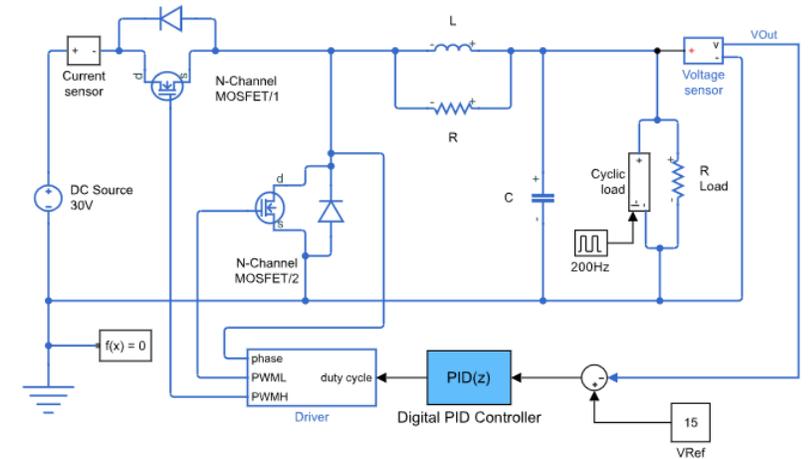


コンバーター制御のモデルベースデザイン ~ シミュレーション検討からマイコン実装まで ~

MathWorks Japan

アプリケーションエンジニアリング部 (制御)

福井 慶一



はじめに

対象者

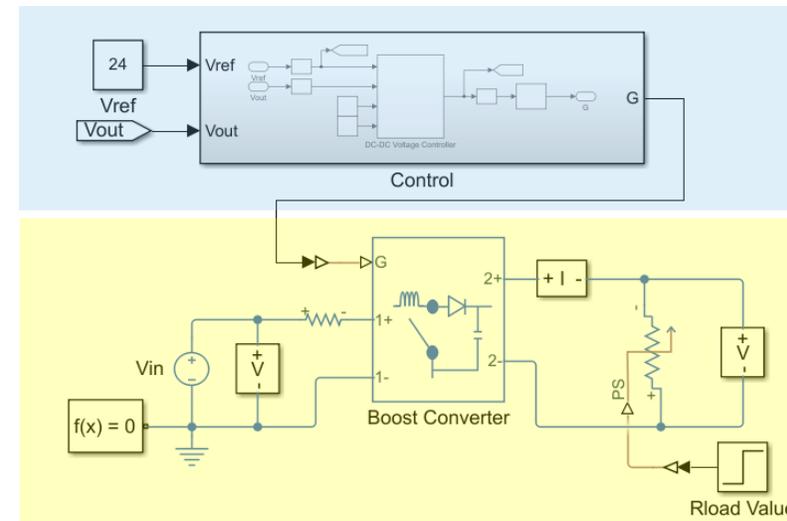
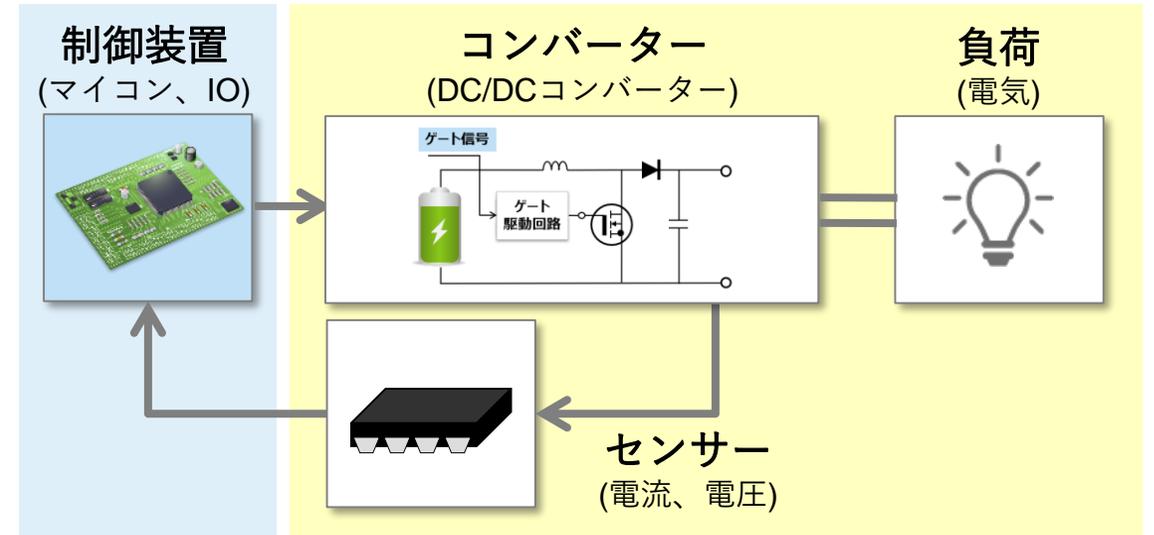
- **コンバーターの制御ロジックの開発者**
(例: 高性能・高効率を実現する制御ロジックの検討)
- **コンバーターを使ったシステムの開発者**
(例: 太陽光発電システムなどの機能・性能の検討)

お伝えしたいこと

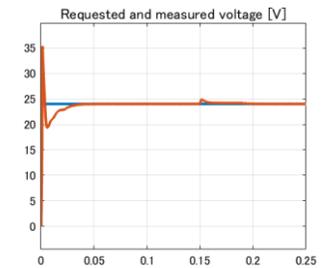
コンバーターのデジタル制御を例題に
MATLAB®/Simulink®を使った
 モデルベースデザインの基本フロー

コントローラー
 (制御、監視、保護、診断)

プラント
 (電気、熱)



コンバーターの
 出力電圧制御システムの
 機能・性能の確認



Data Acquisition

アジェンダ

- **コンバーター制御の概要**
 - 課題・トレンド
 - MATLAB/Simulinkソリューション

- **例題: 降圧コンバーターの出力行制御システム**
 - プラントモデリング
 - コントローラー設計
 - Cコード自動生成

- **まとめ**

コンバーター制御の課題・トレンド

高度な要求仕様を満たすデジタル制御システムの設計から実装までを効率よく行う必要がある

1

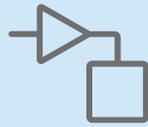
電気回路・熱設計



- 回路構成・パラメーター
- 電力損失に伴う発熱の冷却
- 故障時の対策 (断線・短絡)

2

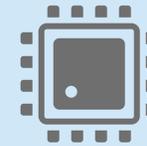
制御設計



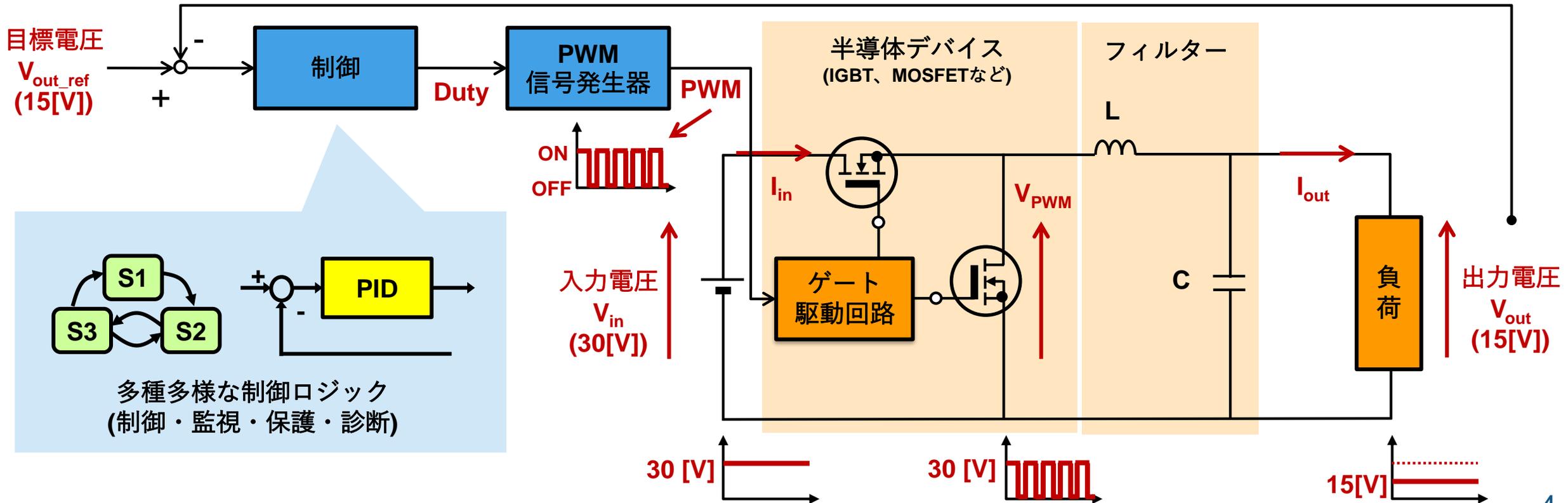
- 高効率・高性能な制御方法
- 制御パラメーターの調整
- 異常・故障時の制御方法

