

モーター制御のモデルベースデザイン ～ シミュレーション検討からマイコン実装まで～

MathWorks Japan

アプリケーションエンジニアリング部 (制御)

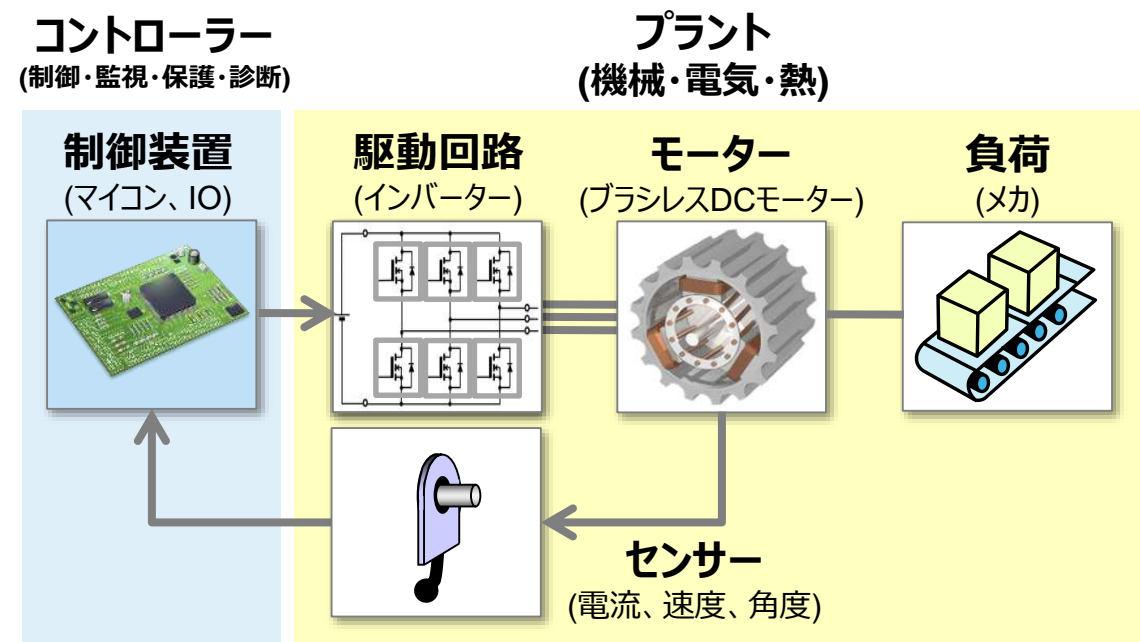
はじめに

本Webセミナーの対象者

- モーターを使った電動化システムの開発者
(例: メカの速度制御システムの機能・性能の検証)
- モーター制御開発者: ロジック検討からマイコン実装まで
(例: 高性能・高効率を実現する制御ロジックの開発&実装)

本セッションでお伝えしたいこと

MATLAB®/Simulink®を使った
プラントモデリング・制御設計から実装
までの基本フロー



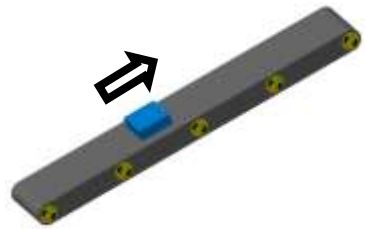
アジェンダ

- はじめに
 - 多種多様な電動機器について
 - モーター制御に対するニーズ・トレンド・課題

- モーター制御設計のモデルベースデザイン適用例
 - プラントモデル構築
 - 制御モデル構築
 - マイコン実装

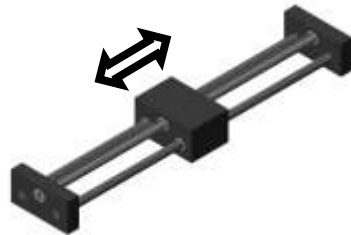
- まとめ

モーターを使用した様々な電動機器



搬送装置

搬送物の重さに関わらず
目標速度で運ぶ



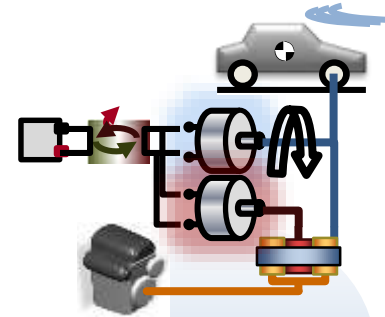
X軸ステージ

目標位置まで移動して
正確に停止する



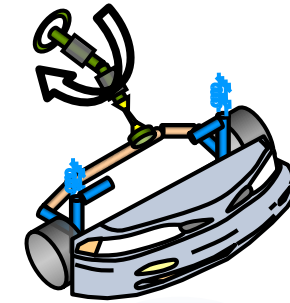
ロボットアーム

モノをつかんで
所定の位置に運ぶ



HEV/EV/FCV

車両走行状況に応じて
力行・回生をする



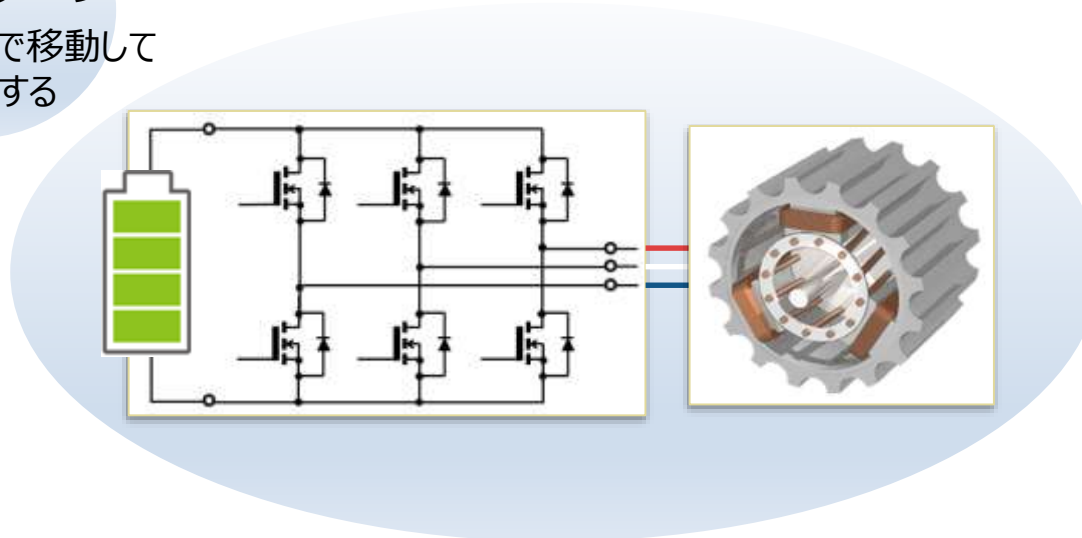
電動パワステ

車両走行状況に応じて
操舵力をアシストする



ドローン

複数のモーターを協調して
飛行する



モーター制御に対するニーズ・トレンド

電動化の普及・拡大

HEV/PHV、FA、プラント、
家電、空調、鉄道、等



省エネ化・高効率化・ 省スペース化

先進的なモーター/インバータ
駆動技術



制御の高精度化・ 高機能化

自動パラメータ調節
振動・騒音抑制
多軸同期制御



品質・安全性向上

過負荷・過電流保護、
自動診断



低コスト化

センサレス制御、
安価なマイコンの採用



開発期間短縮

タイムリーな製品市場投入



課題・解決

ユーザー様の声

[課題・要望]



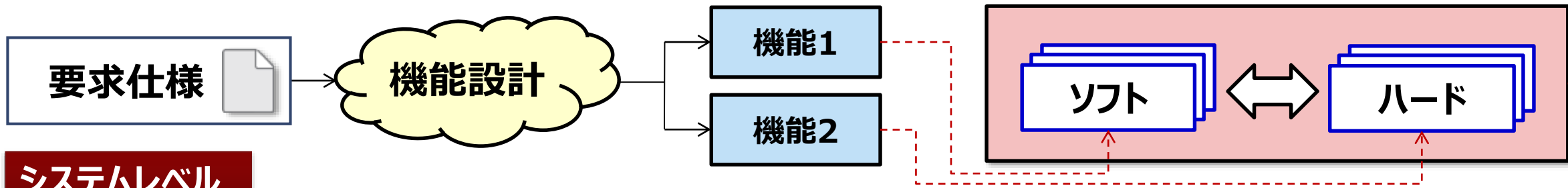
- ① 開発効率を改善したい。
- ② 実機レスで、制御ロジックの試行錯誤をしたい。
- ③ 実機導入の検討で、機能や電力コスト等を事前に見積りたい

[解決]



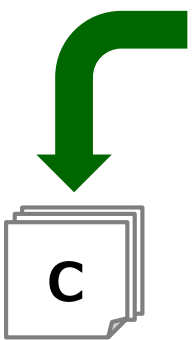
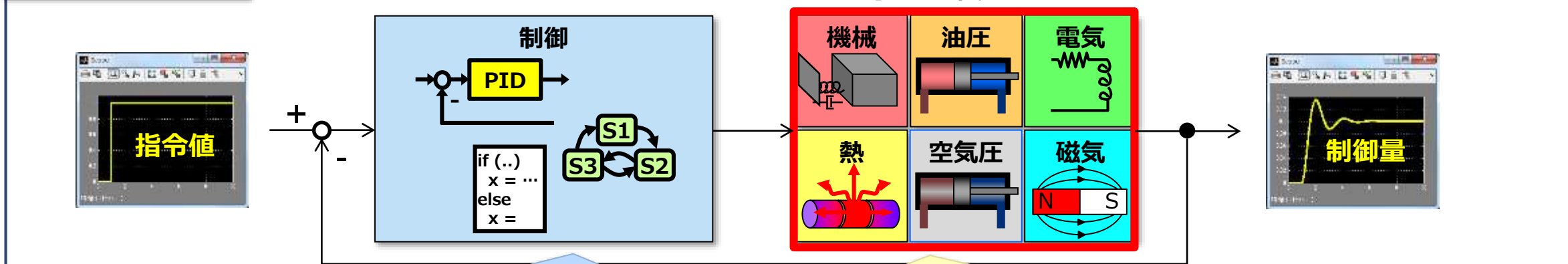
- モデルベースデザインを導入することで解決可能です。
- ✓ マルチドメインによるプラントモデルの構築
(ex: 電気・機械・熱等のダイナミクスの可視化が可能)
 - ✓ シミュレーションによる制御ロジックの試行錯誤
 - ✓ 自動コード生成技術

MATLAB/Simulinkを活用した開発フローの概要



システムレベル
シミュレーション

コントローラ (制御・監視・診断) プラント (機械・電気・油圧・熱など)



フローチャート
状態遷移図
状態遷移表

PID Controller
数学

External Scheduler
function()
Controller
周期/非周期
の制御ロジック

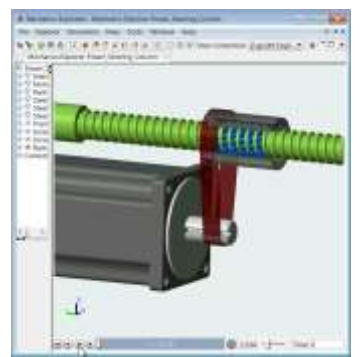
既存Cコード

数式

Transfer Fcn

物理コンポーネント

2-D Lookup Table
実験データ



物理モデリングツールを使ったプラントモデリング (駆動回路、モーター、メカ)

パワエレ/電力系統 (電気回路)




