

システムシミュレーション/1D-CAE の 基礎と導入ポイントを学ぶ初心者向けセミナー

MathWorks Japan

アプリケーションエンジニアリング部

赤阪 大介

システムシミュレーション/1D-CAE の 基礎と導入ポイントを学ぶ初心者向けセミナー

本セミナーの 趣旨



目的

- システムシミュレーション/1D-CAE の基本的な概念や考え方、導入に向けたポイントの理解を深める

内容

- 基本的な概念や考え方、導入に向けたポイント
- 具体例を交えたモデリングとシミュレーション解析の方法

参加対象者

- システムシミュレーション/1D-CAE の世界にご興味をお持ちの方、ご導入の検討を進めている方、あるいは新しいスキルを身につけたい方

シミュレーションへの第一歩を踏み出し、エンジニアリングの未来に挑戦しませんか？

内容

- モデリングとシミュレーション
- 1D-CAE 概要
- 1D-CAE 導入のポイント
- 1D-CAE 活用事例
- まとめ

モデリング・シミュレーションは開発上流からさらに必要とされる技術に

シミュレーション の必要性



- **製造業における経営課題**
 - 収益性向上・事業基盤強化
 - 人材強化(デジタル技術・データ活用に精通した人材、新たな技術の獲得)
- **開発上流のエンジニアリングチェーン・設計力強化が課題に**
 - 製品の品質とコストの大部分は開発上流の設計段階で決定する
 - 開発のフロントローディングによる問題早期発見、手戻り抑制が決定的に重要に
- **製品の価値・機能を起点とした上流設計の手段が必要に**
 - 顧客の多様なニーズ・要求への迅速な対応
 - 製品/システムのスマート化(複合化・複雑化)

シミュレーション(模擬実験)の価値について考えてみましょう

シミュレーション の価値



- **しくみがわかる**
 - 現象や機能のメカニズム・本質
 - コーナーケース
 - 可視化
- **予測ができる**
 - 定量的な予測
 - 方針・方策の確度向上
 - 手戻り抑制・コスト削減
- **実験・理論の共創**
 - 実験の補完
 - 理論・法則の気づき
 - 新たな価値創造