3

組込みコード設計



- 組込み用途に最適なコード
- コードレビューの省力化
- ターゲット環境への実装



コンバーター制御のMATLAB/Simulinkソリューション

デジタル制御システムのシミュレーションから組み込みコード自動生成までを同一環境で実施できる

1

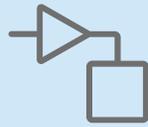
プラントモデリング機能



- 電気・熱系コンポーネント
- 回路図ベースのモデリング
- データシート情報を利用

2

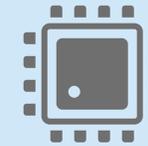
豊富な制御設計機能



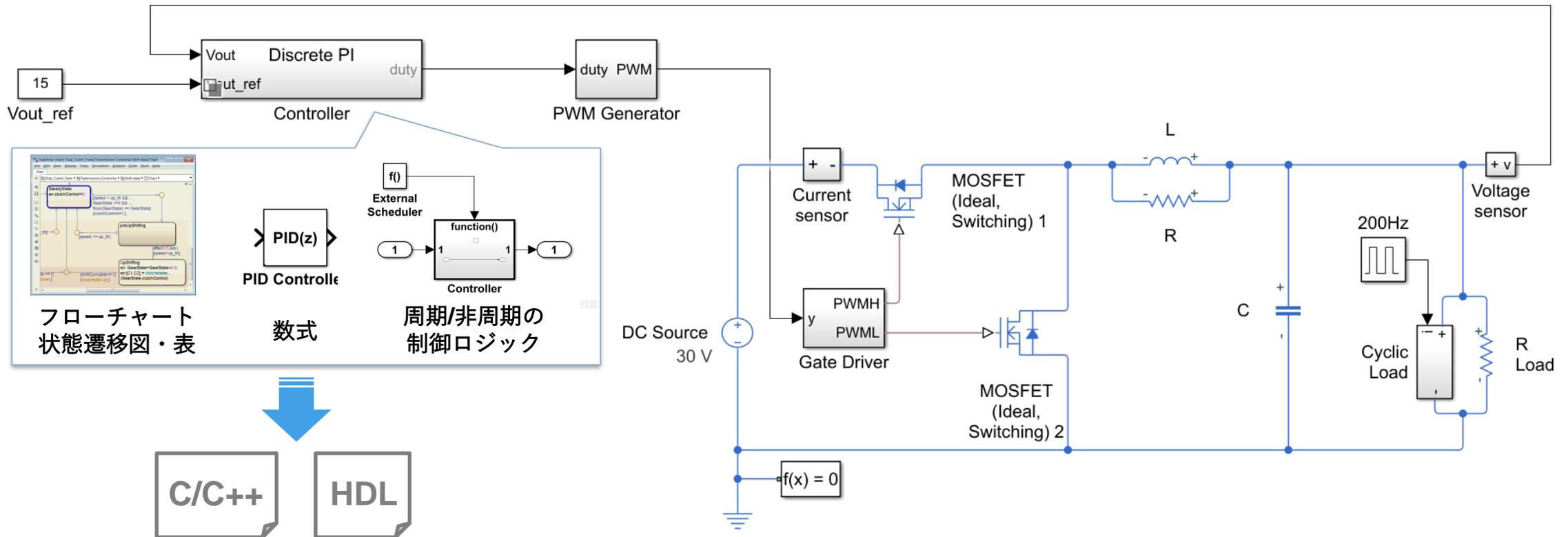
- 時間・周波数応答解析
- PID制御のゲイン調整
- 状態遷移のアニメーション

3

自動コード生成機能



- コード自動生成 (C / HDL)
- モデル・生成コード間リンク
- 生成コードを簡便に利用

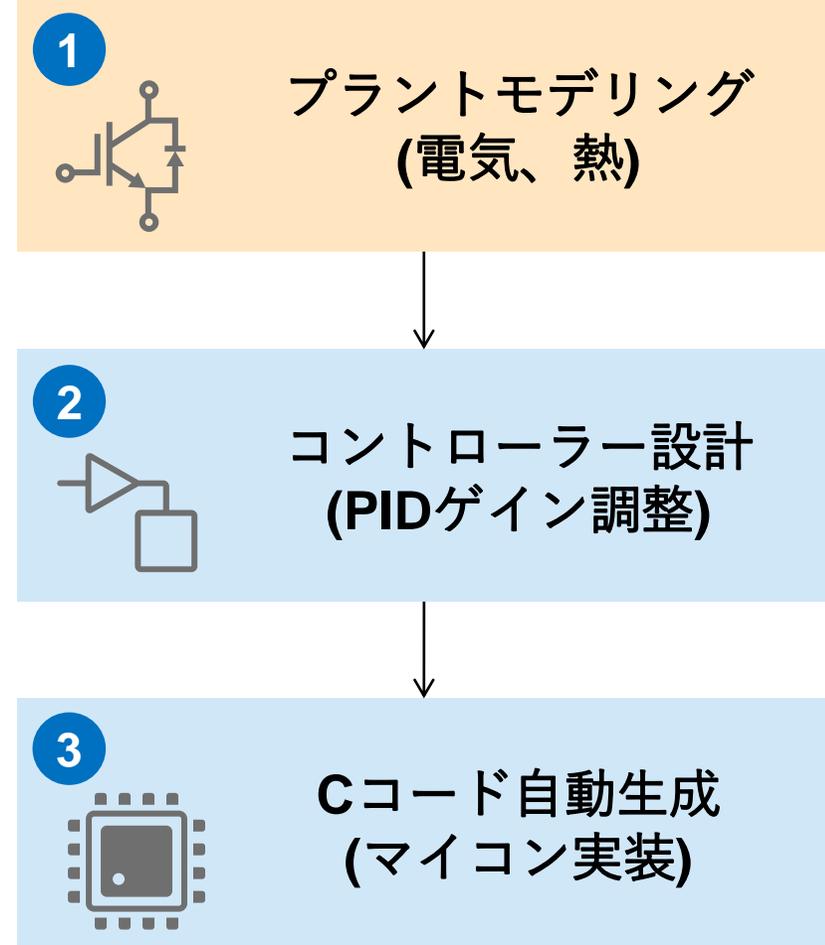
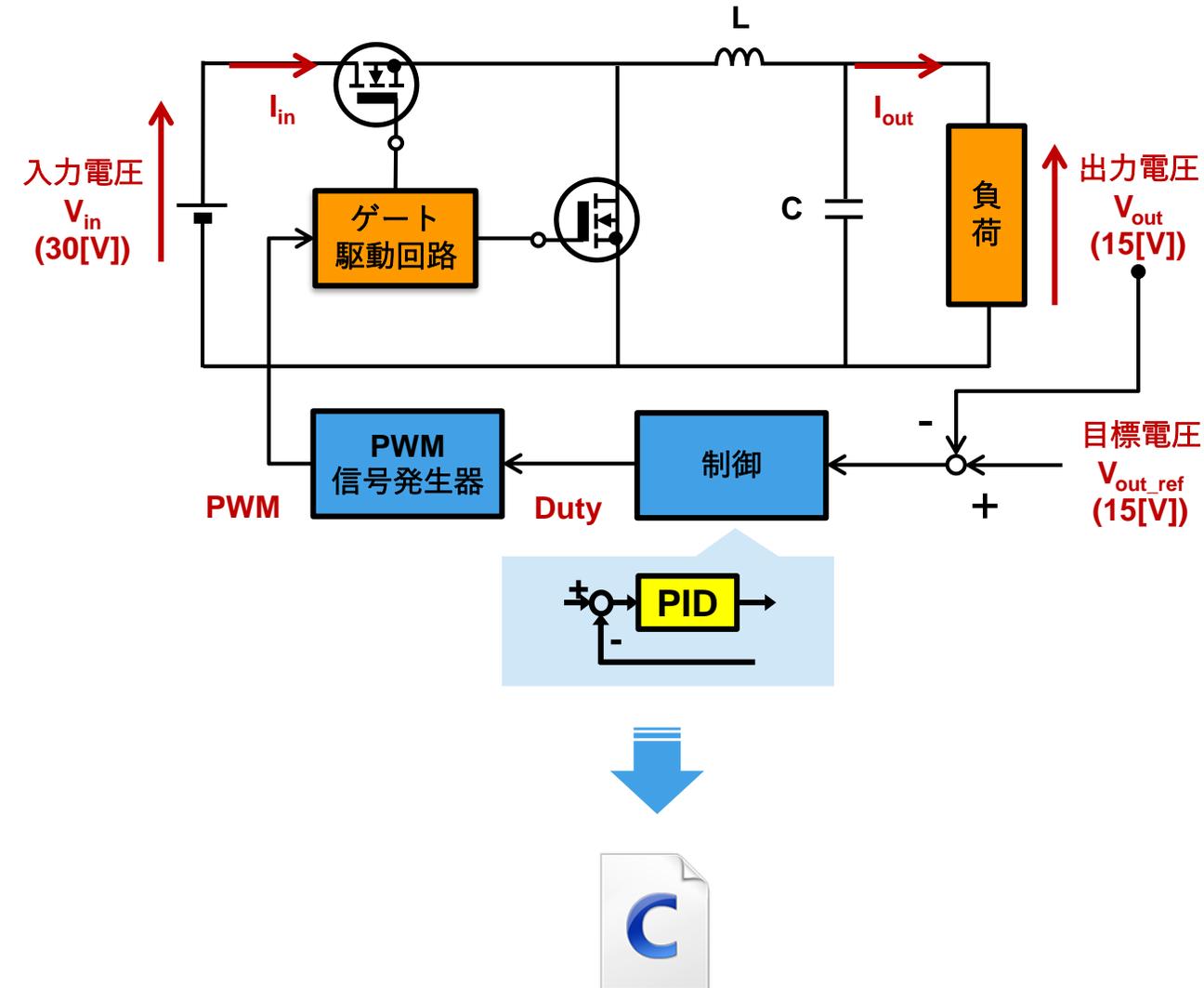


アジェンダ

- **コンバーター制御の概要**
 - 課題・トレンド
 - MATLAB/Simulinkソリューション
- **例題: 降圧コンバーターの出力行制御システム**
 - プラントモデリング
 - コントローラー設計
 - Cコード自動生成
- **まとめ**

