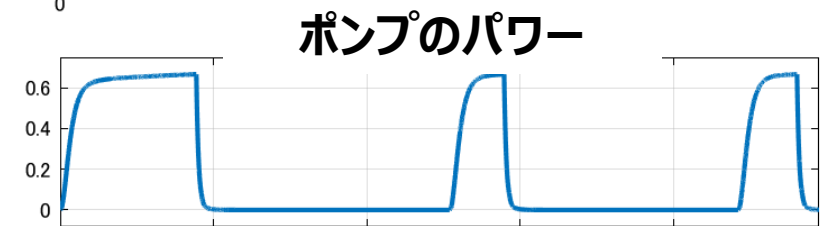
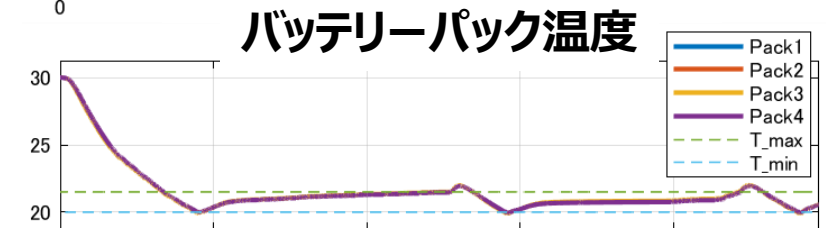
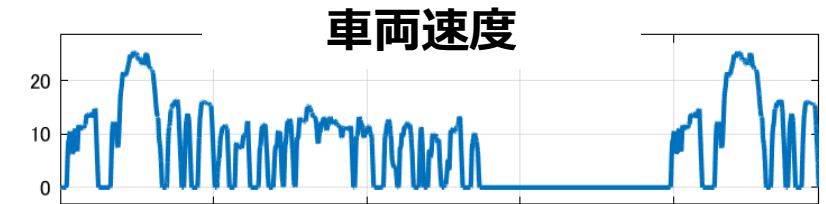
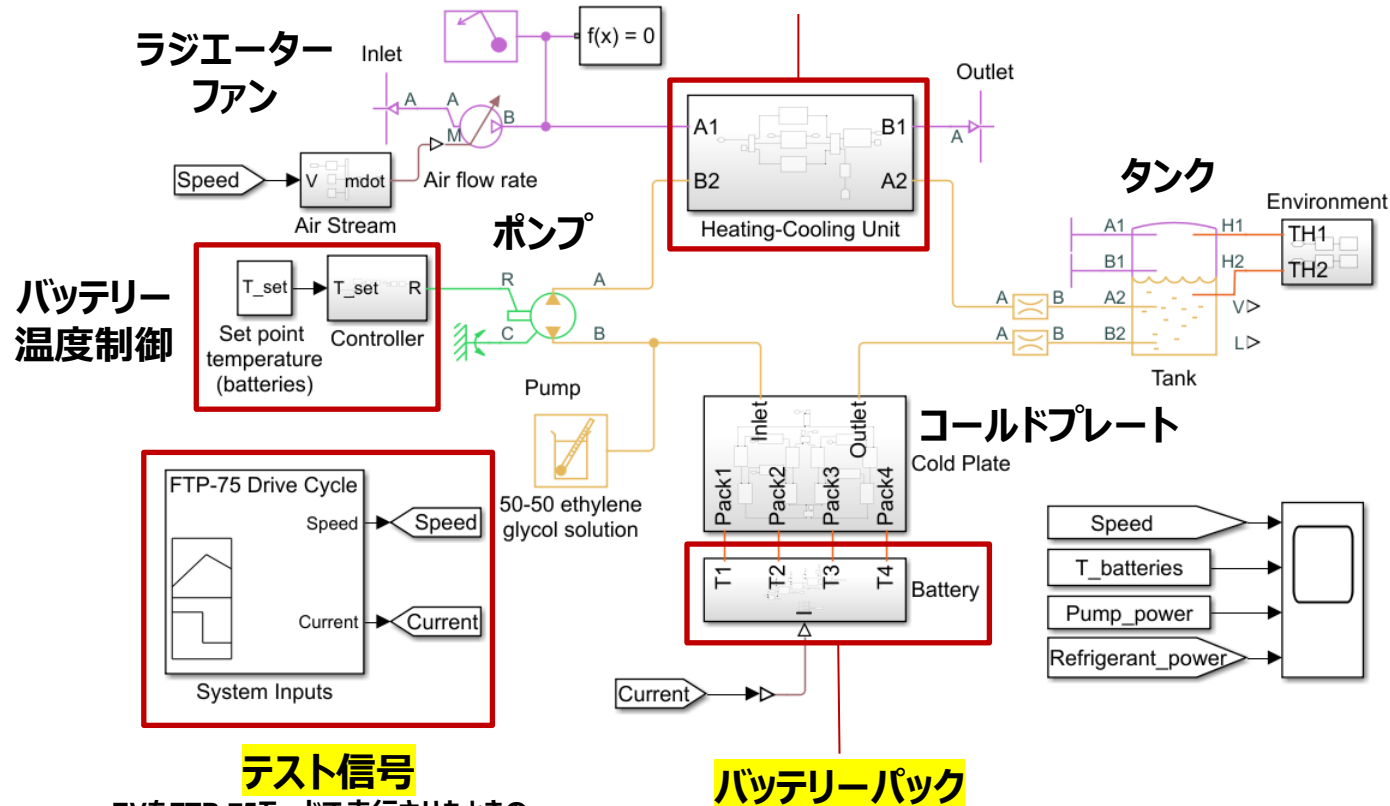