製品開発・プロセス

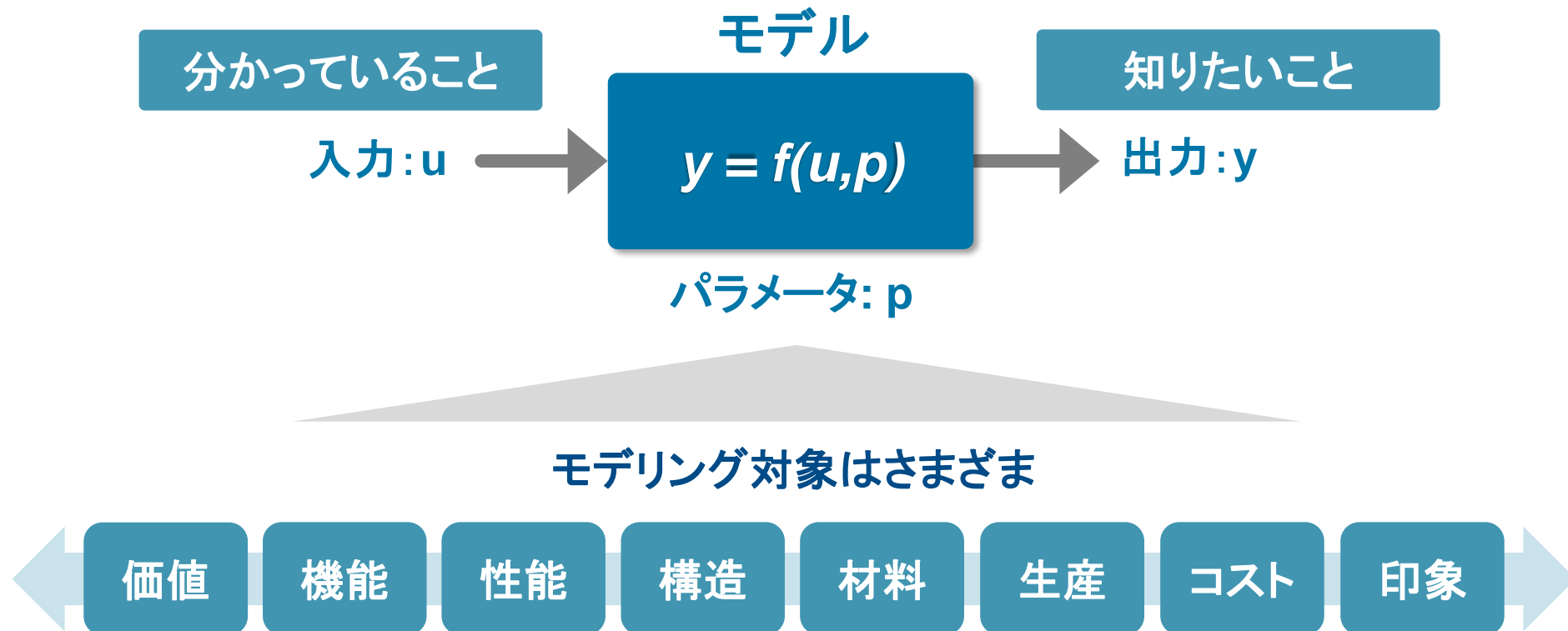
- 生産性向上
- 創造性向上



モデリング = 設計

設計対象を一意的に理解できる形式で表現し、ものづくりをより効率的・創造的なものにするための手段

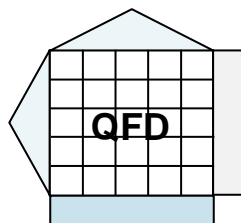
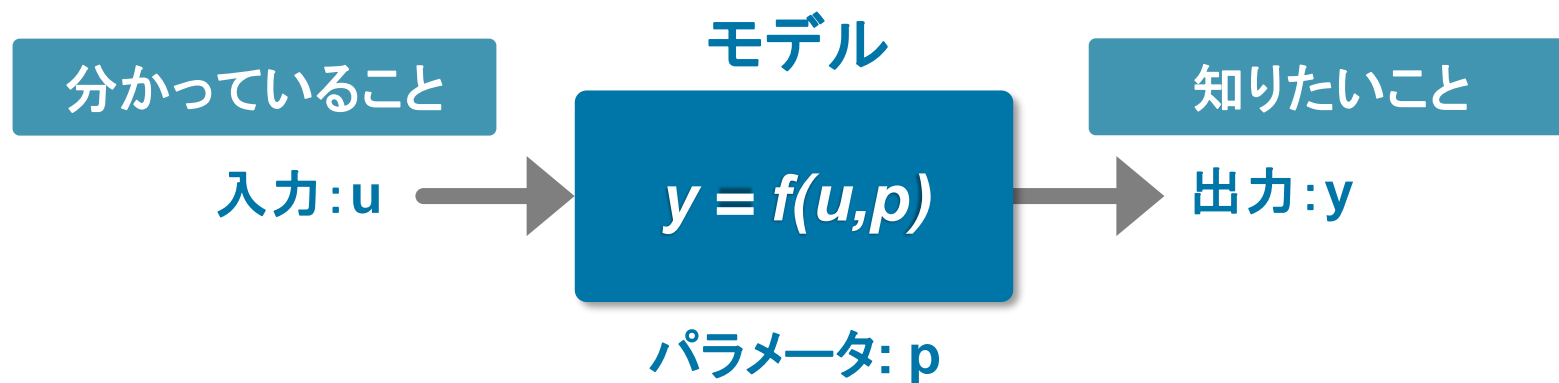
入力と出力の間の関係を定義すること