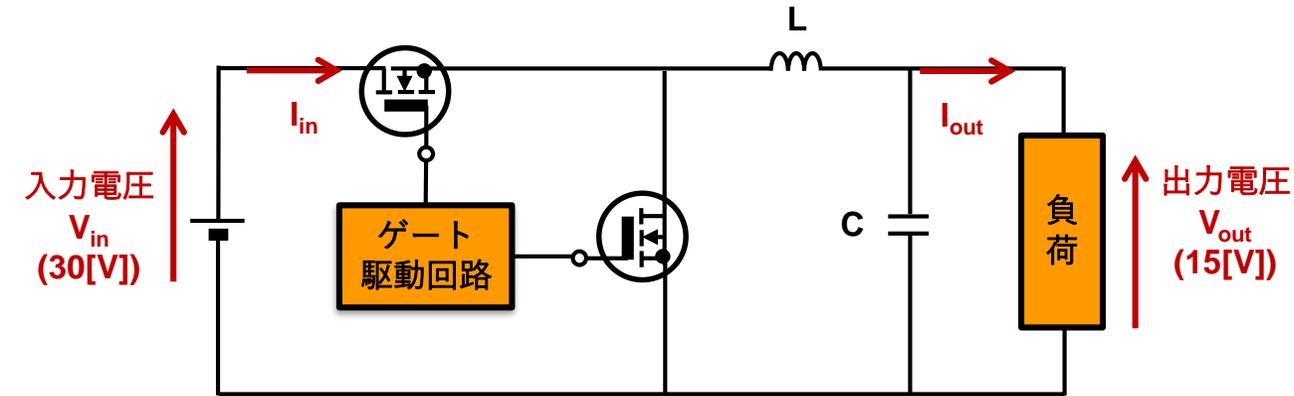
例題: 降圧コンバーターの出力電圧制御システム

外乱が発生しても出力電圧が一定となる制御ロジックを設計して組み込みCコードを自動生成する

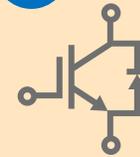


例題: 降圧コンバーターの実出力電圧制御システム

外乱が発生しても出力電圧が一定となる制御ロジックを設計して組み込みCコードを自動生成する

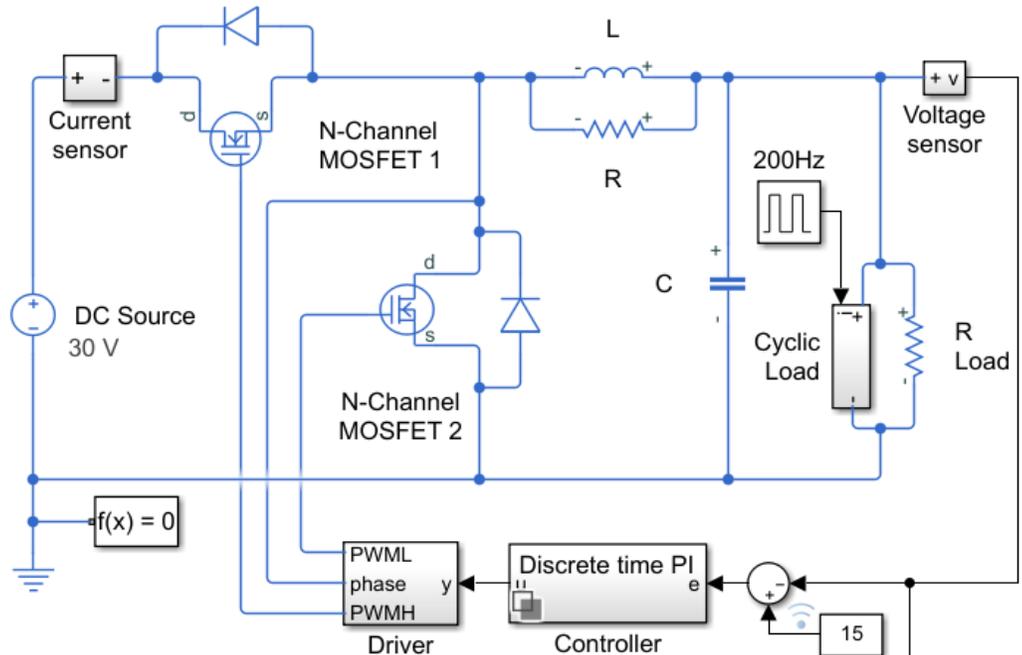


1



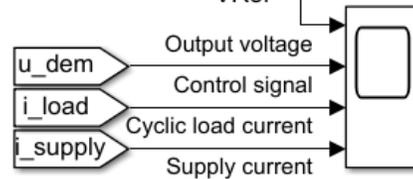
プラントモデリング
(電気、熱)

降圧コンバーターの実出力電圧制御システムのモデル、解析結果

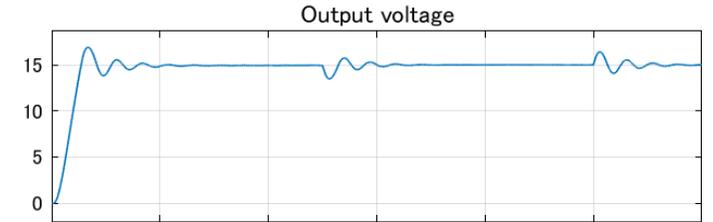


Buck Converter

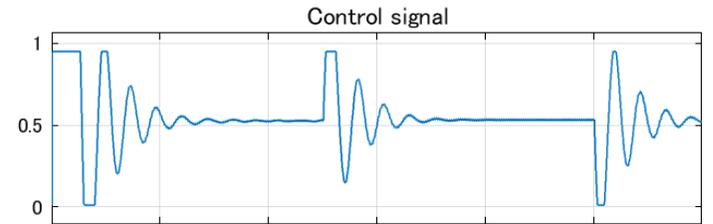
1. [Plot voltages](#) of converter ([see code](#))
2. [Plot voltages](#) at a switching event ([see code](#))
3. Set controller: [Continuous](#), [Discrete](#)
4. [Compare](#) controller behavior ([see code](#))
5. [Explore simulation results](#) using [sscxplore](#)
6. Open related models:
[switching and heat flow](#); [thermal only](#); [faults](#)
7. [Learn more](#) about this example



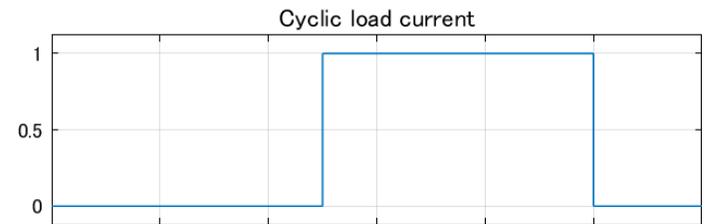
出力電圧
 V_{out} [V]



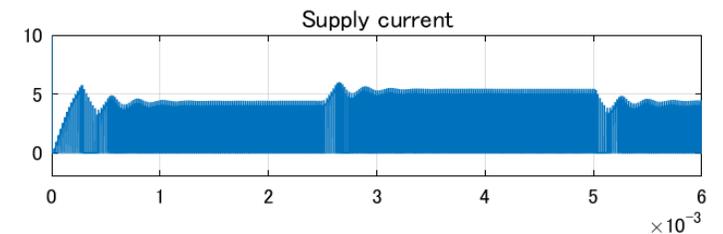
デューティ比
Duty



外乱電流
 I_{cyclic_load} [A]



電源電流
 I_{DC} [A]

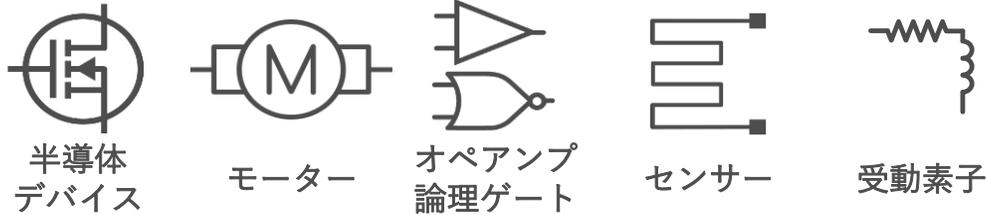


「降圧コンバーターの実出力電圧制御システム」に関連するサンプルモデル

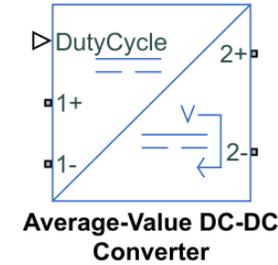
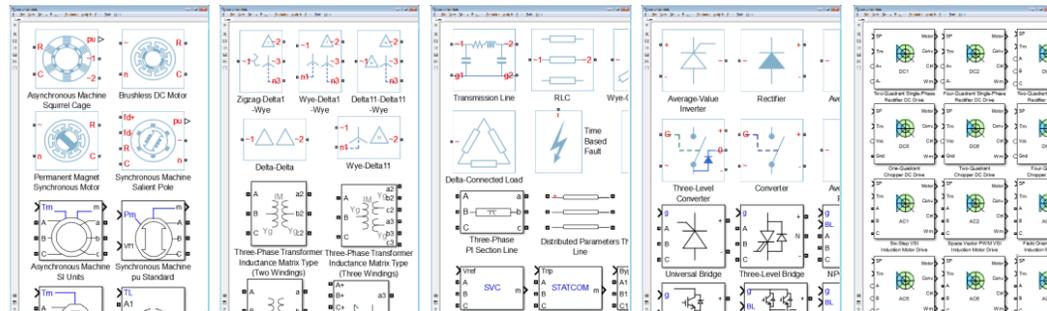
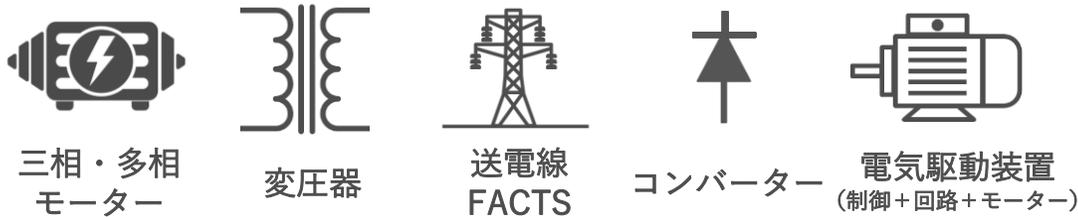
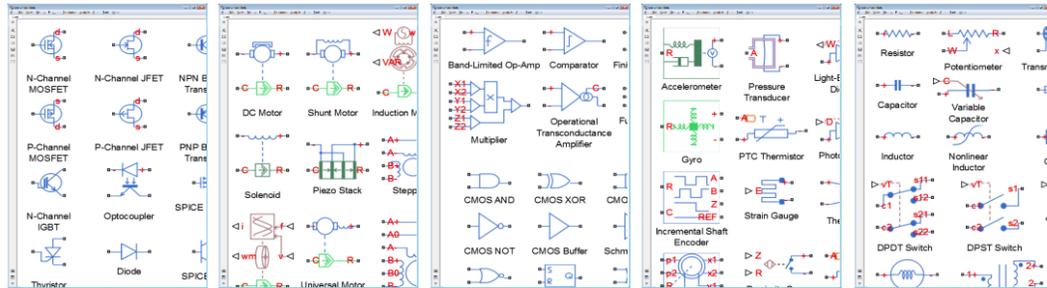
①半導体デバイス+熱回路、②熱回路のみ、③RLCの故障 (短絡・断線)