熱・熱流体、故障②

バッテリーを適正温度に維持するために、流体を使って加熱・冷却するシステムを構築

加熱・冷却ユニット

- ① 冷媒システム
- ② ラジエーター
- ③ ヒーター

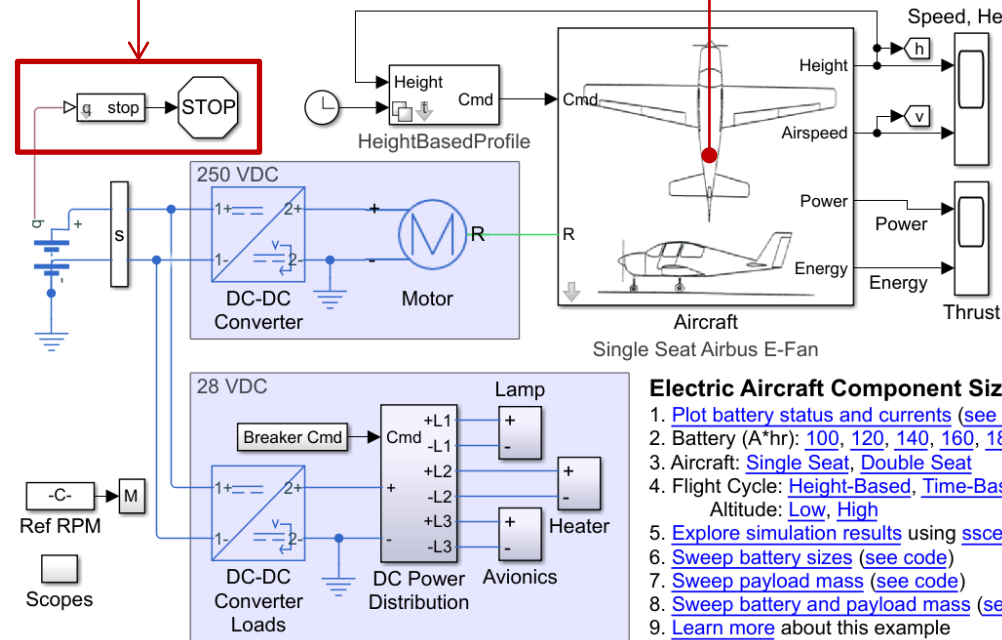
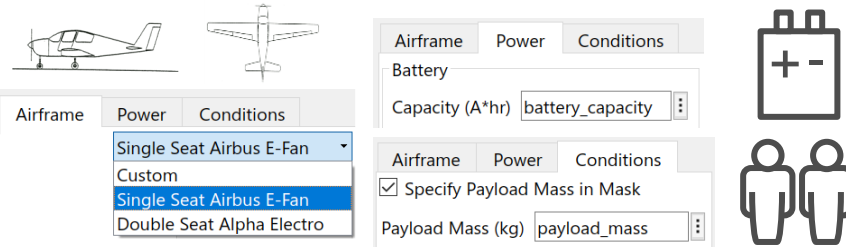