モデリング = 設計

設計対象を一意的に理解できる形式で表現し、ものづくりをより効率的・創造的なものにするための手段

入力と出力の間の関係を定義すること



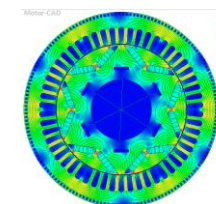
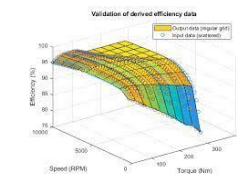
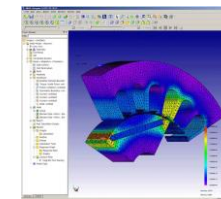
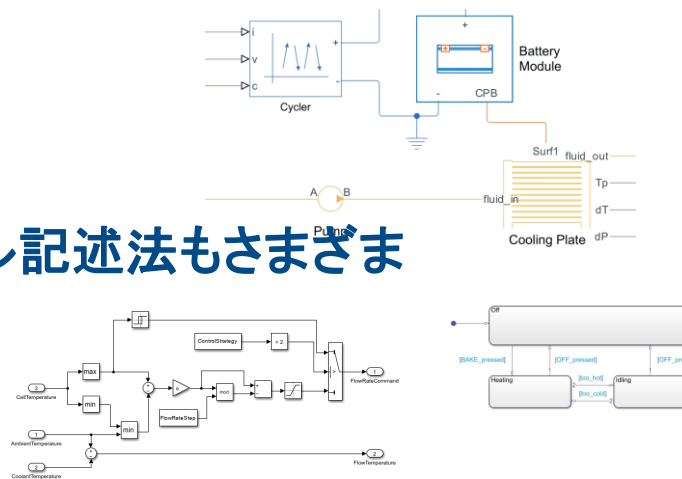
	A	B	C	D	E
Element A		X		X	
Element B			X		
Element C	X				X
Element D		X			
Element E	X		X		

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = v(t)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 v + f$$