1 電気・熱コンポーネント

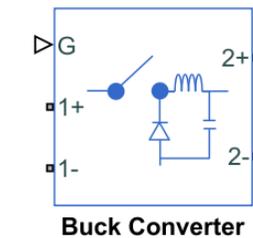
解析用途に応じた詳細度の物理コンポーネントを選択して、電気・熱の回路図モデルを構築する



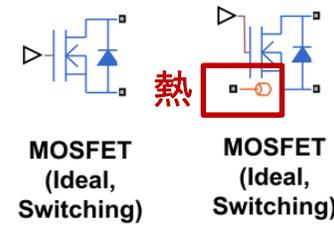
詳細度 計算速
低 速



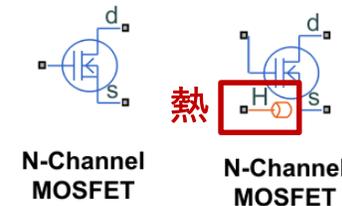
パラメータ	
制御入力:	デューティ比
コンバータのタイプ:	降圧コンバータ
コンバータの効率:	定数
効率 (%):	100



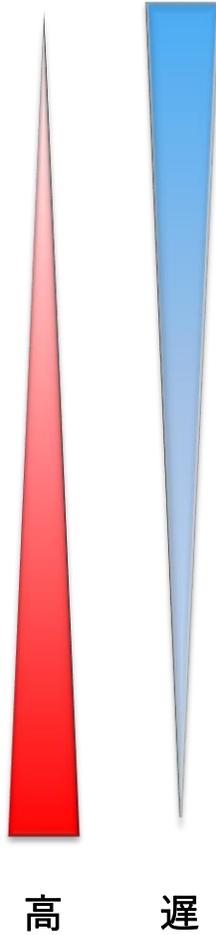
スイッチングデバイス	ダイオード	LC フィルタ	スナバ
スイッチングデバイス:	MOSFET		
ドレイン-ソースのオン抵抗:	0.001	Ohm	
オフ状態のコンダクタンス:	1e-5	1/Ohm	
しきい値電圧:	6	V	



メイン	集積ダイオード	熱モデル
ドレイン-ソースのオン抵抗, R_DS(on):	0.01	Ohm
オフ状態のコンダクタンス:	1e-6	1/Ohm
しきい値電圧, Vth:	2	V



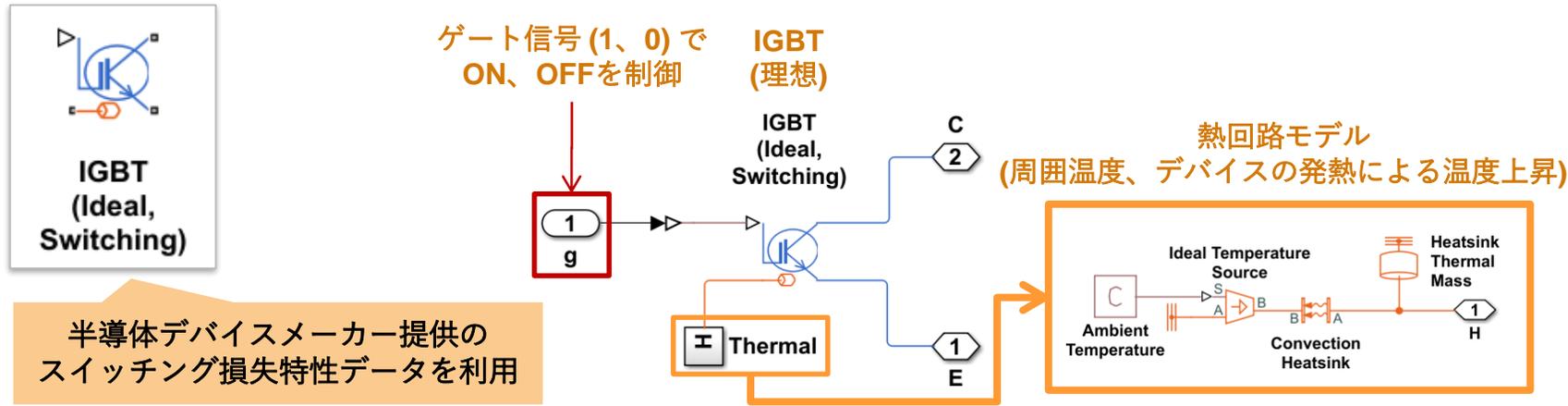
メイン	オーム抵抗	接合容量	ポティダイオード	温度依存性
パラメータ化:	3つの端子			
端子:	データシートから指定			
ドレイン-ソースのオン抵抗, R_DS(on):	0.025		Ohm	
R_DS(on) に対するドレイン電流, Ids:	6.0		A	
R_DS(on) に対するゲート-ソース電圧, Vgs:	10		V	
ゲート-ソースしきい値電圧, Vth:	1.7		V	



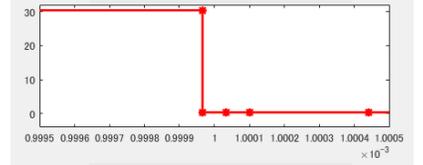
2 半導体デバイスの電力損失・熱

半導体デバイスのスイッチング損失に伴う温度上昇、冷却用ヒートシンクの熱抵抗を計算する

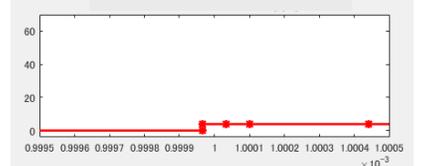
半導体デバイスの簡易モデル (理想スイッチに近いモデルでスイッチング動作を速く解析)



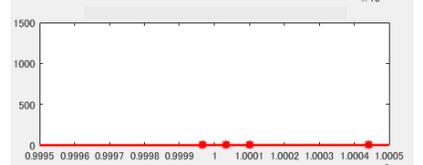
電圧
V [V]



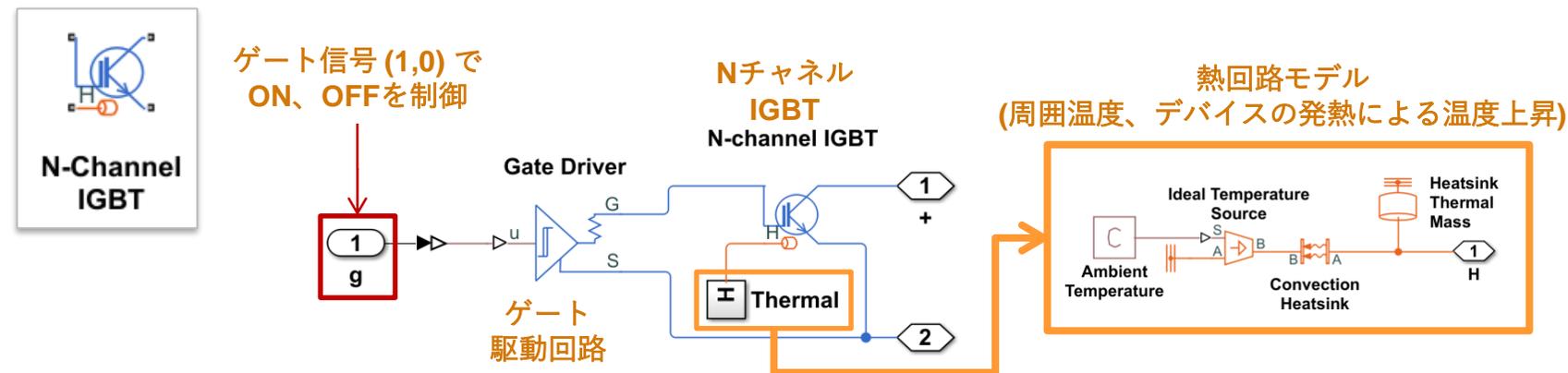
電流
I [A]



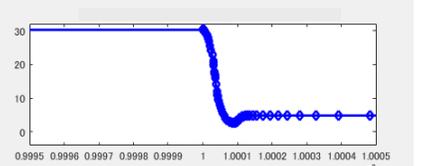
電力
P [W]



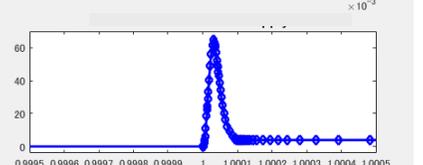
半導体デバイスの詳細モデル (実デバイスに近いモデルでスイッチングの過渡応答を詳細に解析)



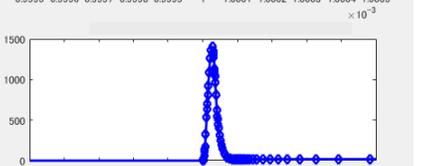
電圧
V [V]