Electrical

- モーター/ジェネレーター
- 半導体素子、トランス
- バッテリー、太陽電池
- センサー

Simscape Electrical™

熱流体 (熱流体回路)

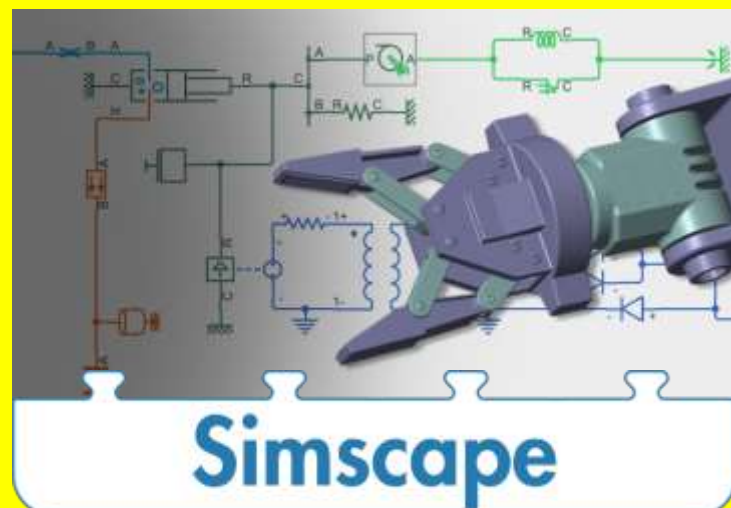


Fluids

- モーター、ポンプ
- バルブ、パイプ、タンク
- オリフィス、チャンパー
- 熱交換器

Simscape Fluids™

回路図ベースの複合物理モデリング



- 10種の物理領域に対応
- 物理モデリング言語
- コアシミュレーションエンジン
- データログ・解析ツール

動力伝達 (1Dメカ)



Driveline

- ギア、ベルト
- タイヤ、エンジン
- クラッチ
- トランスミッション

Simscape Driveline™

機構 (3Dメカ)



Multibody

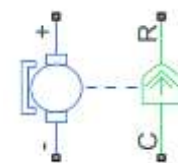
- 3Dダイナミクス
- 順動・逆動力学解析
- CADインポート
- メカのアニメーション

Simscape Multibody™

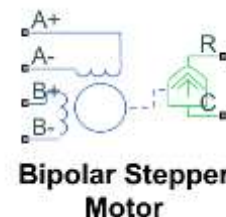
多種多様なモーターモデルを提供

→ 物理法則に基づいてモーターの電気・機械の動的な振る舞いを表すモデルを構築済み

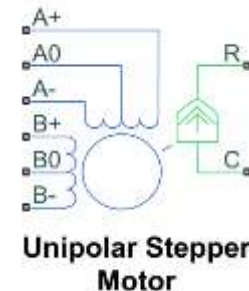
- 汎用モーター (回転、並進)
- RCサーボモーター
- DCブラシ付きモーター
- ステッピングモーター (2相バイポーラ、ユニポーラ駆動)
- 誘導モーター (単相、三相)
- 同期モーター (三相)
- ブラシレスDCモーター
- 永久磁石同期モーター (単相、三相)
- ハイブリッド励磁形永久磁石同期モーター (永久磁石界磁 + 巻線界磁)
- スイッチトリラクタンスモーター
- シンクロナスリラクタンスモーター
- 超音波モーター (回転タイプ、並進タイプ)
- 圧電スタック
- ソレノイド



DC Motor



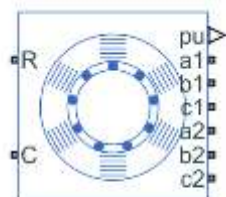
Bipolar Stepper Motor



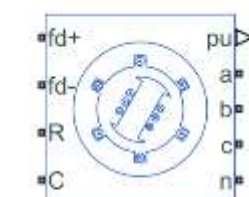
Unipolar Stepper Motor



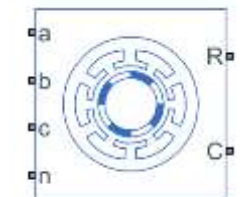
Induction Machine (Single-Phase)



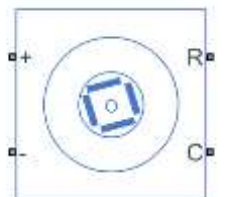
Induction Machine Squirrel Cage



Synchronous Machine Salient Pole



BLDC



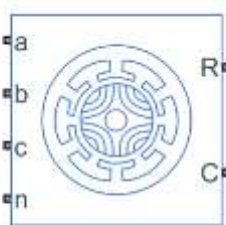
PMSM (Single-Phase)



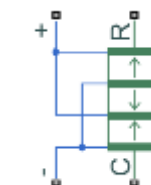
PMSM



Switched Reluctance Machine



Synchronous Reluctance Machine



Piezo Stack

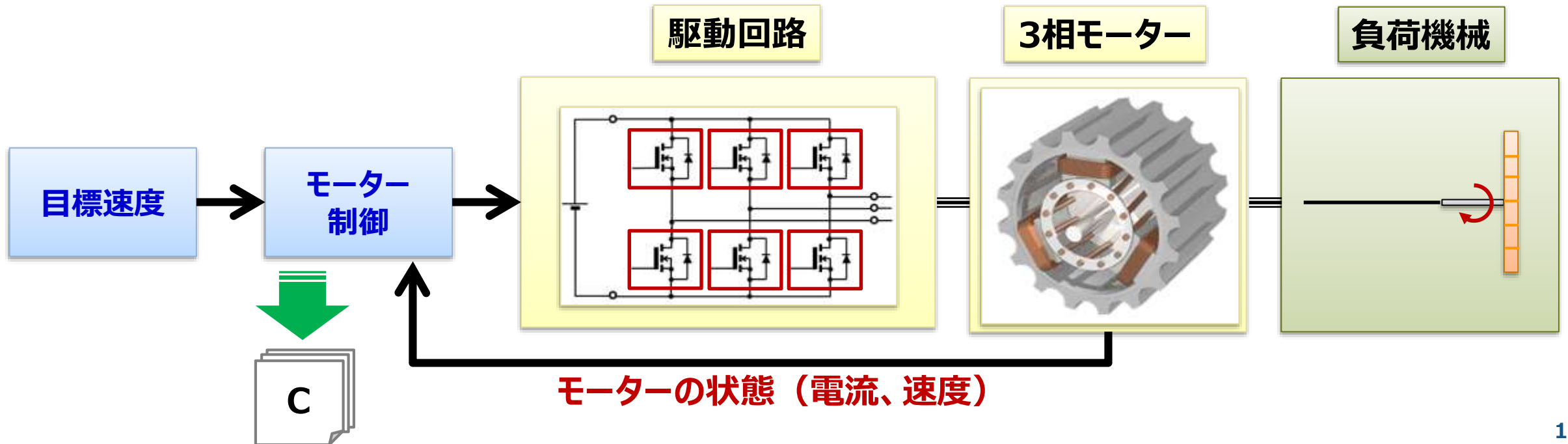
※ モーターモデルの数式やパラメータの説明は、ヘルプドキュメントに詳細に記載。また、それぞれのモーターモデルのサンプルも用意されてます。

アジェンダ

- はじめに
 - 多種多様な電動機器について
 - モーター制御に対するニーズ・トレンド・課題
- モーター制御設計のモデルベースデザイン適用例
 - プラントモデル構築
 - 制御モデル構築
 - マイコン実装
- まとめ

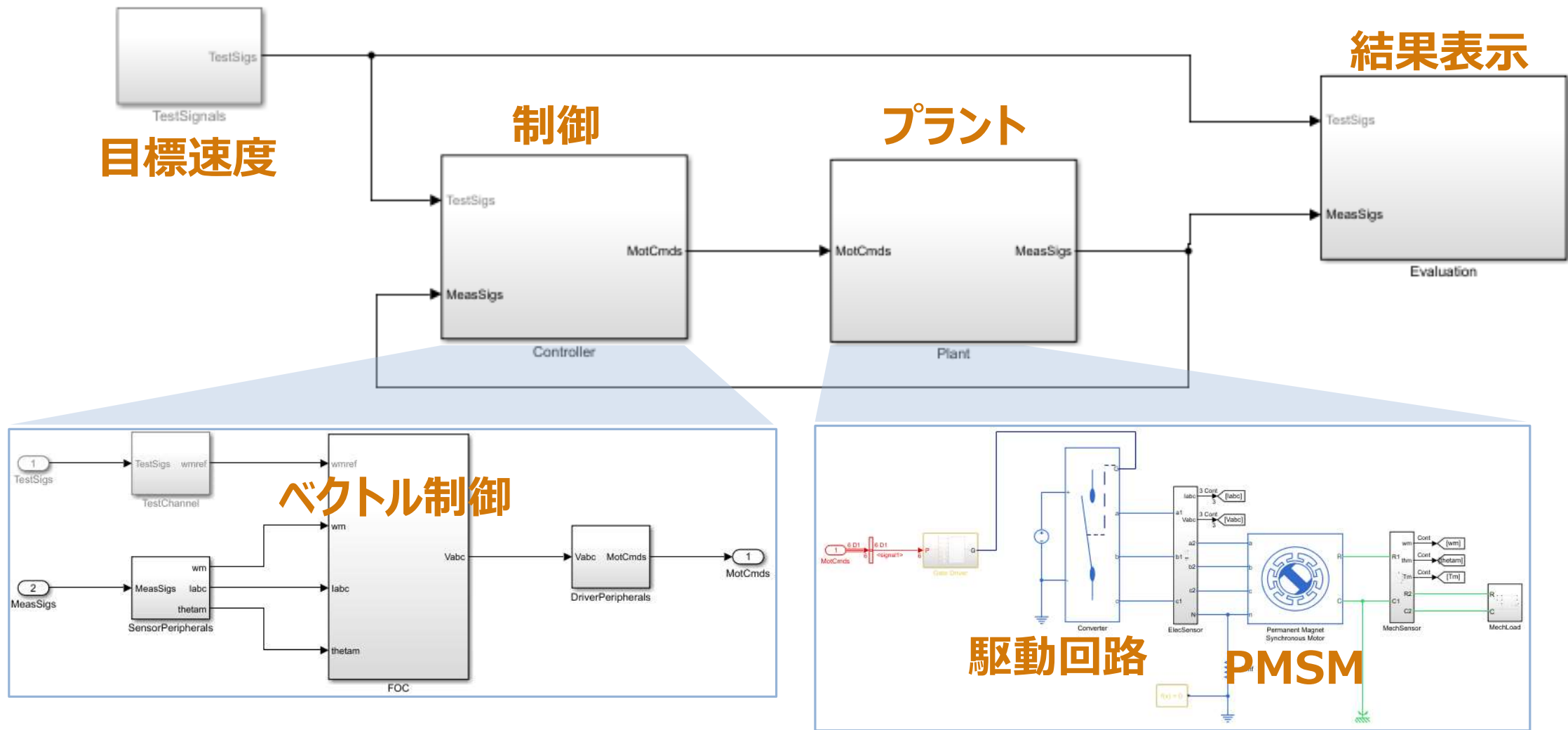
モーター制御設計のモデルベースデザイン適用例

- 例題：モーター制御システム（PMSM）
 - ✓ - STEP1：モーターモデルの構築
 - ✓ - STEP2：コントローラモデルの構築
 - ✓ - STEP3：実装用コード生成