$$y(k) = \frac{B(q)}{A(q)} u(k) + \frac{D(q)}{C(q)} e(k)$$

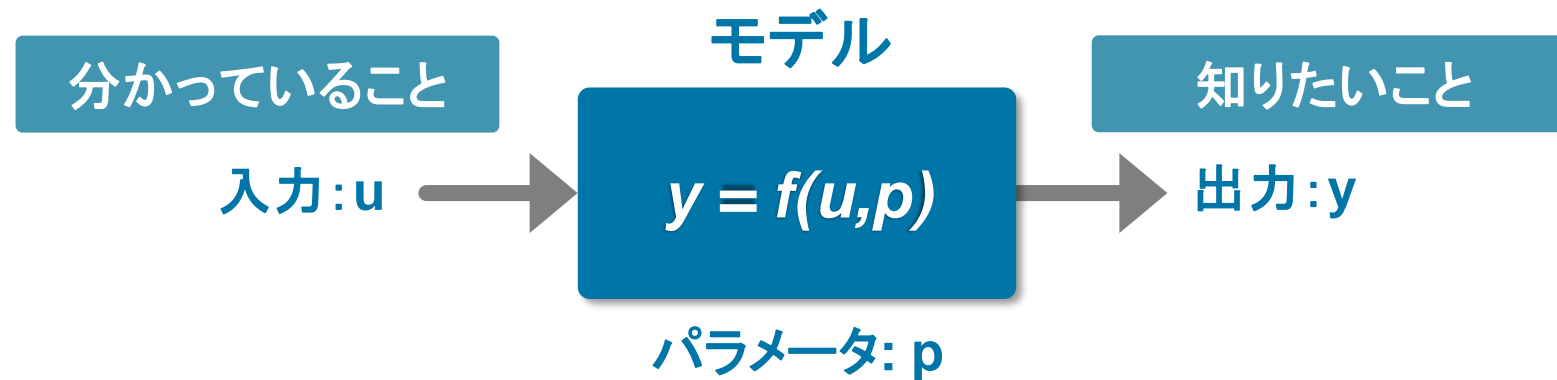
モデル記述法もさまざま



モデリング = 設計

設計対象を一意的に理解できる形式で表現し、ものづくりをより効率的・創造的なものにするための手段

入力と出力の間の関係を定義すること