電流
I [A]

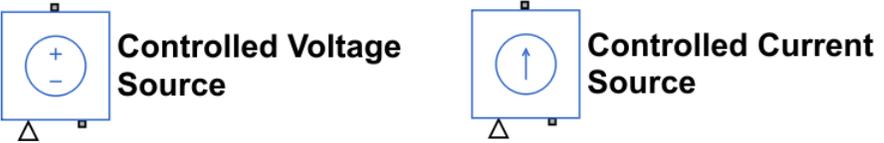
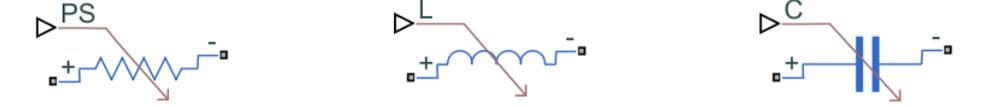
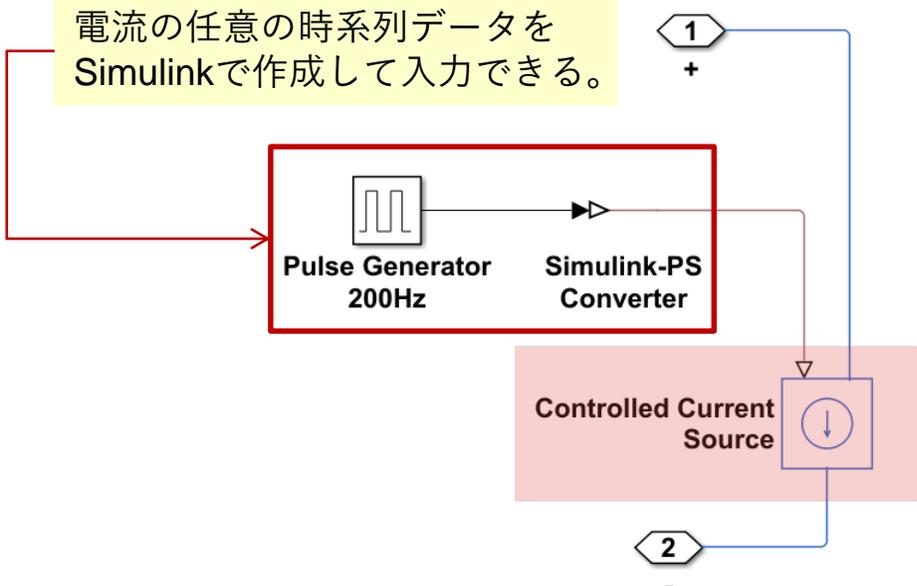
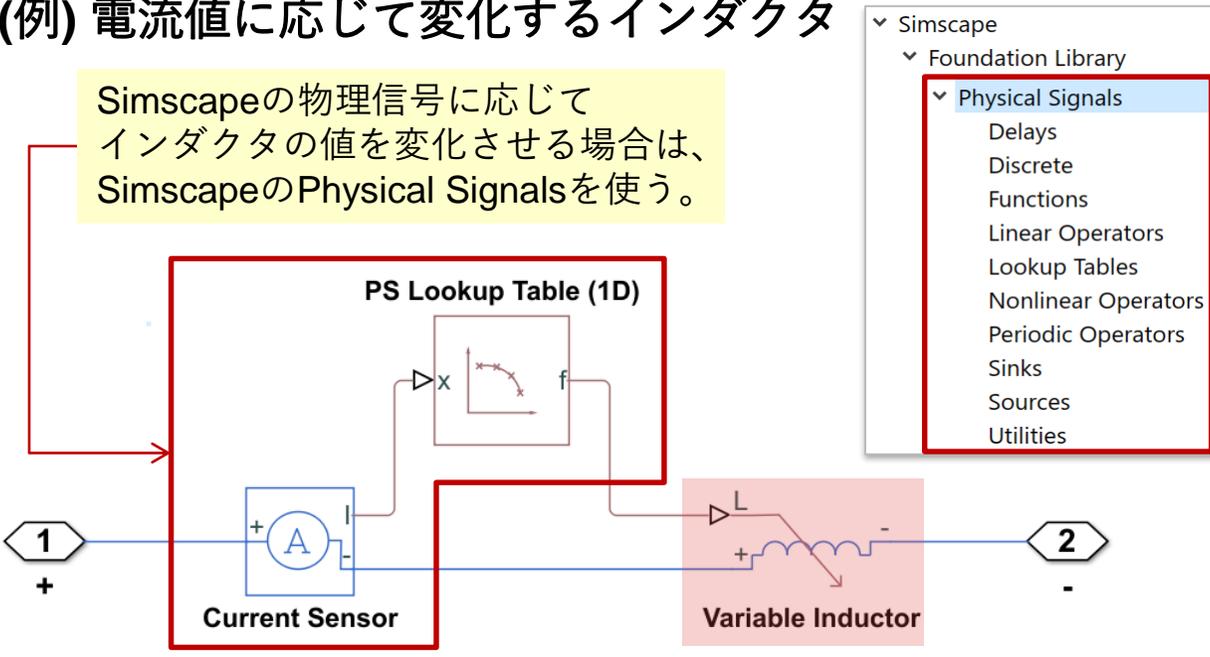


電力
P [W]



3 電圧・電流の外乱、パラメーター可変の電気コンポーネント

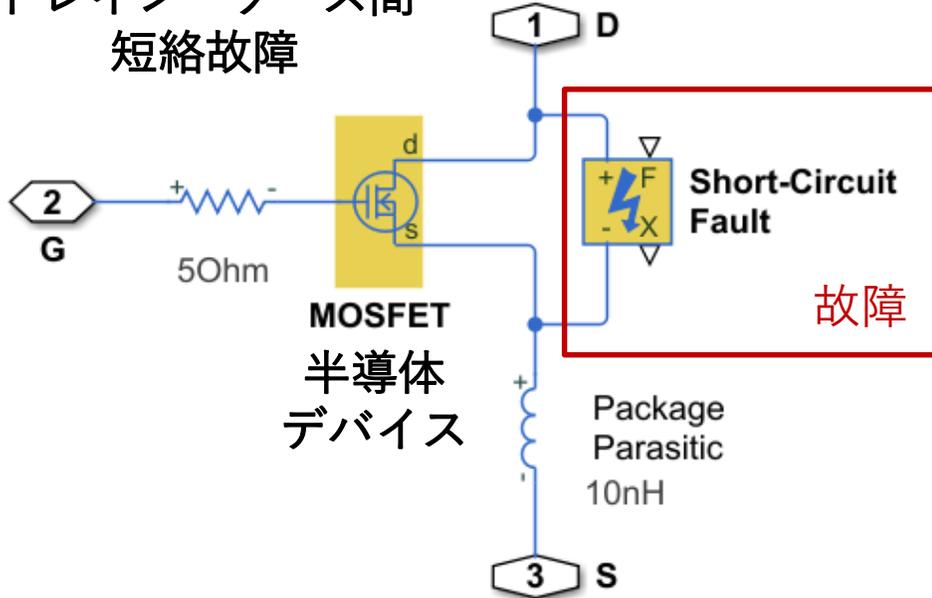
制御性能の確認のために外乱を入れたり、パラメーター可変の要素を使って精度の高い解析をする

電圧・電流の外乱	パラメーター可変の電気コンポーネント
 <p>Controlled Voltage Source Controlled Current Source</p>	 <p>Variable Resistor Variable Inductor Variable Capacitor</p>
<p>(例) 負荷電流の周期変動</p> <p>電流の任意の時系列データを Simulink で作成して入力できる。</p> 	<p>(例) 電流値に応じて変化するインダクタ</p> <p>Simscape の物理信号に応じてインダクタの値を変化させる場合は、Simscape の Physical Signals を使う。</p>  <ul style="list-style-type: none"> ▼ Simscape <ul style="list-style-type: none"> ▼ Foundation Library <ul style="list-style-type: none"> ▼ Physical Signals <ul style="list-style-type: none"> Delays Discrete Functions Linear Operators Lookup Tables Nonlinear Operators Periodic Operators Sinks Sources Utilities

4 回路故障 (断線・短絡)

回路接続・コンポーネントの故障を、指定した時間、許容範囲の超過、外部トリガーで発生させる

ドレイン・ソース間
短絡故障



メイン	時間トリガー	動作トリガー	外部トリガー
無故障時の抵抗:	inf	Ohm	
故障時の抵抗:	1	Ohm	
故障発生時に報告:	なし		

メイン	時間トリガー	動作トリガー	外部トリガー
動作による故障トリガーを有効にする:	はい		
許容電圧範囲:	[-20.0, 20.0]	V	
電圧範囲を超えたときの故障までの時間:	10	ns	
許容電流範囲:	[-inf, inf]	A	
電流範囲を超えたときの故障までの時間:	1	s	

メイン	時間トリガー	動作トリガー	外部トリガー
時間的な故障トリガーを有効にする:	はい		
故障イベントのシミュレーション時間:	2e-4	s	
故障期間:	inf	s	

メイン	時間トリガー	動作トリガー	外部トリガー
外部の故障トリガーを有効にする:	はい		
外部の故障トリガー:	F >= (故障のしきい値) の場合に故障		
故障しきい値:	0.5		
故障トリガーが元に戻った時点で故障がリセットされます:	いいえ		