電動航空機

飛行距離、ペイロードの要件を満たすために、
航空機の構成、コンポーネントのサイズを検討

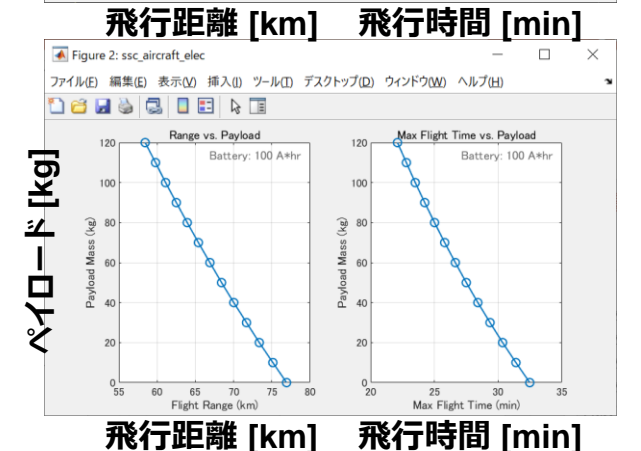
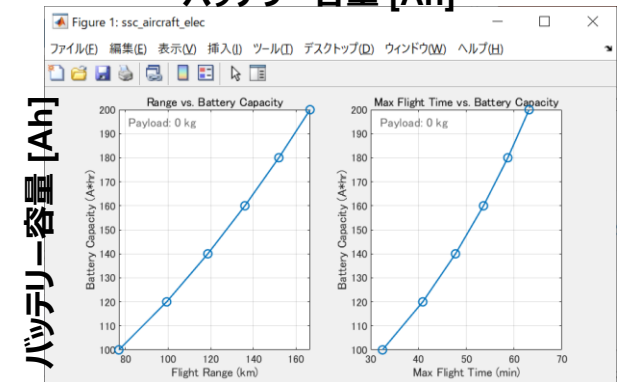
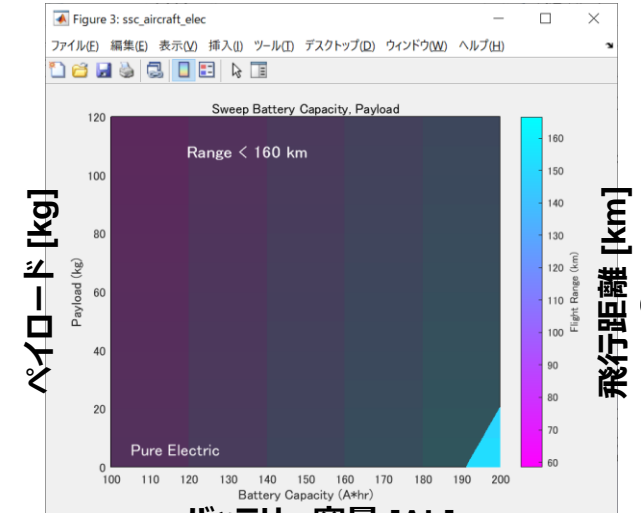
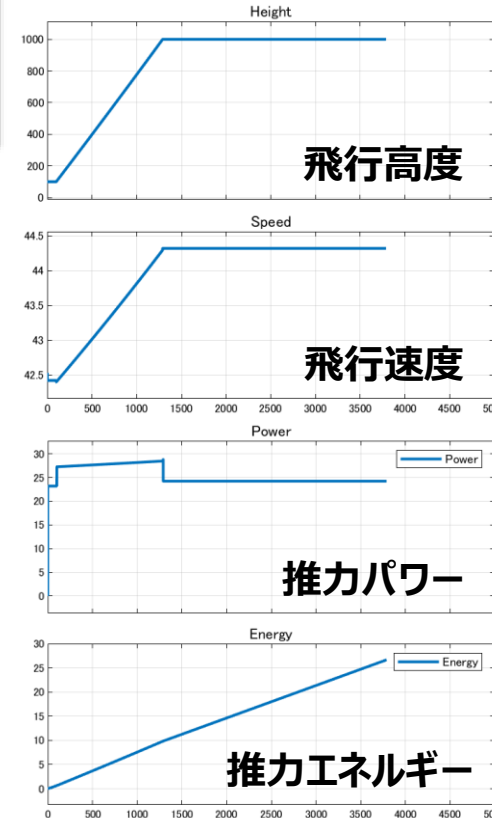
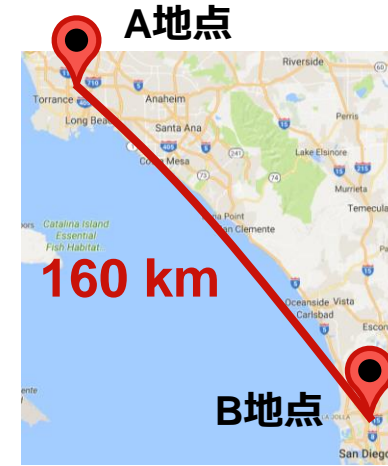
バッテリー容量が
20[Ah]以下になると
シミュレーションを停止