モーター制御モデル全体図

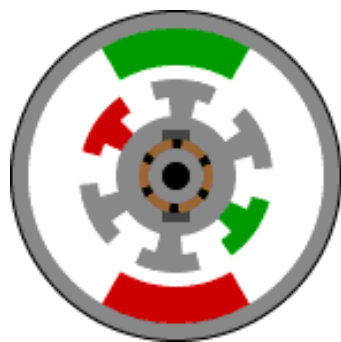
グラフィカルなモデリング環境で直感的に機能が把握できます



STEP1-1 : モーターのモデリング

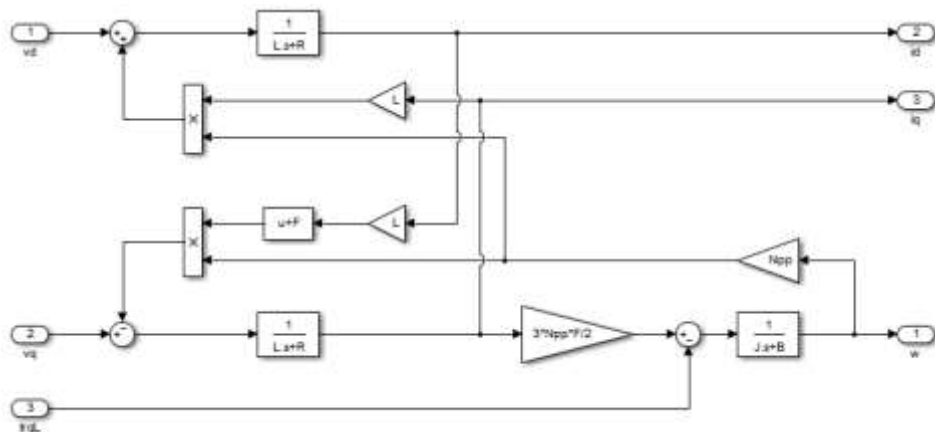
様々な形式でモーターを表現できます

ブロック線図モデリング環境



Simulink®

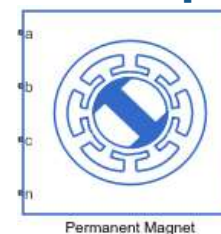
伝達関数を用いたdq軸モデル例



物理モデリング環境



Simscape Electrical™



Permanent Magnet

同期モーター

理想モーターモデルブロックを提供



モーター仕様を設定してすぐに利用できます

STEP1-2 : 駆動回路のモデリング

抽象度を変え、様々なパワエレ回路を表現できます

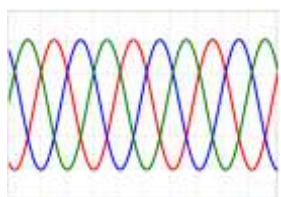
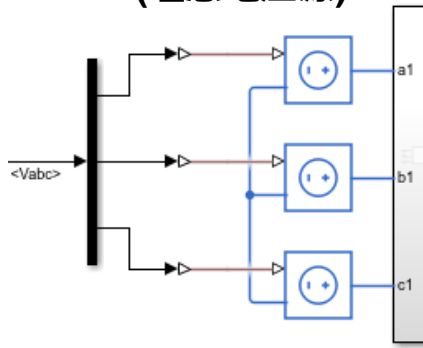
3相インバーターモデル例

詳細度 : 低

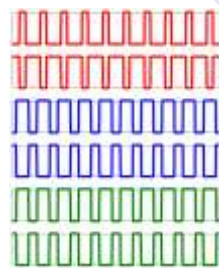
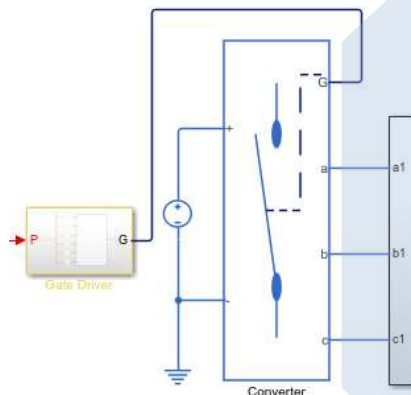
計算 : 速

高
遅

理想インバーター
(理想電圧源)



3相電圧



ゲート信号
(×6)

ブロックパラメーター: Converter

Converter (Three-Phase)

このブロックは、3本のブリッジアームで構成される6パルス三相制御コンバーターを表します。ブリッジアームのそれぞれに2つのスイッチングデバイスがあります。スイッチングデバイスを、GTO、Ideal Semiconductor Switch、IGBT、MOSFET、Thyristor または Averaged Switch から選択します。

Averaged Switch ベースの実装では、指定された期間にわたって平均することができる 0 ~ 1 のゲート信号を使用します。この実装では、モデルのアンダーサンプリング、または PWM 信号以外の変調波形を使用できます。

このブロックのバリエーション実装にアクセスするには、ブロックを右クリックし、[Simscape] > [ブロックの選択] を選択します。

設定

各種 半導体素子を提供

スイッチングデバイス: IGBT (選択済み)
 集積ダイオード
 スナバ

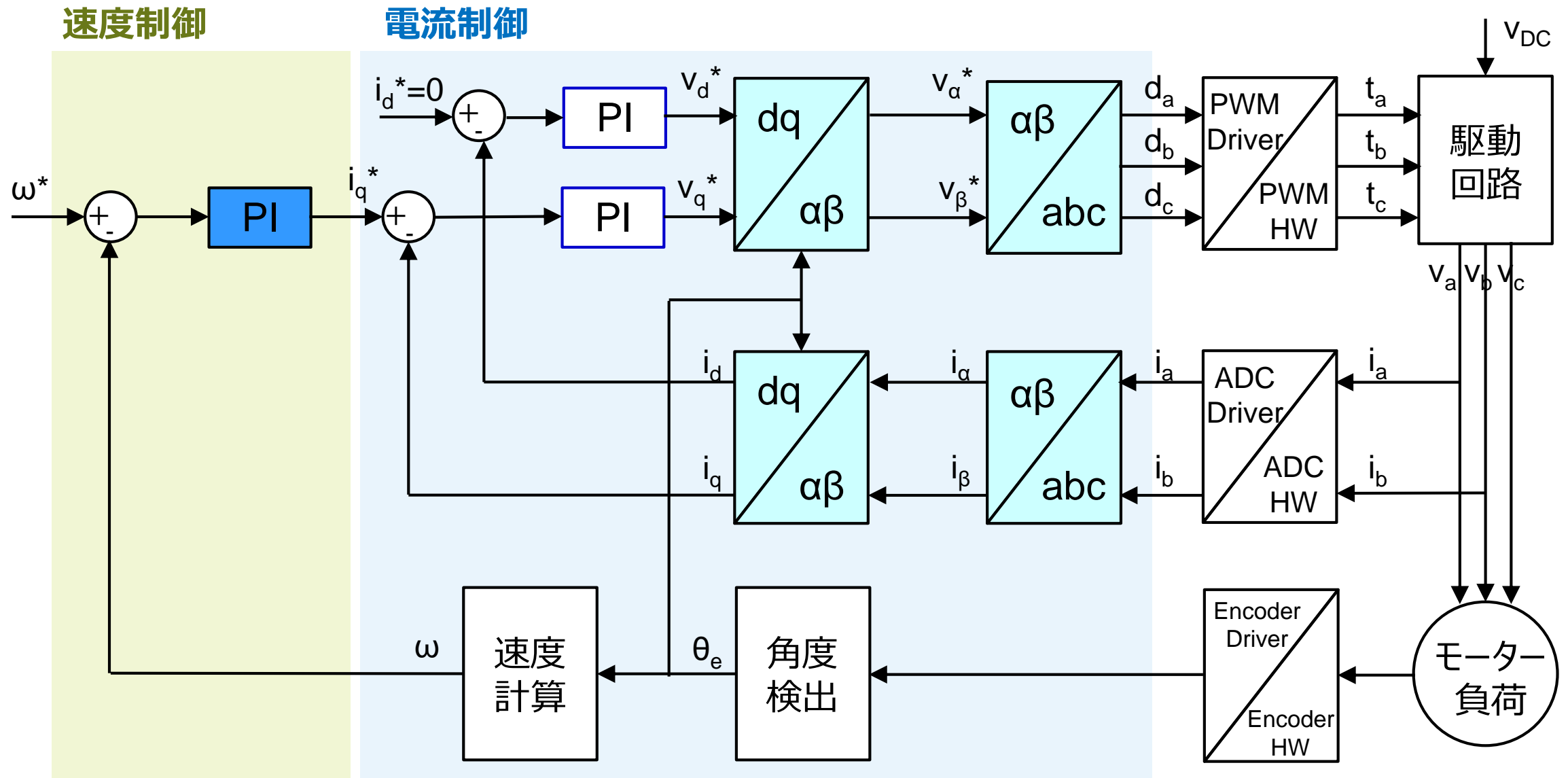
スイッチングデバイス: IGBT, GTO, Ideal Semiconductor Switch, MOSFET, サイリスタ, Averaged Switch

順電圧、 V_f :
 オン状態の抵抗:
 オフ状態のコンダクタンス:
 しきい値電圧、 V_{th} : 0.5 V

コンパイル時

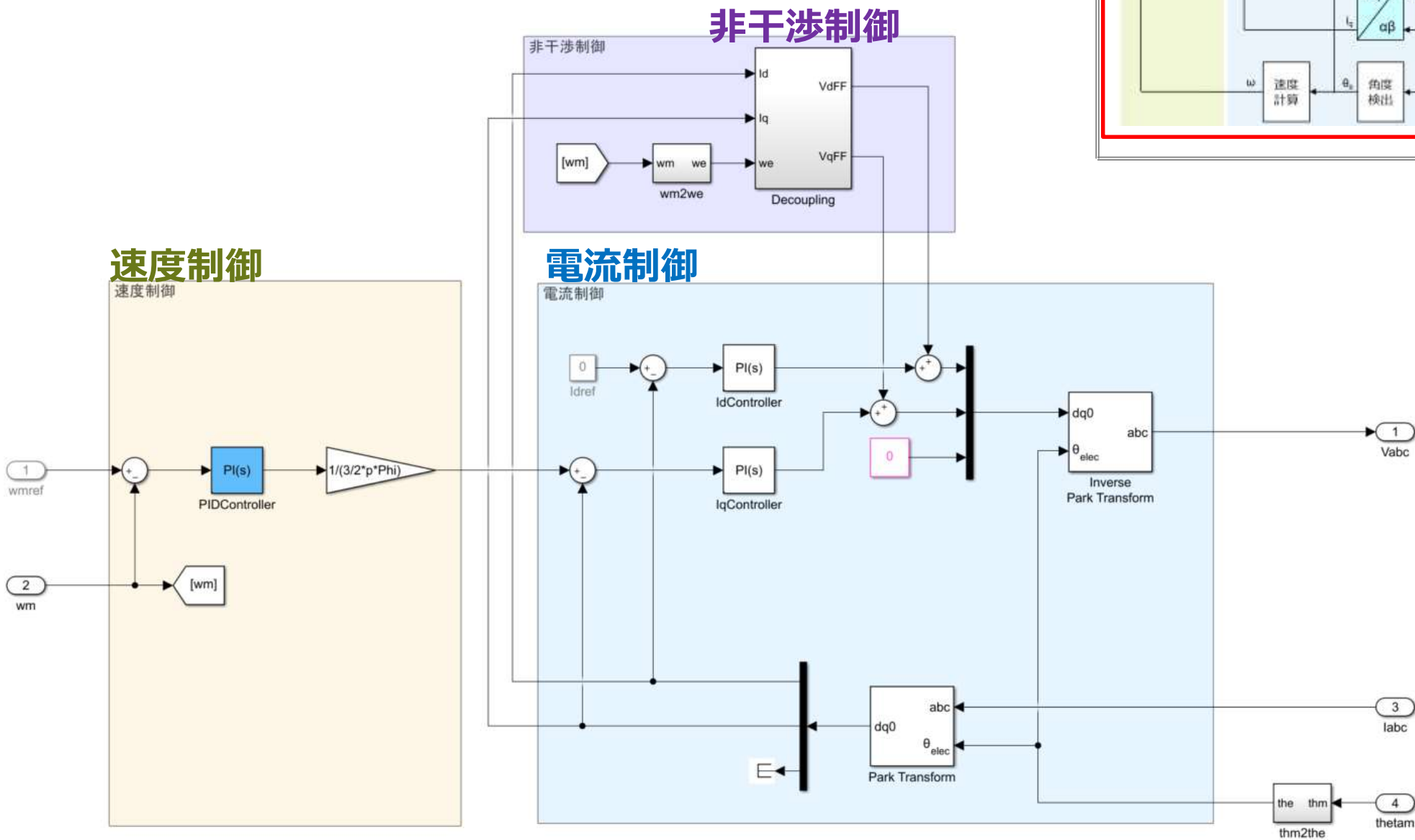
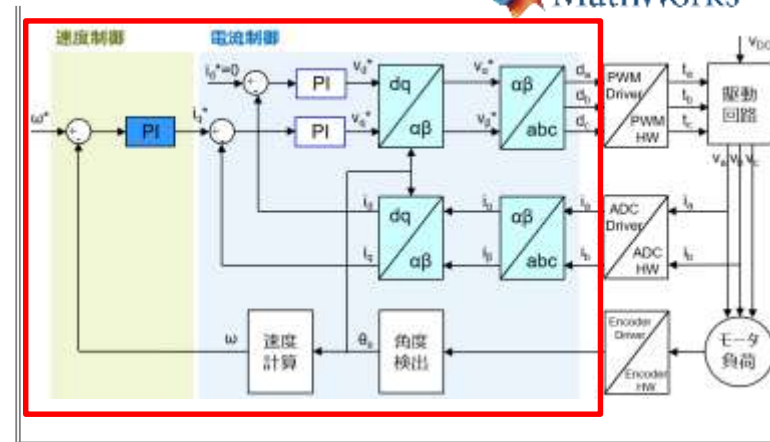
OK(O) キャンセル(C) ヘルプ(H) 適用(A)