コンポーネント故障



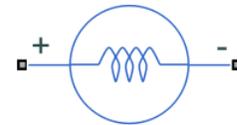
Resistor



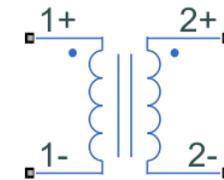
Inductor



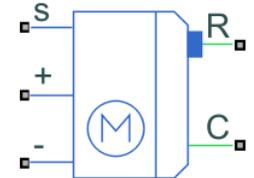
Capacitor



Incandescent Lamp



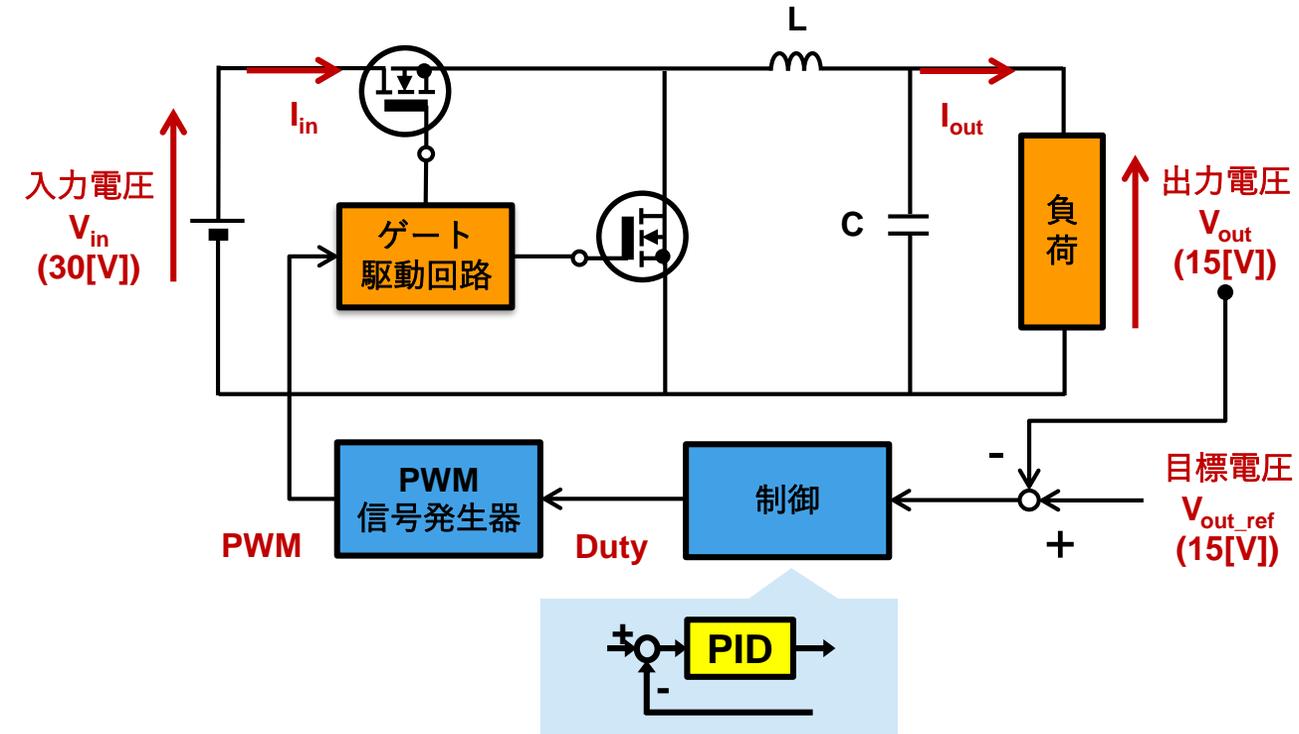
Mutual Inductor



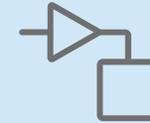
RC Servo

例題: 降圧コンバーターの出力電圧制御システム

外乱が発生しても出力電圧が一定となる制御ロジックを設計してマイコンに実装する



2

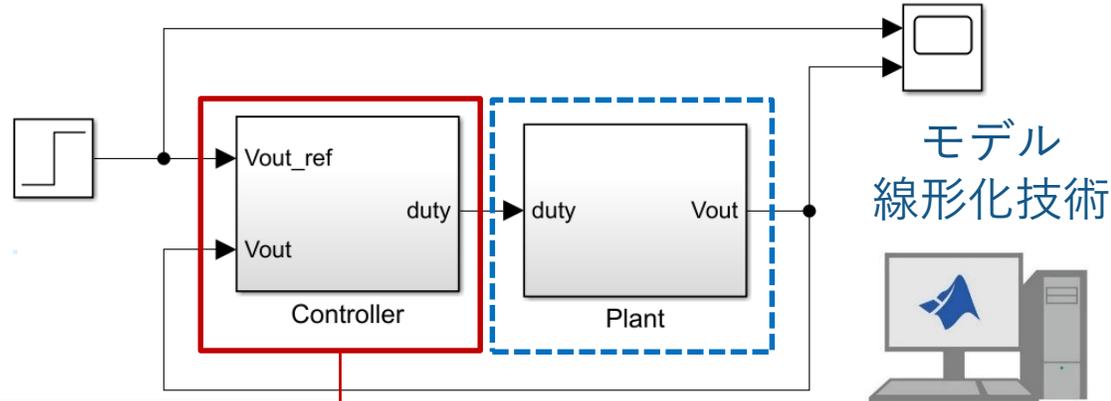


コントローラ設計
(PIDゲイン調整)

1 線形制御理論に基づくPID制御器のゲイン調整

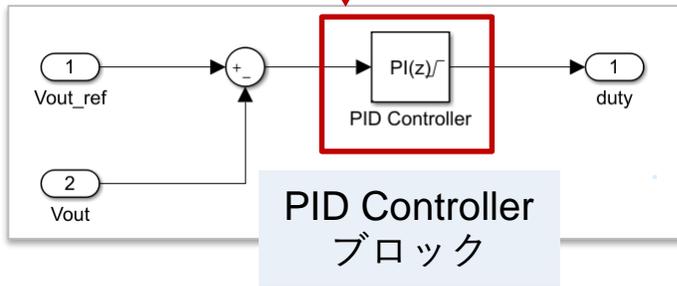
時間/周波数応答・制御性能指標を見ながら、対話的にPIDゲインを調整する

電圧制御の
PIDゲイン調整



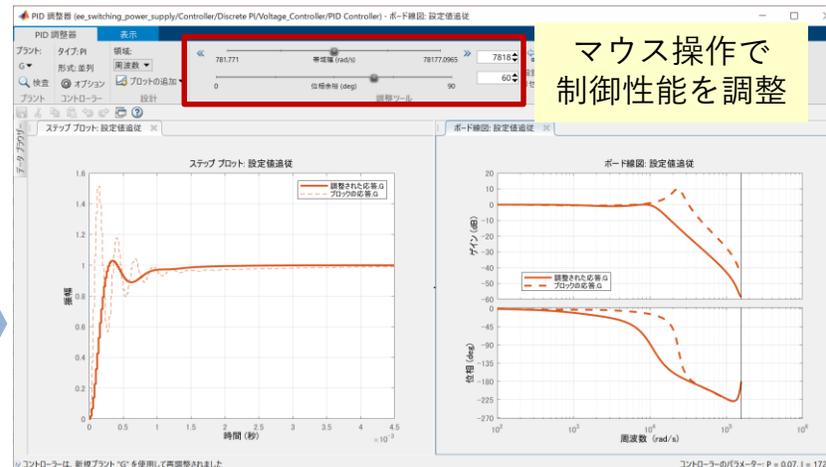
1. 時間/周波数応答	
開ループ	制御対象 一巡伝達関数
閉ループ	目標値追従 制御器出力 外乱抑制

2. 制御性能指標	
立上り時間	
整定時間	
オーバーシュート	
安定余裕、など	



PID調整器

(応答波形・性能指標を見ながら対話的にゲイン調整)



調整後パラメーター値

メイン 初期化 出力の飽和 データ型 状態属性

コントローラーのパラメーター

ソース: 内部

比例項 (P): Kp

積分項 (I): Ki

自動調整

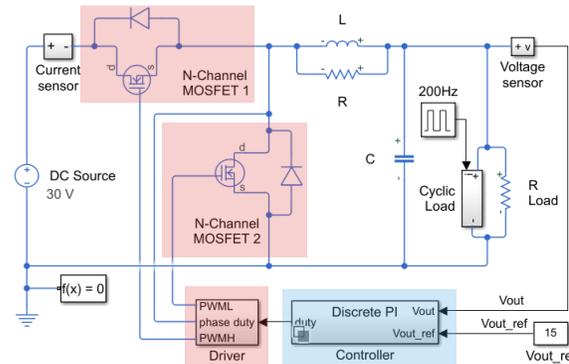
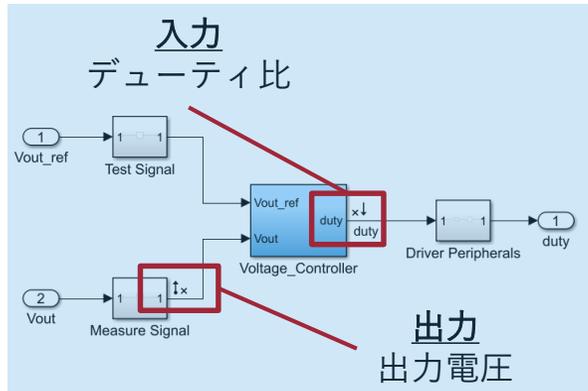
調整法の選択: 伝達関数ベース (PID 調整器アプリ) 調整...