1

作りたいものをモデリングする

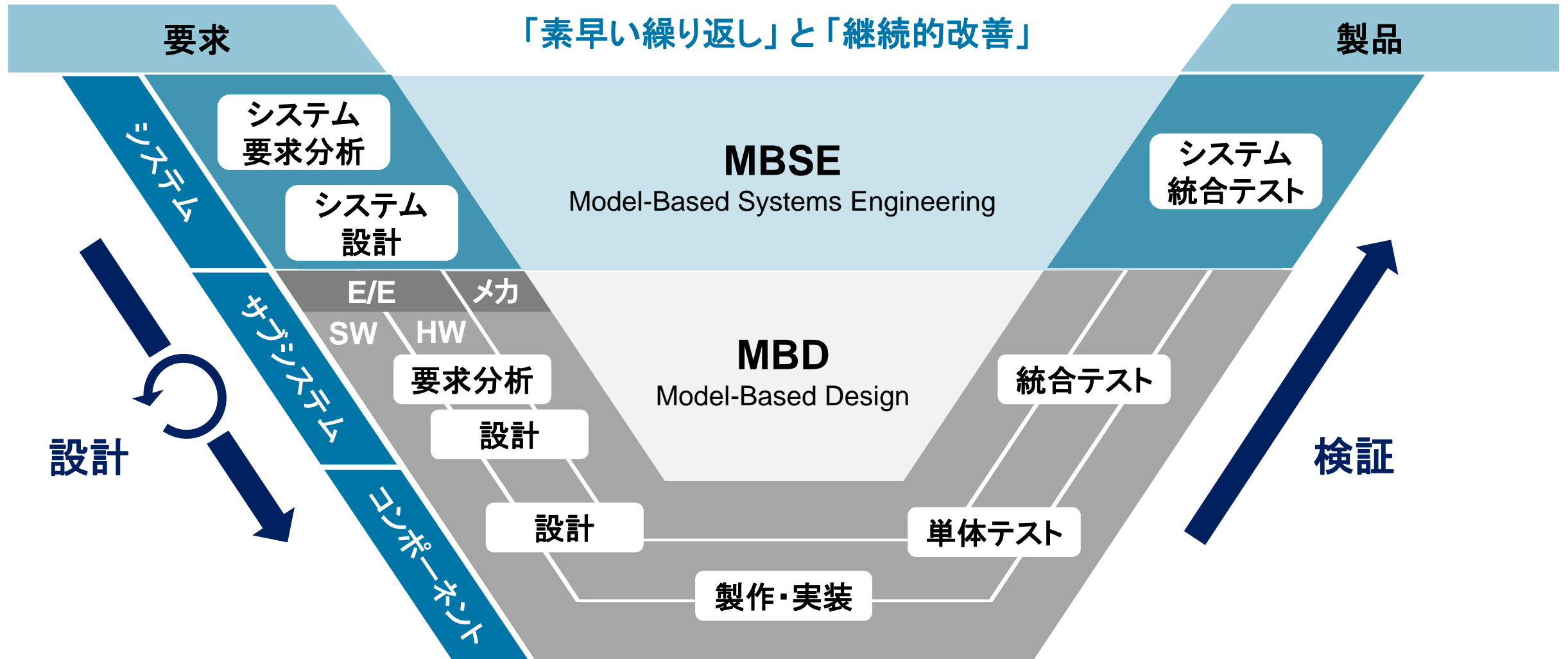
2

再現したいもの(現物・実体)をモデリングする

内容

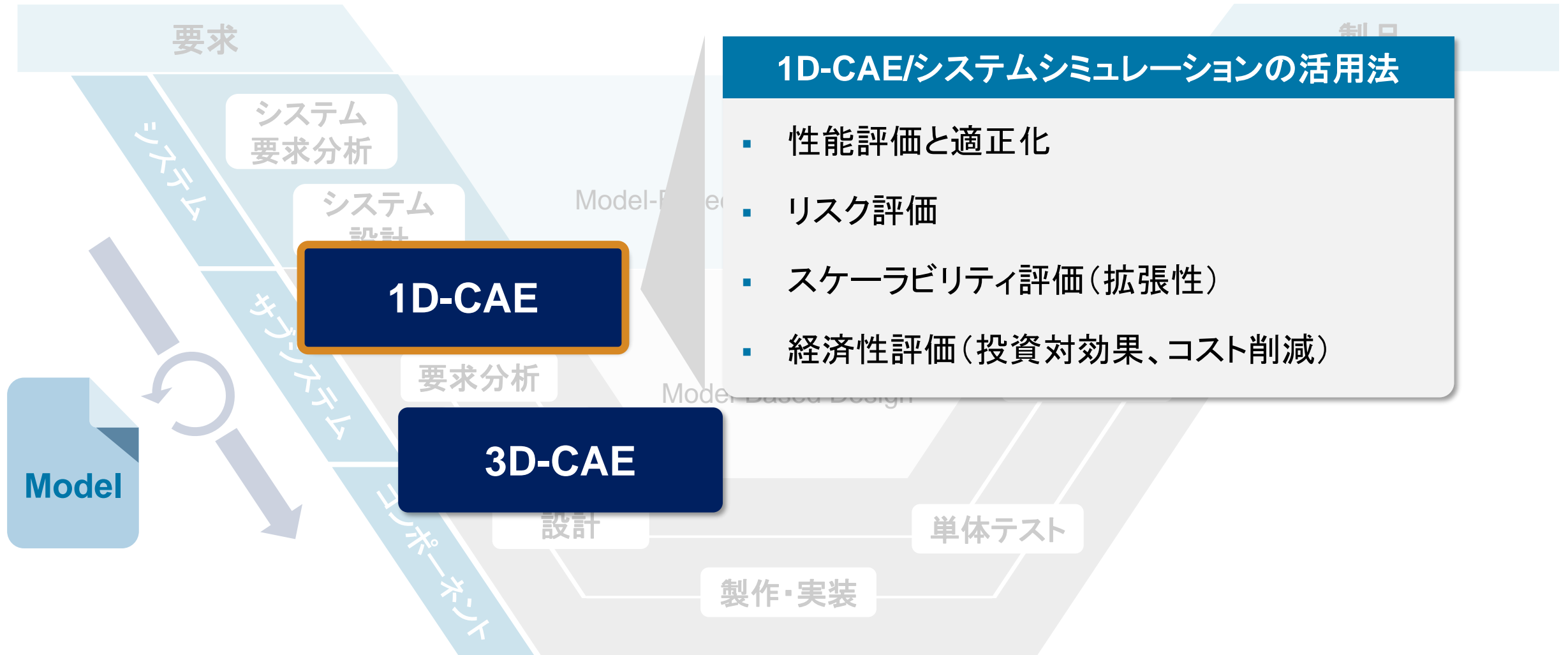
- モデリングとシミュレーション
- 1D-CAE 概要
- 1D-CAE 導入のポイント
- 1D-CAE 活用事例
- まとめ