STEP2:コントローラモデルの構築(ベクトル制御)



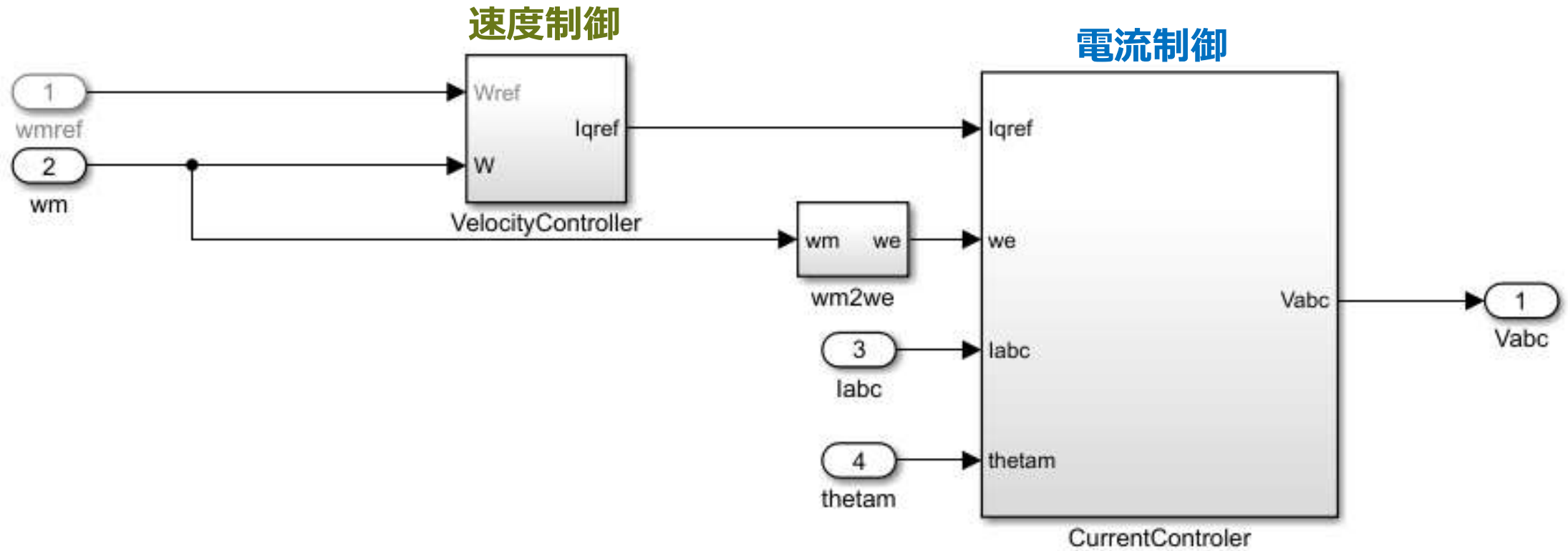
STEP2:ベクトル制御の構築

座標変換ブロックを使って直感的に構築



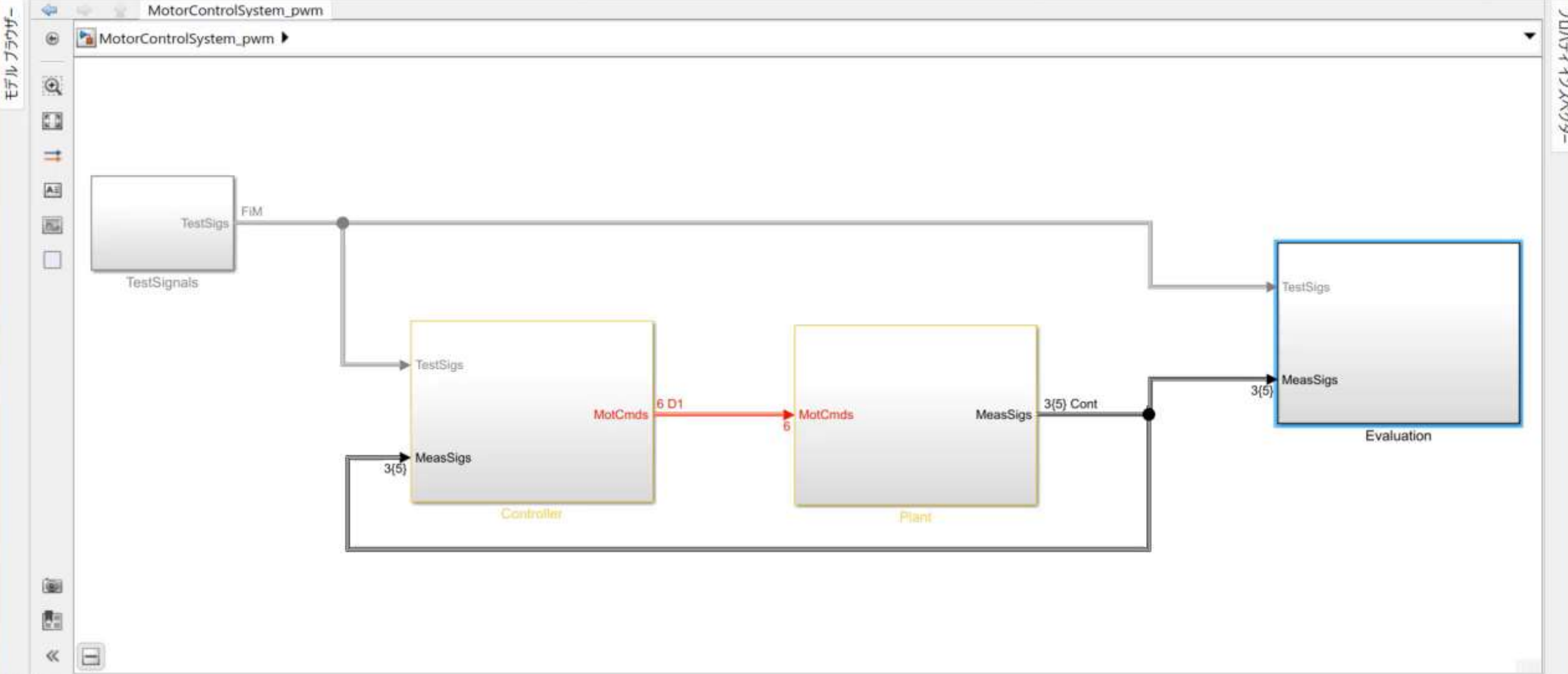
STEP3-1:コントローラモデルの構築

サブシステムで機能ごとに整理



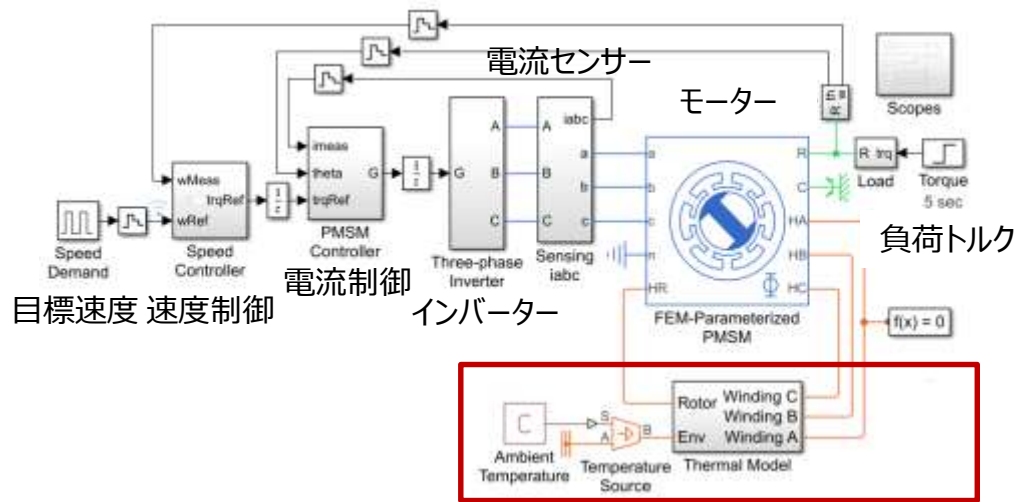
シミュレーション デバッグ モデル化 書式設定 アプリ **SUBSYSTEM ブロック**

新規 開く 保存 印刷 ファイル ライブラリ ライブラリ 信号のログ ビューアーの追加 信号テーブル 準備 終了時間 1 アクセラレータ 高速リスタート ステップを戻す 実行 ステップを進める 停止 データインスペクター ロジックアナライザー 結果の確認