コントローラーのパラメーター		
	調整	ブロック
P	0.070002	0.4
I	172.4756	200
D	n/a	n/a
N	n/a	n/a

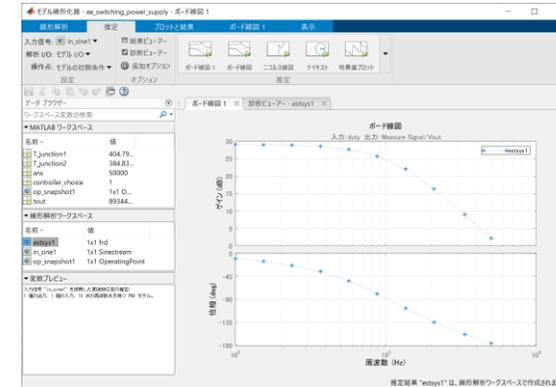
2 線形化できないプラントモデルのシステム同定

パワエレシステムは、PWM制御などの線形化できない要素を含むため、システム同定をする

1 降圧コンバーターモデルの入力、出力を指定する



3 時間応答の解析結果よりボード線図を求める



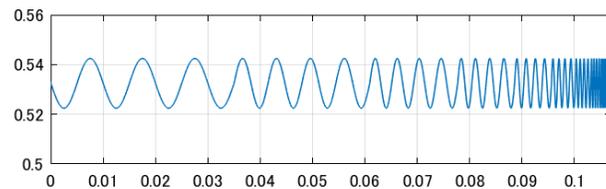
周波数応答データ
estsys (frdオブジェクト)

周波数 (rad/s):	Measure Signal/Vout
6.283e+02	27.9500 - 4.7472i
9.696e+02	27.2122 - 7.2211i
1.496e+03	25.5224 - 10.7730i
2.310e+03	21.7673 - 15.3107i
3.570e+03	14.4044 - 19.4474i

2 入力に微小なSinestream信号を重畳する

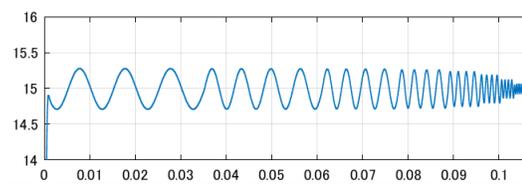
デューティ比の動作点に微小なSinestream信号を重畳する

入力
デューティ比

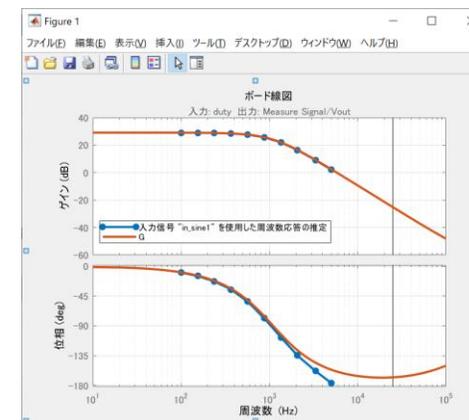


シミュレーションを実施して出力電圧の時間応答を求める

出力
出力電圧



4 降圧コンバーターモデルの伝達関数を推定する



システム同定により、分母が2次の伝達関数を推定

$$G = \text{tfest}(\text{estsys}, 2)$$

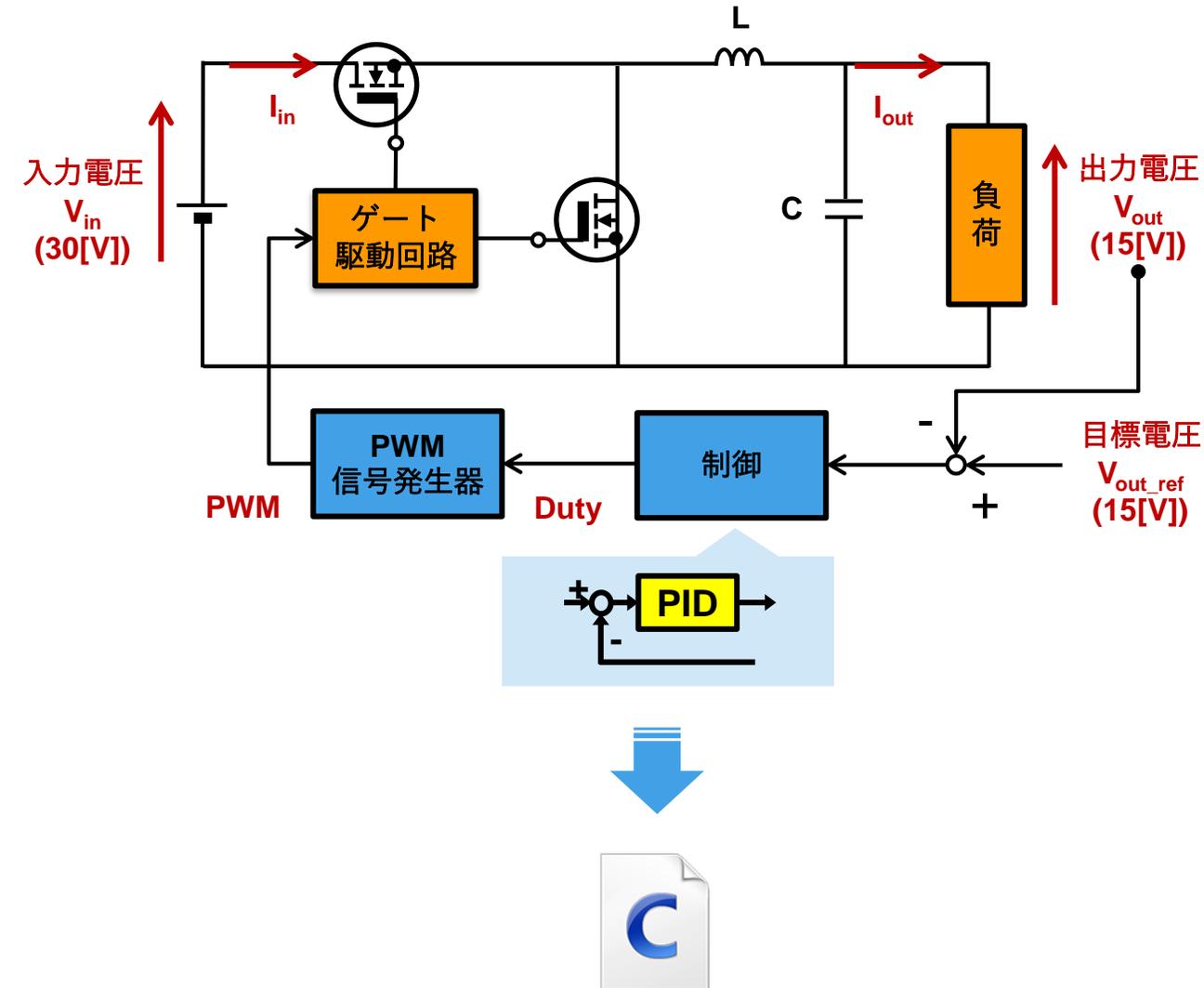
$$1185 s + 1.354e09$$

$$s^2 + 1.229e04 s + 4.754e07$$

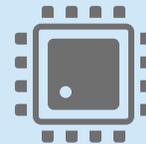
$$\text{bode}(\text{estsys}, G)$$

例題: 降圧コンバーターの出力電圧制御システム

外乱が発生しても出力電圧が一定となる制御ロジックを設計してマイコンに実装する



3



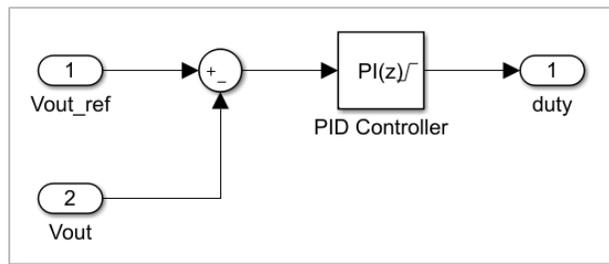
Cコード自動生成
(マイコン実装)

Cコード生成に反映される情報

1

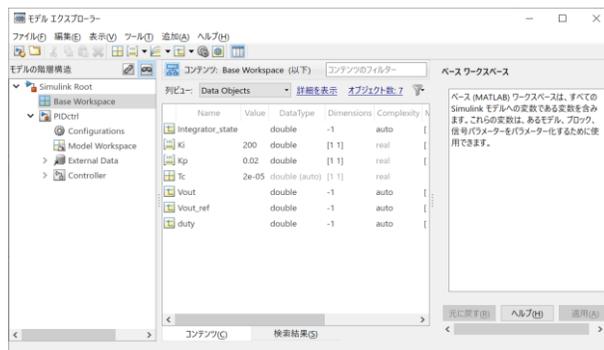
モデル

ロジック、アルゴリズム
データ型情報



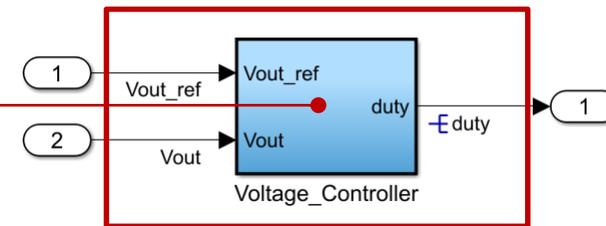
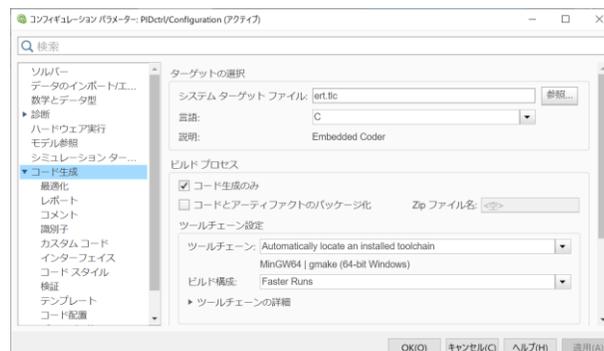
2

データオブジェクト/
データディクショナリ
変数・定数情報



3

コンフィギュレーション
コード最適化
関数インターフェース
生成コード書式
カスタムデータ型



C/C++ コード(C) ▾

このサブシステムをビルド(B)