モデルベースの製品開発プロセス



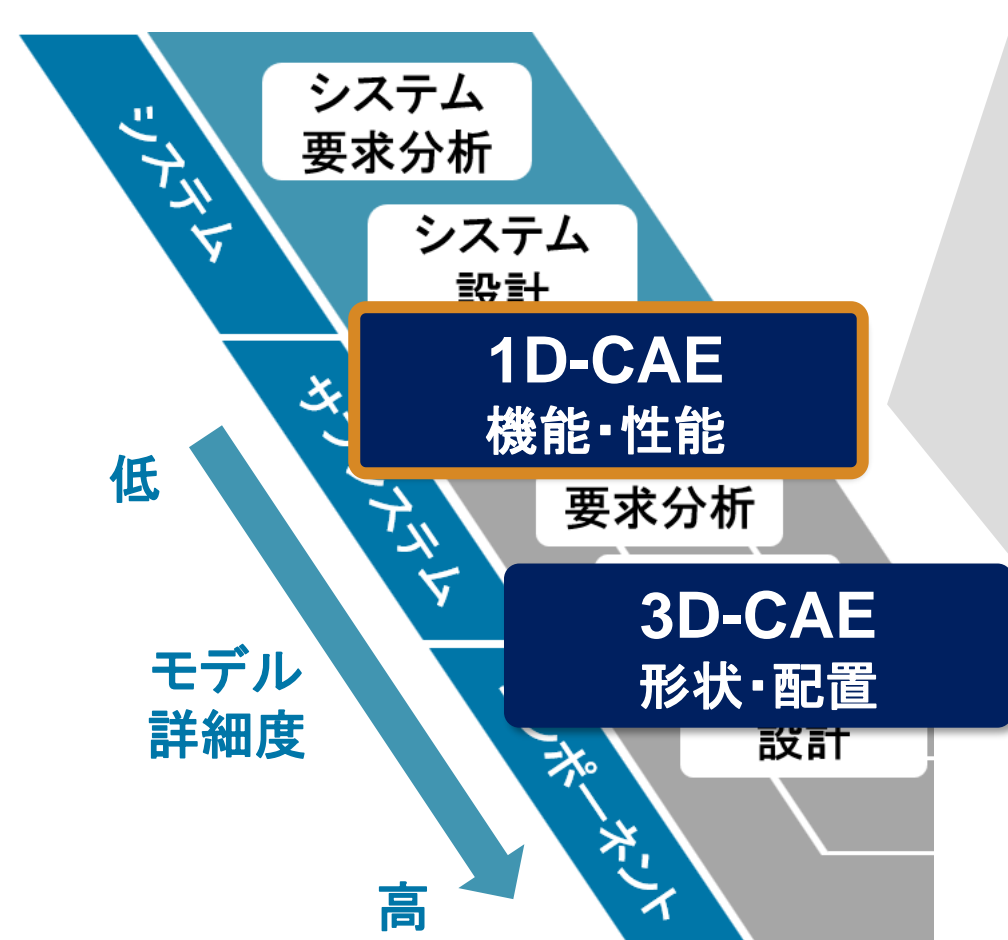


1D-CAE でシステム全体の機能・性能を評価し適正化



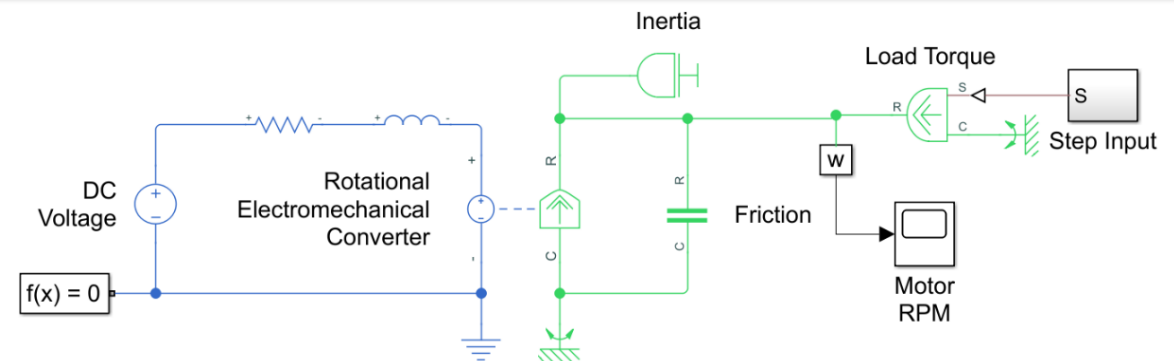
1D-CAE とは？ シンプルなモデルでシステムの機能・性能を適正化

- 物事の本質を的確に捉え、機能を見通しの良い形式でシンプルに表現する
- 「機能ベース」で対象とするシステム全体を表現し、評価解析可能とする



1D-CAE の特徴

- 保存則に基づき、**微分代数方程式**で現象を表現
- **複合領域の現象** (機械・電気・熱・流体) の表現が容易
- 一般的に 3D に比べて**シミュレーション負荷**が小さい
- 詳細な形状・配置 (3D) 決定前の**機能・性能検討**が使い所