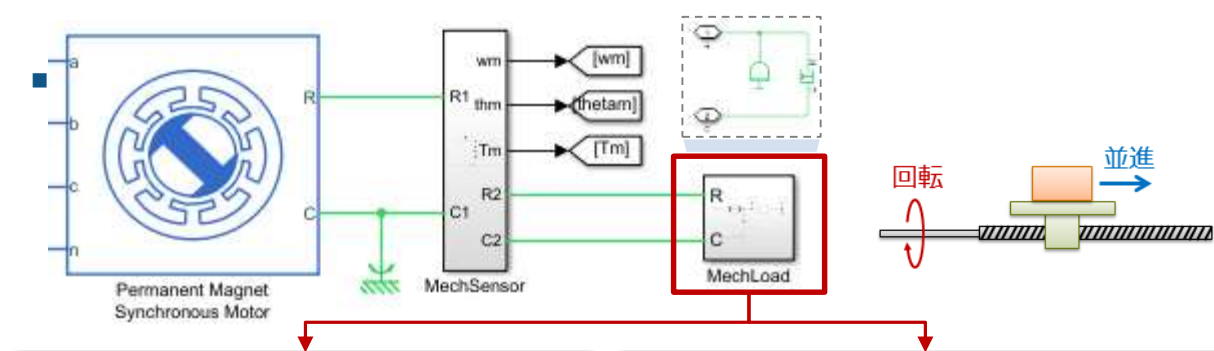


マルチドメインによる検討例

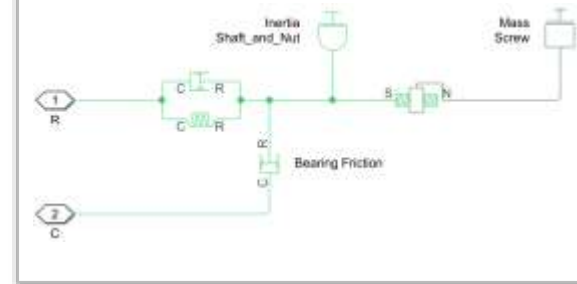
熱の影響を検討



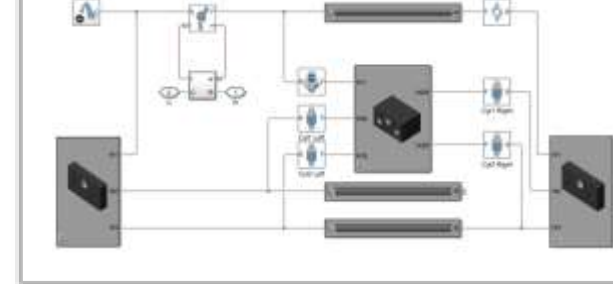
詳細なメカ機構と繋げて検討



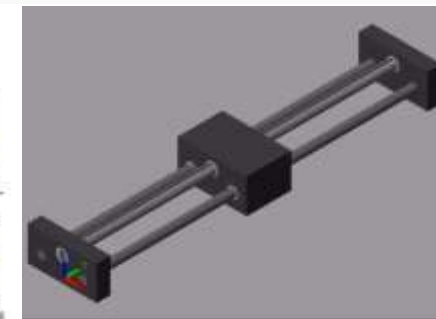
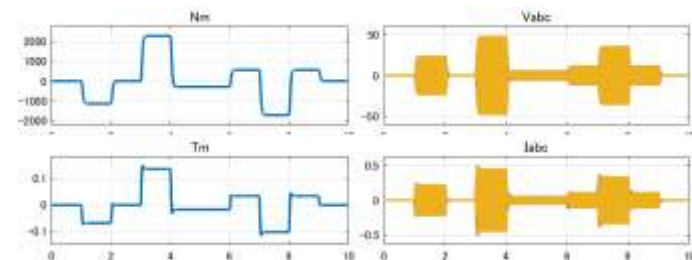
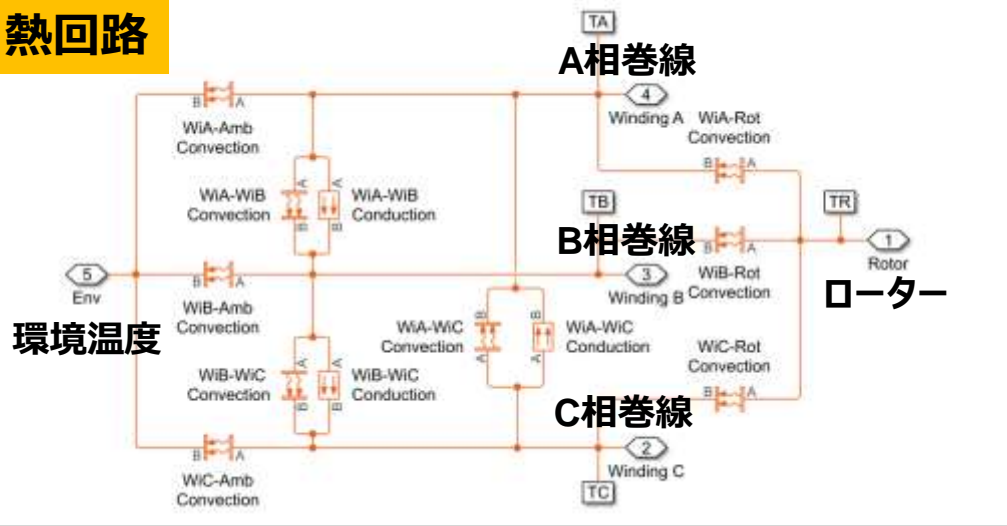
Simscape Driveline



Simscape Multibody

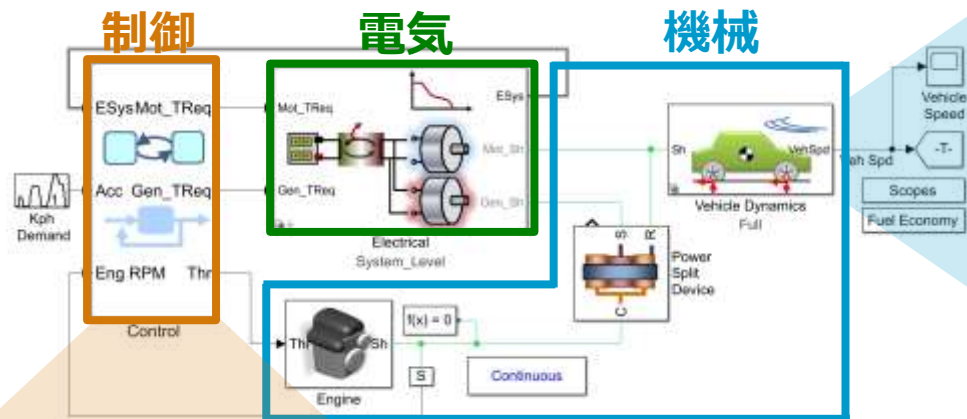


熱回路

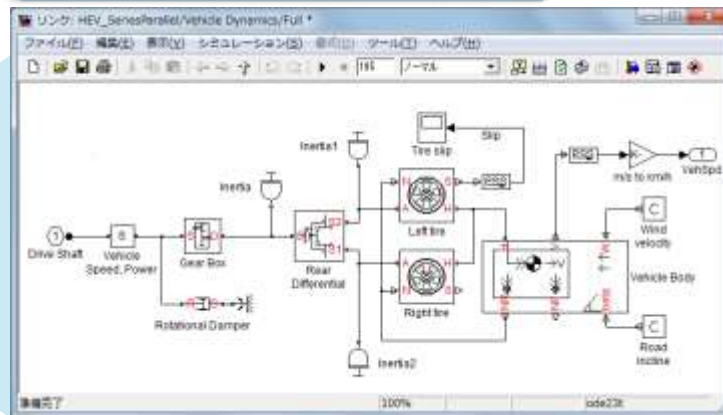


HEVモデル ~マルチドメイン物理システムのモデリング例~

ハイブリッド自動車

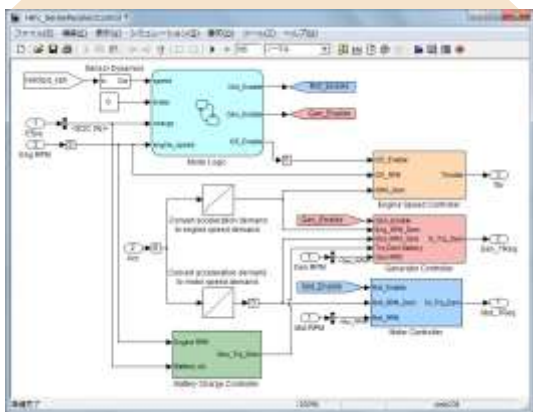
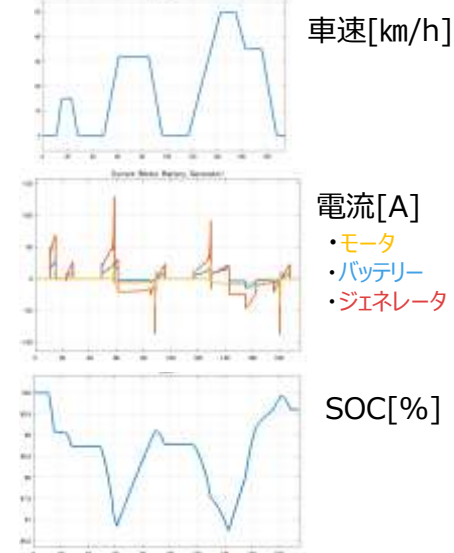