航空機の構成、バッテリー容量、ペイロード (乗客などの重量)
などの各種パラメーターを変更して、繰り返し解析を実施



Electric Aircraft Component Sizing

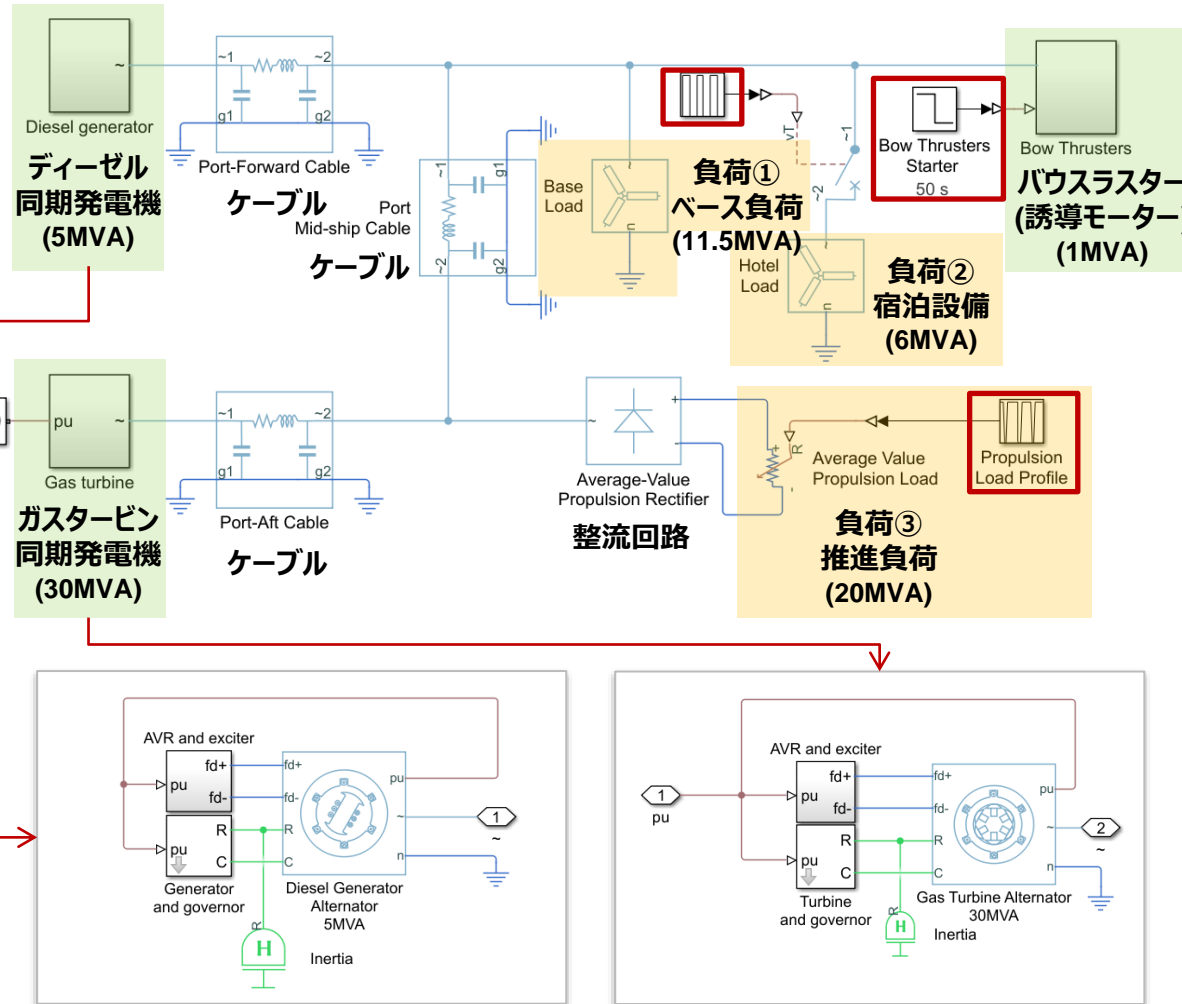
1. Plot battery status and currents (see code)
2. Battery (A*hr): 100, 120, 140, 160, 180, 200
3. Aircraft: Single Seat, Double Seat
4. Flight Cycle: Height-Based, Time-Based
Altitude: Low, High
5. Explore simulation results using [sscexplore](#)
6. Sweep battery sizes (see code)
7. Sweep payload mass (see code)
8. Sweep battery and payload mass (see code)
9. [Learn more](#) about this example