コード生成の対象となる
サブシステムを右クリックして、
モデルからコードを自動生成

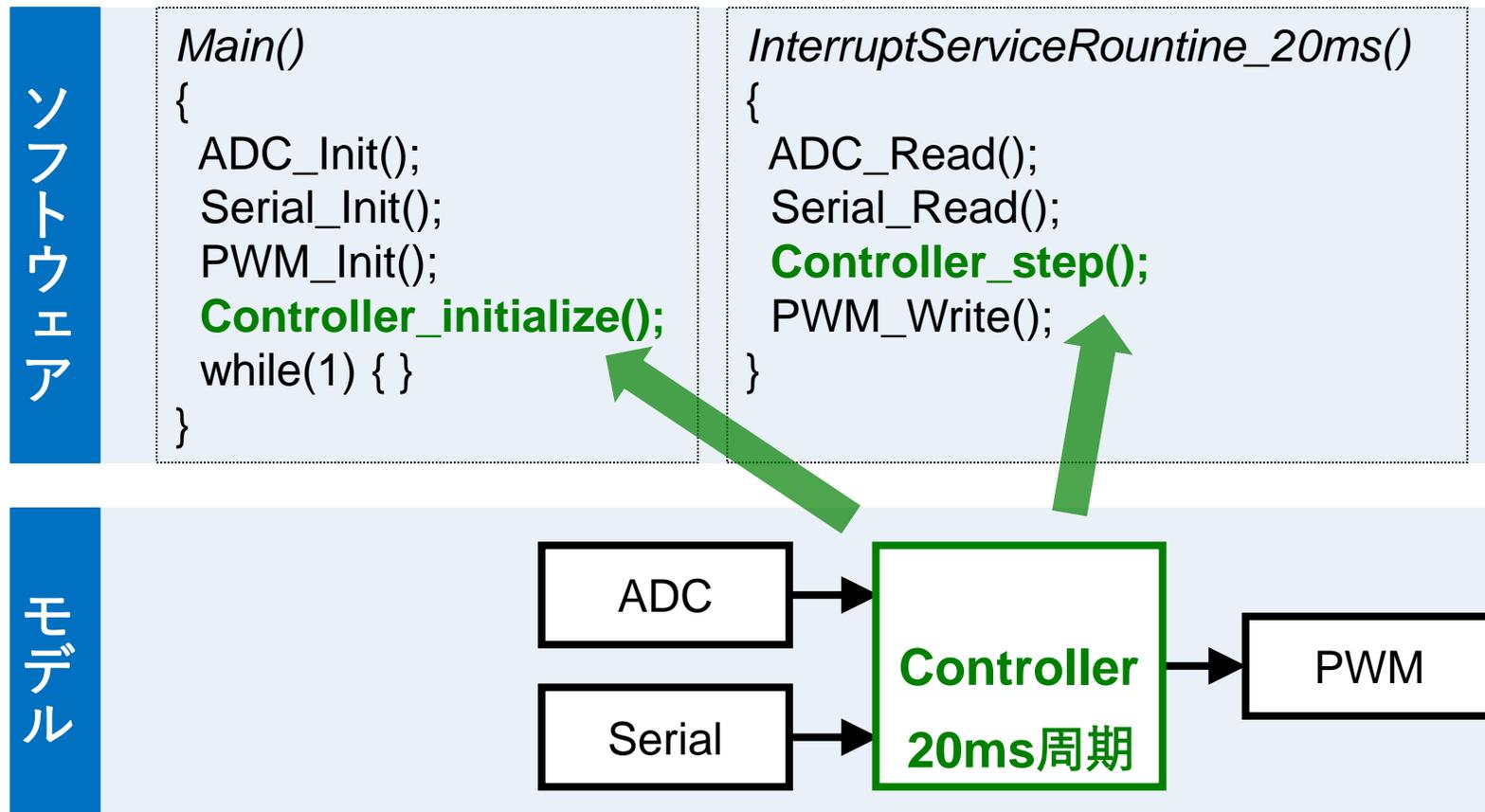
モデル生成コード



Voltage_Controller.c
Voltage_Controller.h

モデル生成コードの利用イメージ

- データ受け渡しはグローバル変数 or 引数
- 割り込み/ポーリング処理でモデル実行関数を呼び出し



モデル生成コードの利用方法

	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
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またはベンダーから提供)

アジェンダ

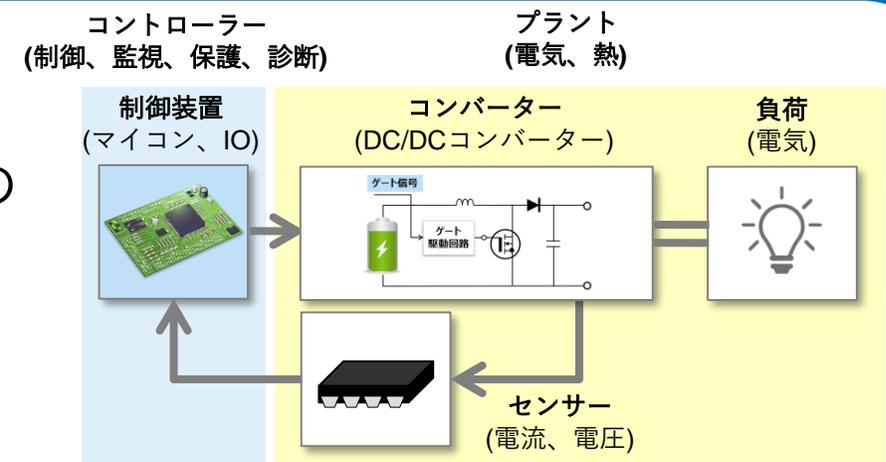
- **コンバーター制御の概要**
 - 課題・トレンド
 - MATLAB/Simulinkソリューション
 - **例題: 降圧コンバーター出力電圧制御システム**
 - プラントモデリング
 - コントローラー設計
 - Cコード自動生成
- **まとめ**

まとめ

- **本Webセミナーの説明内容の振り返り**
 - ✓ コンバーターのデジタル制御を例題に、MATLAB/Simulinkを使ったモデルベースデザインの基本フローを紹介。
- **MATLAB/Simulinkの強み**
 - ✓ システムの設計から実装までを効率よく行うためのプラントモデリング、制御設計、組込みコード自動生成の機能や、各種サンプルモデルを提供。



コンバーターのデジタル制御システムの開発を効率よく行うために、MATLAB/Simulinkを是非ご活用下さい。



コンバーター制御の推奨ツール構成 (プラントモデリング、制御設計、マイコン実装)

□ Webセミナーの例題でを使用した製品: 青色 □ 推奨製品: 黒色

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、熱、熱流体)	複合物理領域の物理モデリング	Simscape™
	パワエレ/電力系統/アナログ・デジタル・センサ回路のモデリング	Simscape Electrical™
	熱流体モデリング (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	線形制御(古典/現代)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チューニング	最適化の関数ライブラリ	Optimization Toolbox™
	パラメーター最適化の専用GUI	Simulink Design Optimization™
パラメータを変えた繰り返し計算の並列処理	PCの複数コアを使ったパラメータスイープの並列処理	Parallel Computing Toolbox™
RCP/HIL用途のCコード生成	MATLABプログラムからRCP/HIL用途のCコード生成	MATLAB Coder™
	SimulinkモデルからRCP/HIL用途のCコード生成	Simulink Coder™
RCP/HIL用途のリアルタイムテスト環境	Speedgoat社のハードウェアを使ったRCP/HIL用途のテスト環境を構築	Simulink Real-Time™
マイコン/FPGA実装用途の固定小数点の設計	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™
マイコン実装用途のCコード生成	Simulinkモデルからマイコン実装用途のCコード生成	Embedded Coder®
FPGA実装用途のHDLコード生成	SimulinkモデルからFPGA実装用途のHDLコード生成	HDL Coder™

コンバーター制御関連の参考情報

- ソリューションページ
 - <https://jp.mathworks.com/solutions/power-electronics-control.html>
- ホワイトペーパー
 - [Simulink で DC-DC コンバーターのデジタル制御設計を高速化](#)
- ショートムービー
 - [Developing DC-DC Converter Control with Simulink](#)
 - [Developing Solar Inverter Control with Simulink](#)
 - [PID Controller Tuning for a Model with Discontinuities](#)
 - [PID Controller Tuning for a Buck Converter](#)
 - [Active Power Factor Correction](#)
 - [EE Journal Chalk Talk: Simulation-Based Tuning of Power Electronics Controllers](#)



コンバーター制御関連の参考情報

■ サンプルモデル

– 降圧コンバーター関連

- [降圧コンバーター](#)
- [熱力学を伴う降圧コンバーター、降圧コンバーターの熱モデル、IGBT熱損失の定量化](#)
- [降圧コンバーターのMOSFETの故障、故障のある降圧コンバーター](#)
- [降圧コンバーターのサージ保護](#)
- [シミュレートされたI/Oデータを使用したPIDコントローラーの設計](#)
- [帯域幅近傍のプラントの周波数応答を使用したPIDコントローラーの設計](#)

– 昇圧コンバーター関連

- [昇圧コンバーター向け伝達関数モデルの推定](#)
- [昇圧コンバーターモデルのLPV近似](#)
- [周波数応答データを使用したパワーエレクトロニクスモデルのコントローラーの設計](#)
- [シミュレートされたI/Oデータを使用したパワーエレクトロニクスモデルのコントローラーの設計](#)
- [周波数応答の推定手法を使用した力率修正器のためのPIDコントローラーの設計](#)
- [Closed-Loop PID Autotunerブロックを使用したPIDコントローラーのリアルタイム調整](#)

コンバーター制御関連の参考情報

- サンプルモデル
 - 太陽光発電システム関連
 - [Solar PV System with MPPT Using Boost Converter](#)
 - [Stand-Alone Solar PV AC Power System with Battery Backup](#)
 - [Stand-Alone Solar PV DC Power System with Battery Backup](#)
 - [Single-Phase Grid-Connected Solar Photovoltaic System](#)
 - [Three-Phase Grid-Connected Solar Photovoltaic System](#)
 - その他
 - [パワエレ関連全般](#)



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.