1D-CAE に期待される 3 つの効果

1 上流設計の実現

- 不具合を下流に流さない
- 製品価値向上、コスト/リスク低減

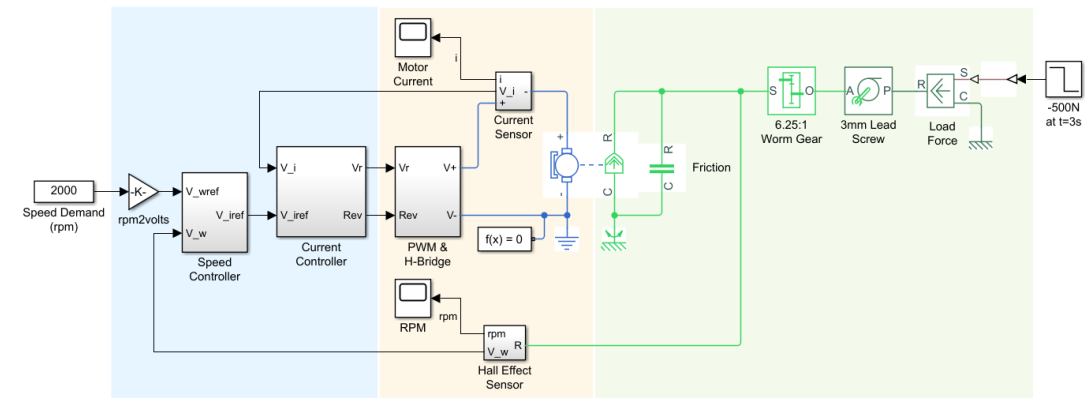
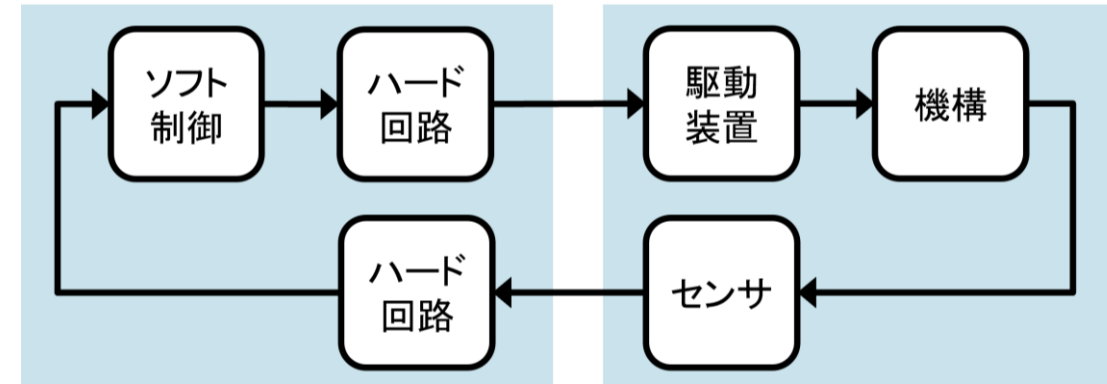
2 システム全体の可視化・適正化

- 各機能の可視化
- 機能を実現するパラメータの可視化
- ムリムダ排除、抜け防止、品質向上

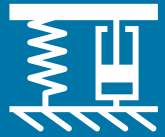
3 エンジニア育成

- 物理現象を理解し、製品イメージを機能展開する能力を養成

システム



1D モデリングのアプローチ

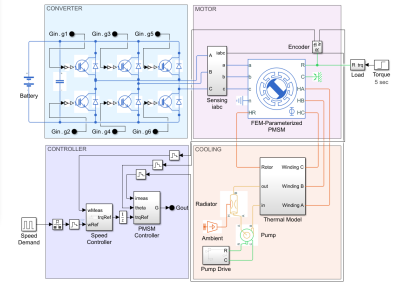


物理法則型 モデリング

物理法則に基づくモデリング

- 物理法則（保存則）を利用し、モデル変数間の関係を微分代数方程式により記述

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, u) \\ 0 &= g(x, y, u)\end{aligned}$$



特性値の抽出による 3D から 1D への縮退化

- 3D-CAE ツールから特性マトリクス情報を抽出し、必要な次元に縮退し、1D-CAE ツールに取り込む

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} & R_{15} & R_{16} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} & R_{25} & R_{26} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & R_{34} & R_{35} & R_{36} \\ R_{41} & R_{42} & R_{43} & R_{44} & R_{45} & R_{46} \\ R_{51} & R_{52} & R_{53} & R_{54} & R_{55} & R_{56} \\ R_{61} & R_{62} & R_{63} & k_{64} & k_{65} & R_{66} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du\end{aligned}$$

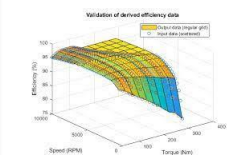


低次元化 モデリング

実験モデリング（3D-CAE による数値実験も含む）

- 汎用的な関数を仮定し、その係数を実験データから調整
例：応答曲面法、システム同定、深層学習

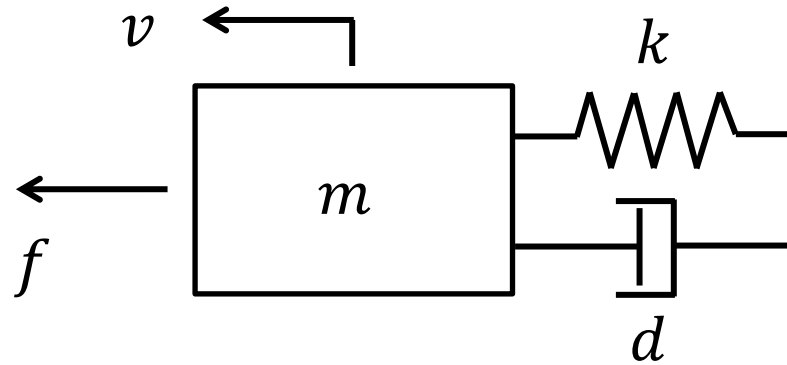
$$y(k) = \frac{B(q)}{A(q)} u(k) + \frac{D(q)}{C(q)} e(k)$$