サンプルモデル: Electric Aircraft Model in Simscape ([Link](#))

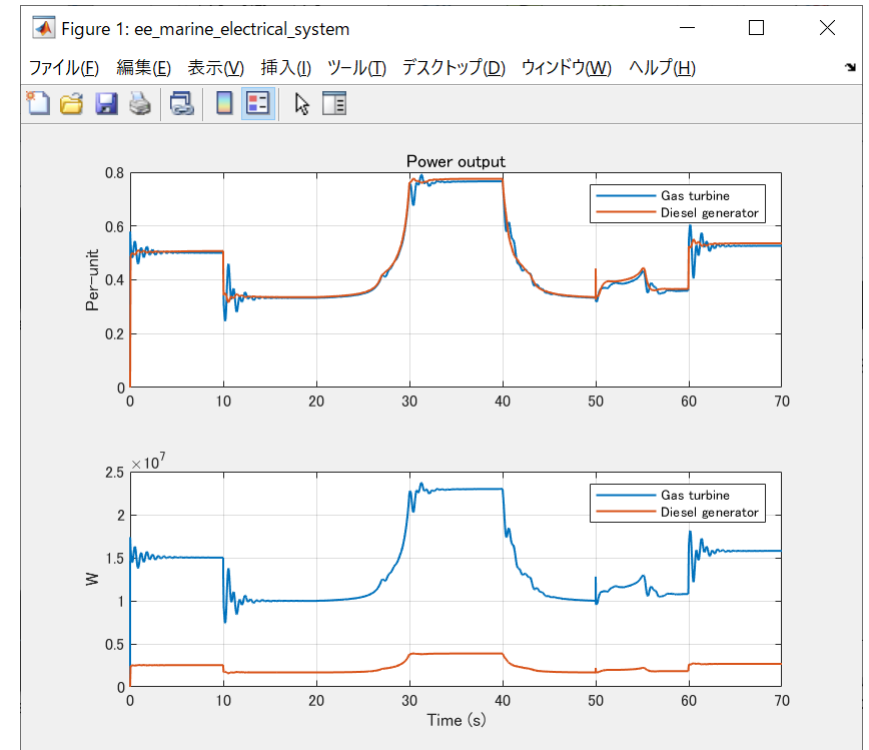
電動船舶

電動船舶の電力システムシステムにおいて、 負荷変動時の同期発電機の出電力などを計算



テストシナリオ (70[sec]の挙動を解析)

- 10[sec]: 宿泊設備負荷切断
- 20[sec]: 推進力の上昇開始
- 30[sec]: フルパワーで前進
- 40[sec]: 推進力の低下開始
- 50[sec]: バウスラスターの始動
- 60[sec]: 宿泊設備の負荷接続



ガスタービン発電機の出電力
 $P_{gas}[pu]$

ディーゼル発電機の出電力
 $P_{diesel}[pu]$

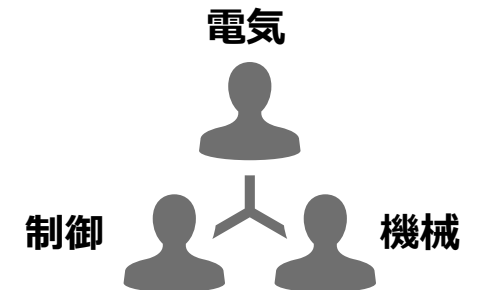
ガスタービン発電機の出電力
 $P_{gas}[W]$

ディーゼル発電機の出電力
 $P_{diesel}[W]$

アジェンダ

- はじめに
 - 電動ビークルのエネマネ制御の課題、MATLAB/Simulinkソリューション
- 例題
 - EVのエネマネ制御
- Tips情報
 - HEVのエネマネ制御
 - 熱・熱流体、故障
 - 電動航空機、電動船舶
- まとめ

-
- 目標車速**
- バッテリー残量 (SOC)**
- 環境**
- 目標車速**
- FTP75 (2474 seconds)
- Real Spd
- Longitudinal Driver
- ドライバー**
- Controllers
- Passenger Car
- プラント (EVの電気・機械)**
- コントローラー (エネマネ制御)**
- データ計測**
- 可視化
- ヘルプ
- Trace Velocity, Target, Actual (mph)
- Battery SOC (%)



MATLAB製品の評価版のお申込み
([Link](#))



Accelerating the pace of engineering and science

© 2021 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.