Simscape Driveline 機械系モデル



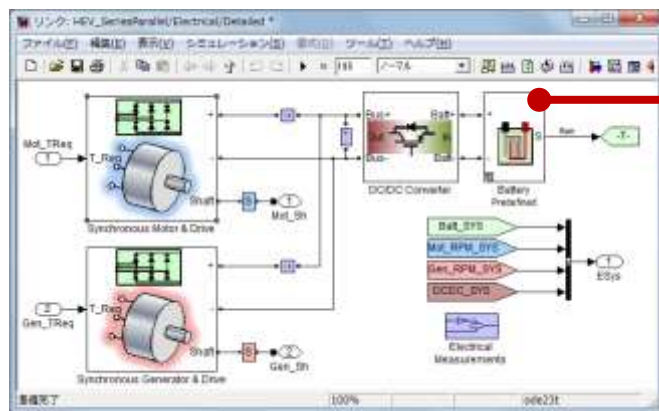
ギア・差動ギア・タイヤ・車両ボディ
エンジン・遊星ギア

解析結果



Simulink & Stateflow

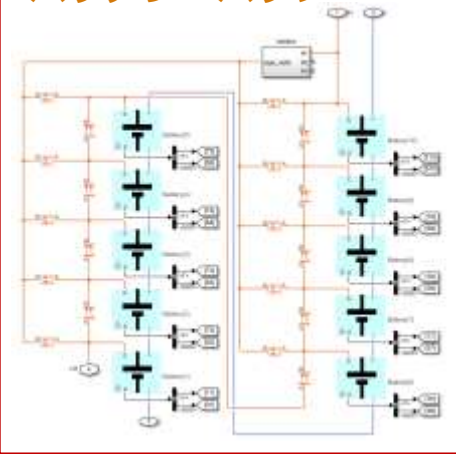
制御ロジック



Simscape Electrical 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

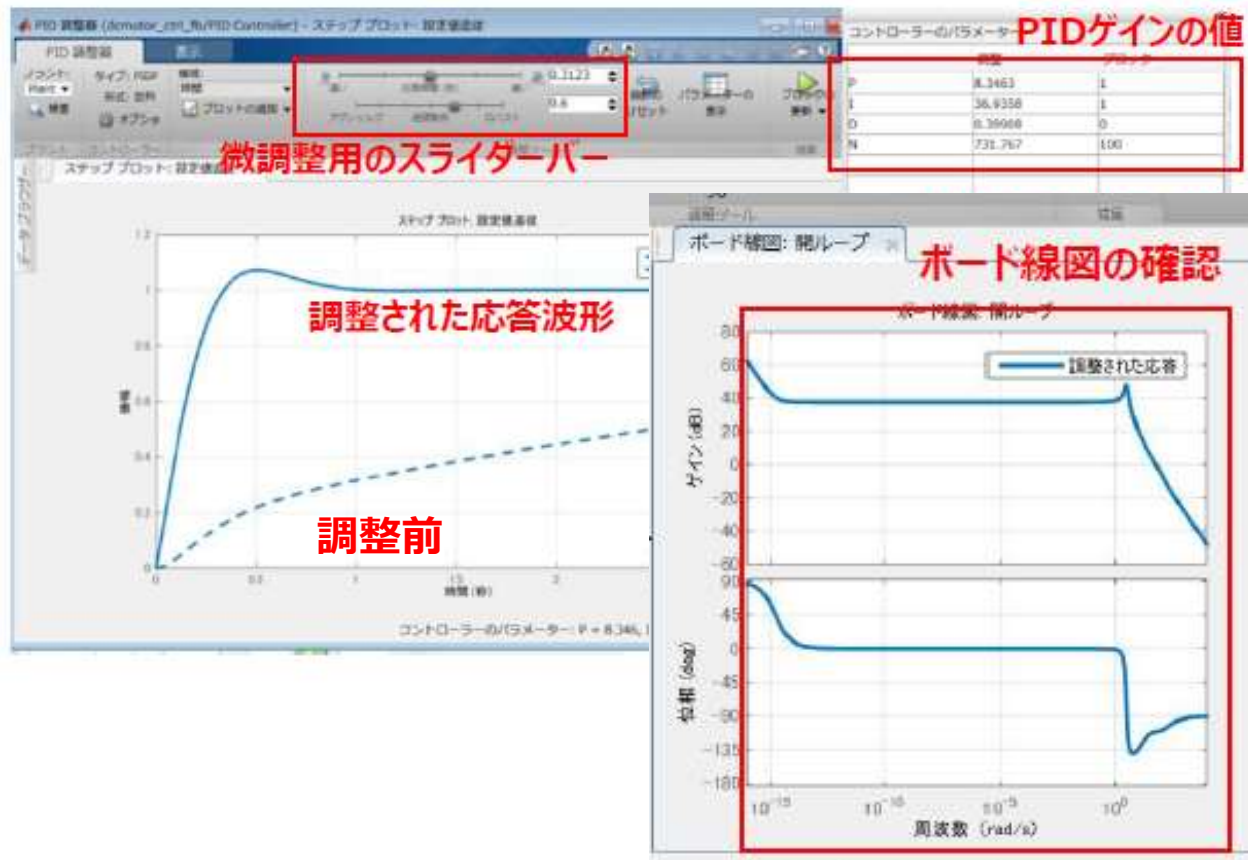
バッテリーパック



Tips : プラントおよびコントローラパラメータのチューニング

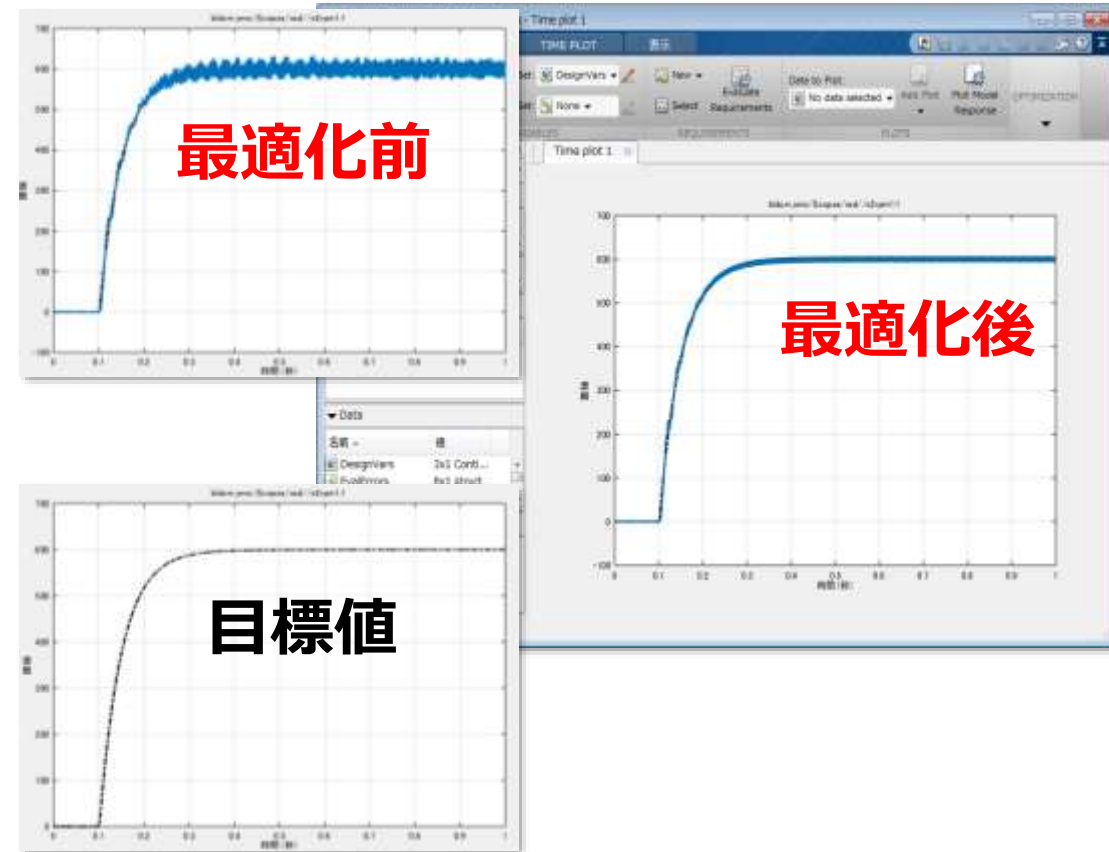
Simulink Control Design™

PIDコントローラの自動チューニング

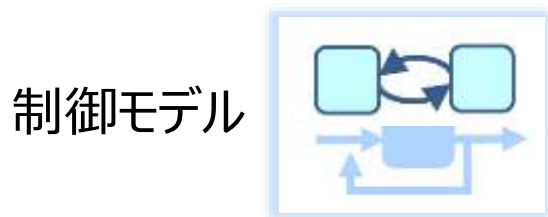


Simulink Design Optimization™

パラメータ自動調節による応答最適化



STEP3 : 制御モデルを実装フロー



.C
.C++



組み込み
量産ソフト開発



組み込み制御装置を用いた制御実験 (on target RCP)

- **Simulink[®] / Stateflow[®] / Motor Control Blockset[™]**

- モデル作成・シミュレーション基本環境

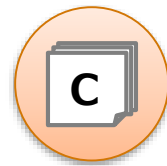
- **Fixed-Point Designer[™]**

- 固定小数点設定

- **Embedded Coder[®]**

- モデルから効率性・可読性に優れた C/C++コードを自動生成

※ライセンス上、MATLAB Coder, Simulink Coderも必要



モデル生成コードの利用タイプ

	1 ソフトコンポーネント型（基本）	2 モデルビルド型（応用）
利用イメージ	<p>アプリの一部をモデル化、生成されたコードを既存ソフトに組み込む</p>	<p>MCU/DSP用ブロックライブラリ利用、モデルを直接実装する</p>
主な用途	既存ソフトとの差分開発 HW/OS非依存アプリの開発	MCU/DSPを用いた制御実験 (On Target RCP)
特徴	標準ブロックのみ使用	専用ブロックライブラリを一部使用
I / O	グローバル変数 / 引数	AD/DA, PWM, CAN等のI/Oブロック
注意点	ビルド・結合は手動で行う必要アリ	対応MCU/DSP限定、HW知識も必要
対応MCU/DSP	生成コードはANSI/ISO-C準拠なので ほぼ全てのMCU/DSPに対応可能	TI C2000, STMicro STM32F4 等 (MathWorksまたはベンダから提供)

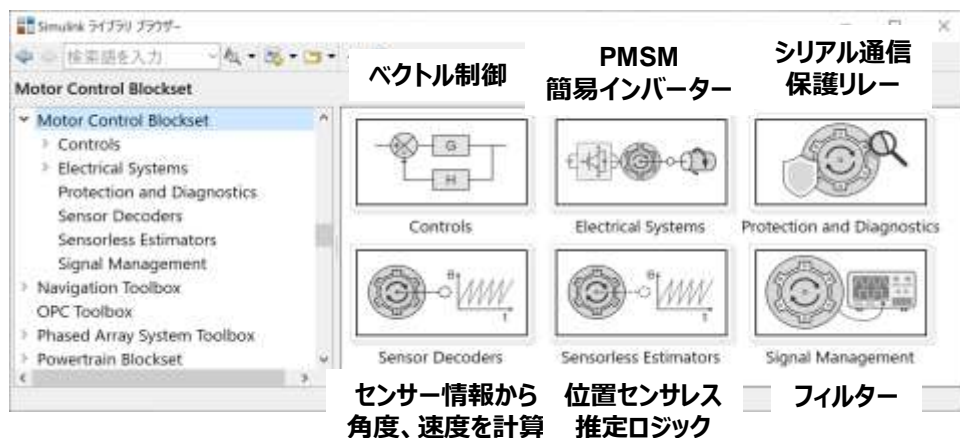
Motor Control Blockset

永久磁石同期モーター (PMSM) のベクトル制御の設計・実装のターンキーソリューション

■ 主な特長

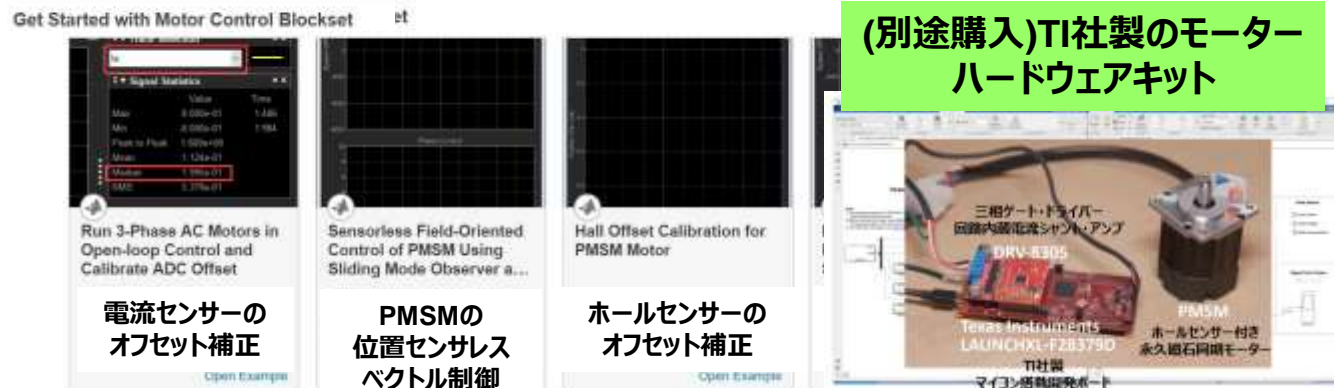
1. 「PMSMのベクトル制御」に特化した制御対象・制御ロジックのSimulinkライブラリを提供
2. 「PMSMのベクトル制御」のシミュレーションからマイコン実装までの手順書&サンプルモデルを提供

1. PMSMのベクトル制御に特化した Simulinkライブラリ



2. シミュレーションからマイコン実装までの手順書&モデルビルド型のサンプルモデル (一例)

Motor Control Blockset — Examples

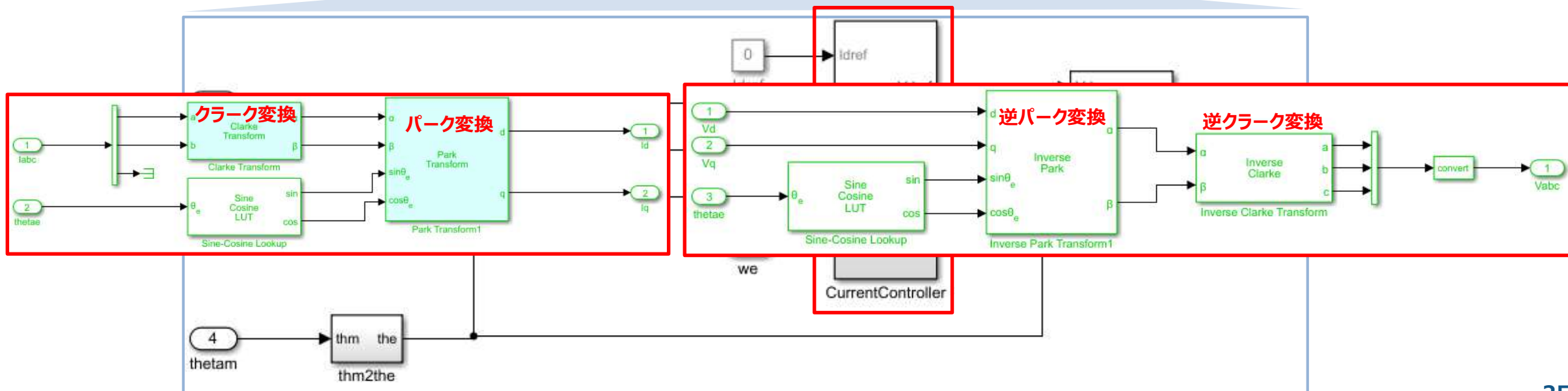
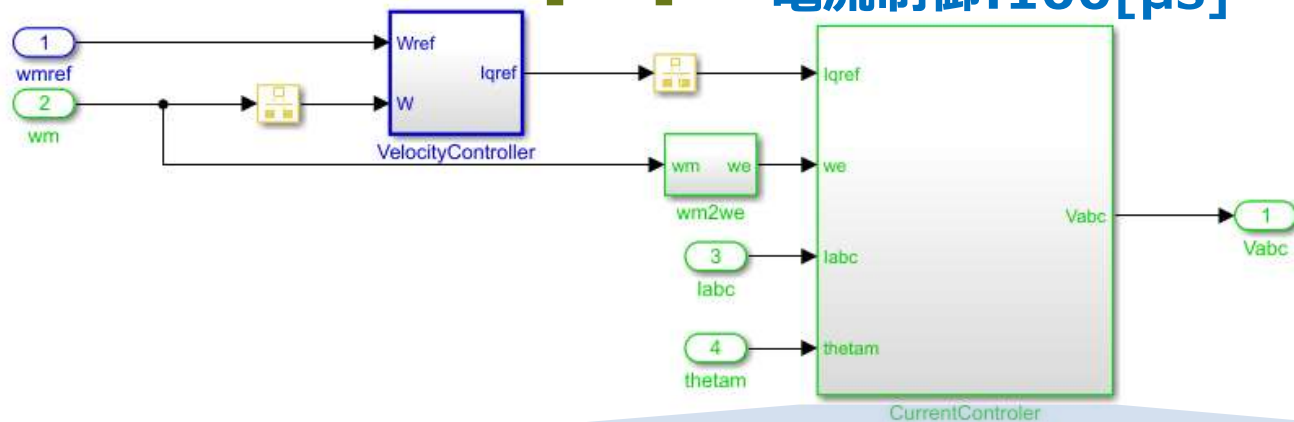


コントローラモデルの構築

Motor Control Blockset™を使って直感的に構築

速度制御: 1[ms]

電流制御: 100[μs]



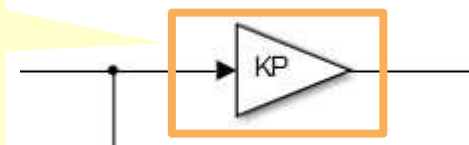
コード生成設定（前準備）

- コンフィギュレーションパラメータ
 - 処理系情報や最適化等を設定



- 変数・定数(RAM/ROM)設計
 - 信号やパラメータに対して変数属性（名前、記憶クラス等）を設定

defineマクロ値として生成
#define KP 0.0014F



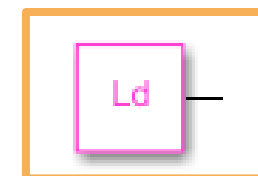
信号をグローバル変数として定義
extern real32_T Wref;

```
Wref = Simulink.Signal;
Wref.DataType = 'single';
Wref.CoderInfo.StorageClass = 'ExportedGlobal';
```

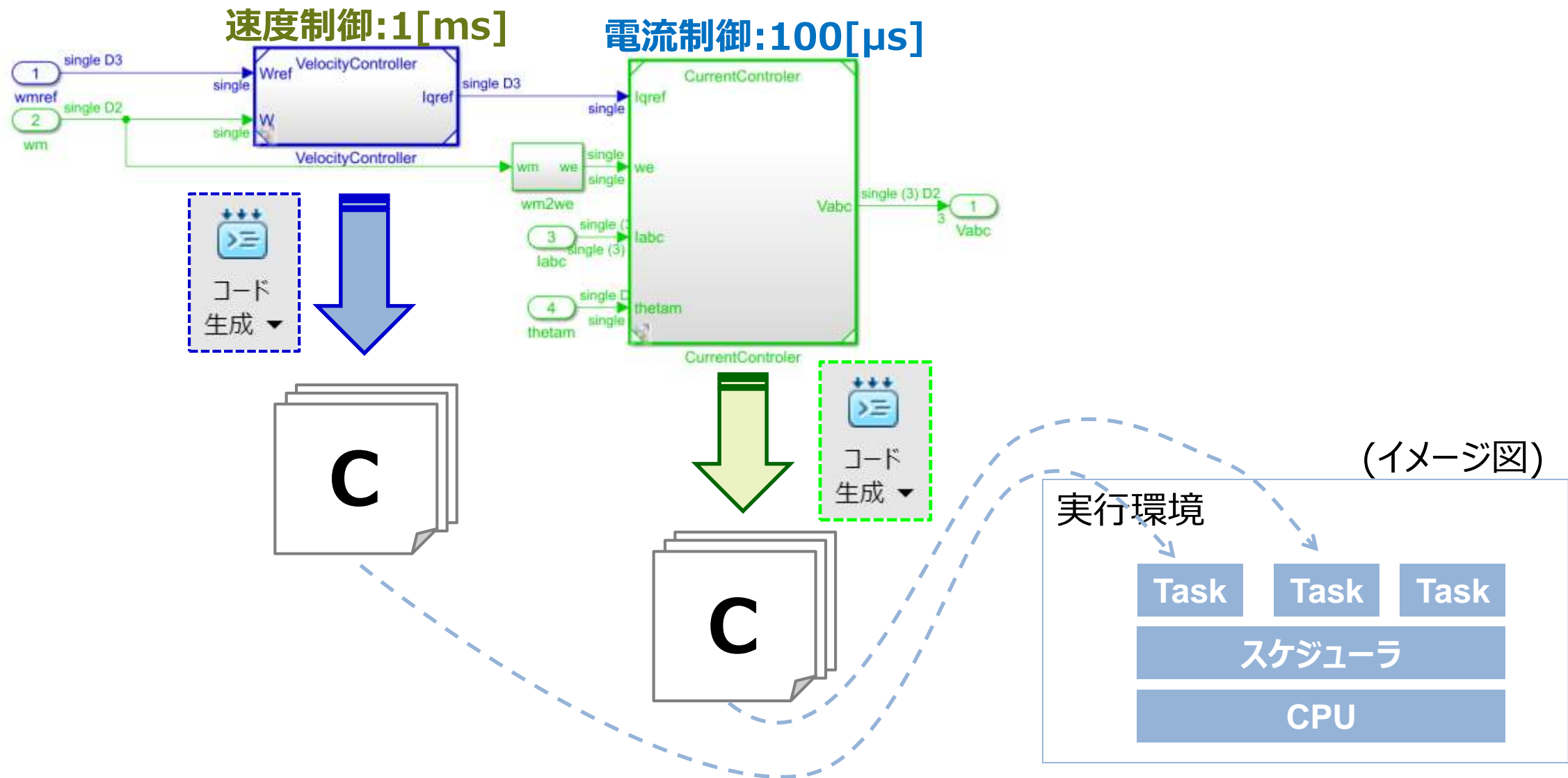


Const修飾子付きグローバル変数定義
extern const real32_T Ld;

```
Ld = Simulink.Parameter;
Ld.Value = 0.01;
Ld.DataType = dataType;
Ld.CoderInfo.StorageClass = 'Custom';
Ld.CoderInfo.CustomStorageClass = 'Const';
```

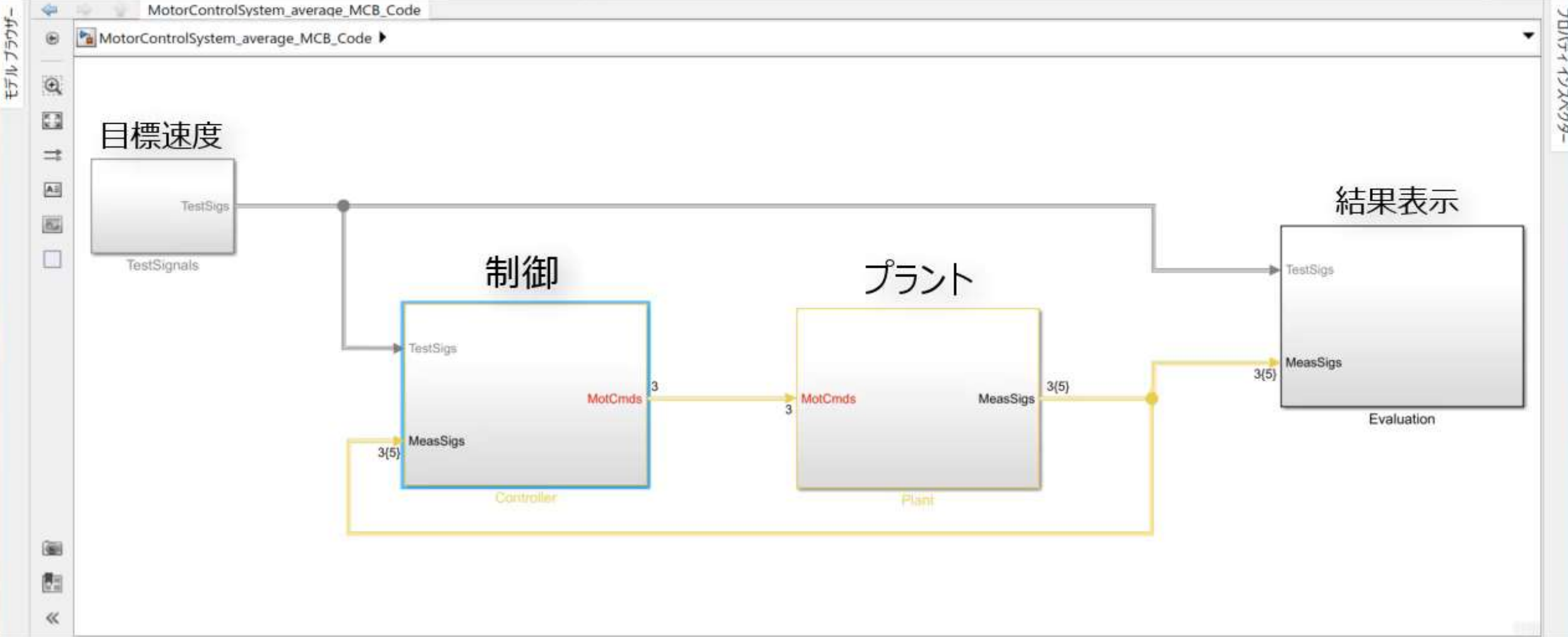


制御ロジックのマイコン実装



シミュレーション デバッグ モデル化 書式設定 アプリ SUBSYSTEM ブロック

新規 開く 保存 印刷 ライブラリ ブラウザー 信号のログ ビューアーの追加 信号テーブル 終了時間: 1 ノーマル ステップを戻す 実行 ステップを進める 停止 データインスペクター ロジックアナライザー



モデル生成コードを利用するには？

- 生成関数を適宜呼び出すことで対応
 - 入出力はグローバル変数 or 引数
 - それ以外のコードは基本手動（カスタマイズで自動化も可能）

ソフトウェア

```
Main()
```

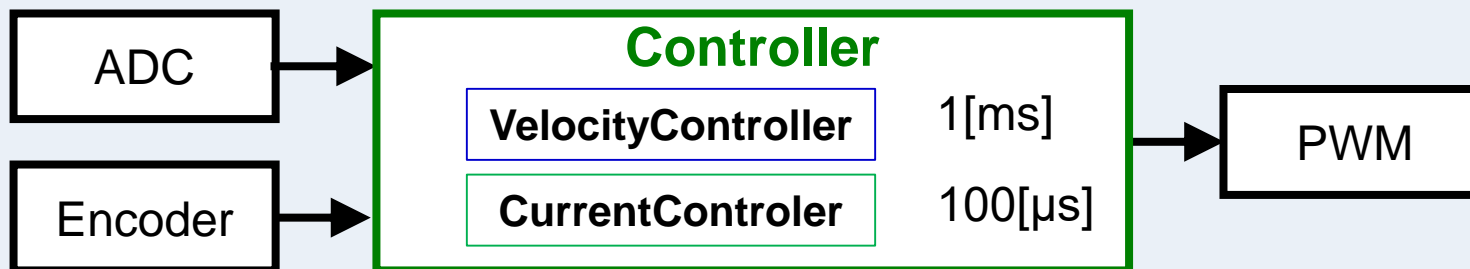
```
{
  ADC_Init();
  Encoder_Init();
  PWM_Init();
  VelocityController_initialize();
  CurrentController_initialize();
  while(1) {
```

```
InterruptServiceRoutine_10kHz()
```

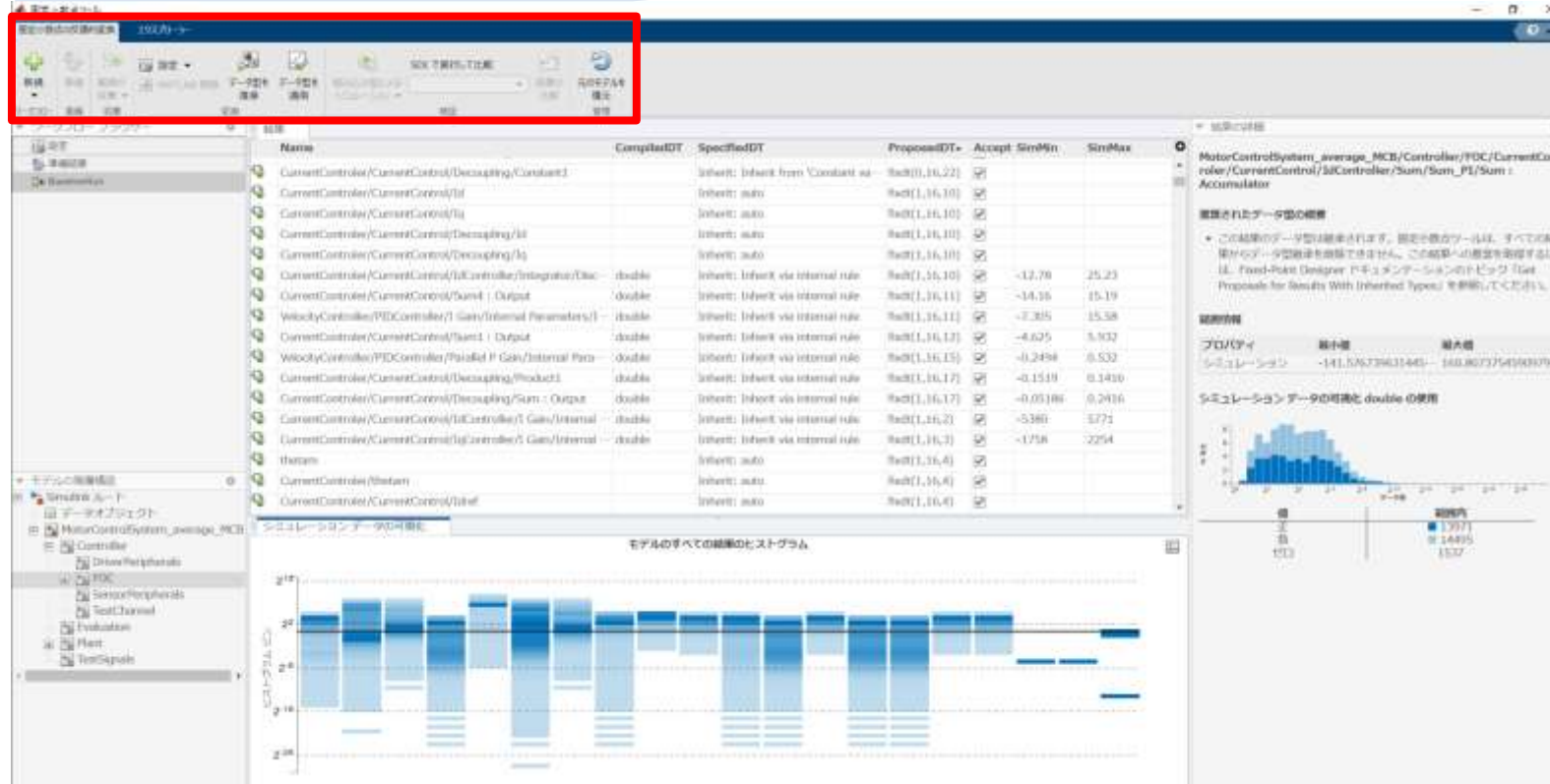
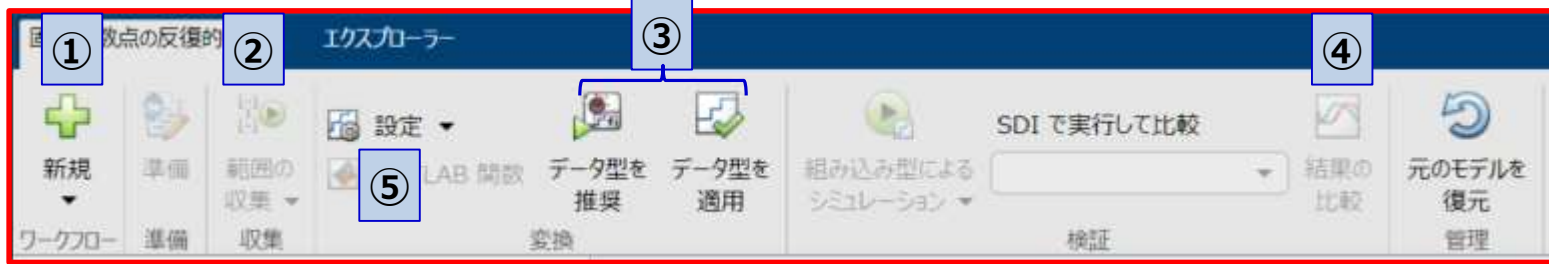
```
{
  ADC_Read();
  Encoder_Read();
  *****
  CurrentController_step();
  PWM_Write();
}
```

```
For (;;) {
  (詳細は割愛)
  /* 1ms処理 */
  VelocityController_step();
```

モデル



Tips : 固定小数点ツール シミュレーション結果によるオートスケーリング



自動データ型指定のワークフロー

① 変換するシステムの準備

② 範囲の収集

③ データ型の変換

④ 新しい設定の確認

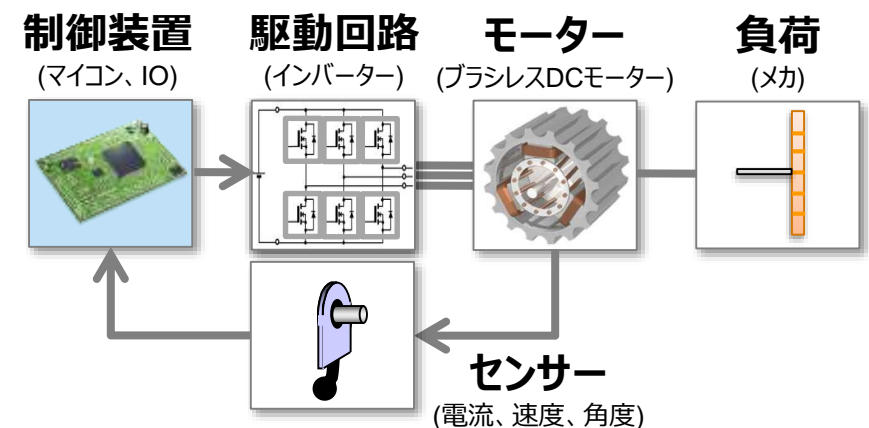
⑤ 別のデータ型の探索

まとめ

- 本セッションの説明内容の振り返り
 - ✓ ブラシレスDCモーターを効率良く回すベクトル制御を例題にMATLAB/Simulinkを使ったプラントモデリング、制御設計～実装までの基本フローを紹介
- MATLAB製品の強み
 - ✓ モーター制御システムのプラントモデリング、制御設計の基本フローを網羅して、効率的に作業が行える環境を提供



**モーター制御システムの開発で、
MATLAB製品を是非ご活用下さい。**





Accelerating the pace of engineering and science

© 2020 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.

パワエレ関連の推奨ツール構成 (プラントモデリング、制御設計のシミュレーション)

用途	機能	製品
基本環境 (モデリング/シミュレーション)	数値解析、グラフ、プログラミング、GUI	MATLAB
	ブロック線図モデリング	Simulink
	フローチャート・状態遷移図/表モデリング	Stateflow
プラントモデリング (電気、機械、熱流体)	複合物理領域の物理モデリング	Simscape
	パワエレ/電力システムのモデリング	Simscape Electrical
	動力伝達のモデリング (1Dのギア/クラッチなど)	Simscape Driveline
	機構のモデリング (3Dのロボットアームなど)	Simscape Multibody
	熱流体のモデリング (気体、液体)	Simscape Fluids
プラントモデルのシステム同定	プラントの実験データから数式モデルを推定	System Identification Toolbox
コントローラーの設計	PMSMのベクトル制御の設計・実装に特化したライブラリ	Motor Control Blockset™
	線形制御 (古典/現代制御) の関数ライブラリ	Control System Toolbox
	補償器設計の専用GUI	Simulink Control Design
プラントモデルのパラメーター同定、 コントローラーのパラメーター自動調整	最適化の関数ライブラリ	Optimization Toolbox
	パラメータ最適化の専用GUI	Simulink Design Optimization
固定小数点の設計	Simulinkモデルに固定小数点のデータ型を追加 固定小数点設計の専用GUI	Fixed-Point Designer
MCU実装用途の 組込みCコード生成	組込みCコード生成	Embedded Coder