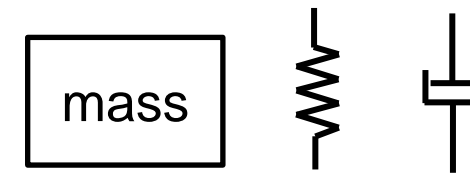
因果的モデリング と 非因果的モデリング

微分方程式

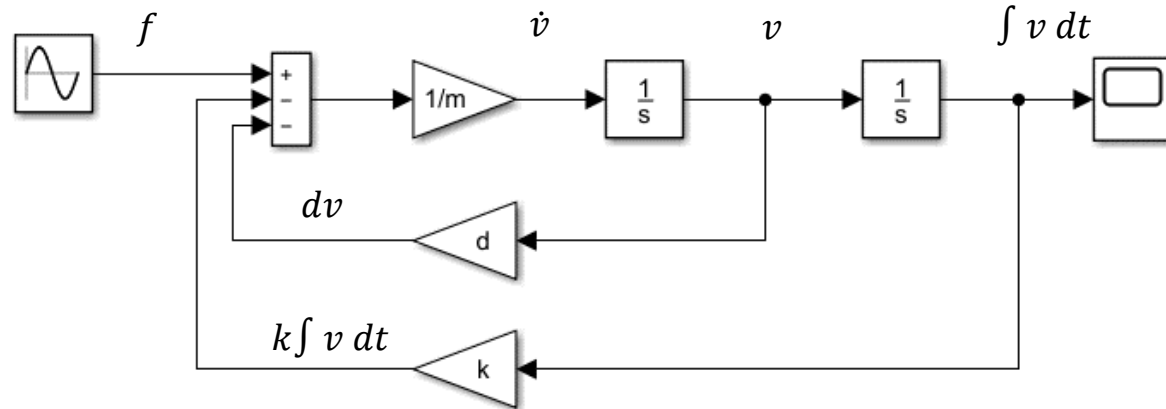
$$m\dot{v} + dv + k \int v dt = f(t)$$



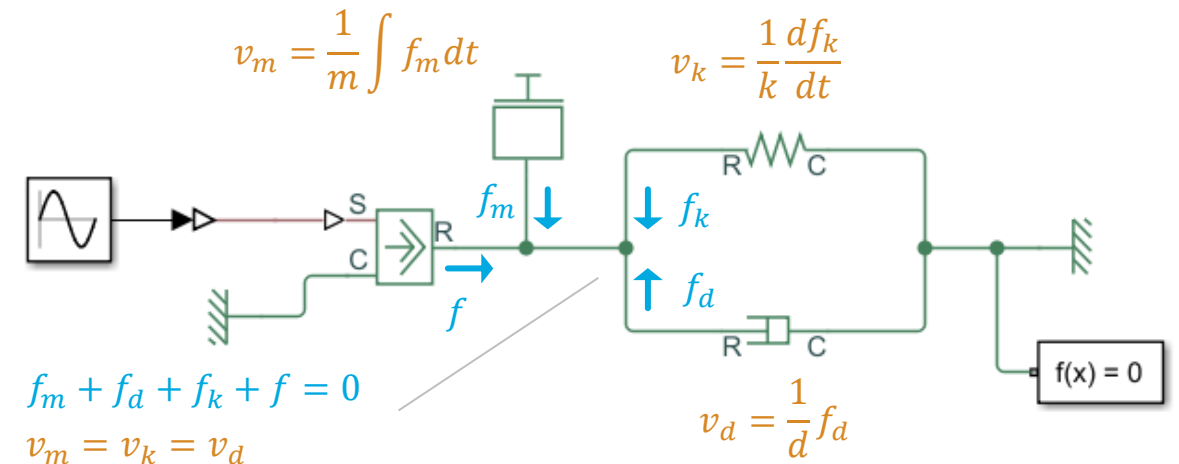
部品 (特性・振る舞い)
接続関係 (保存則・拘束)



因果的モデリング (微分方程式)



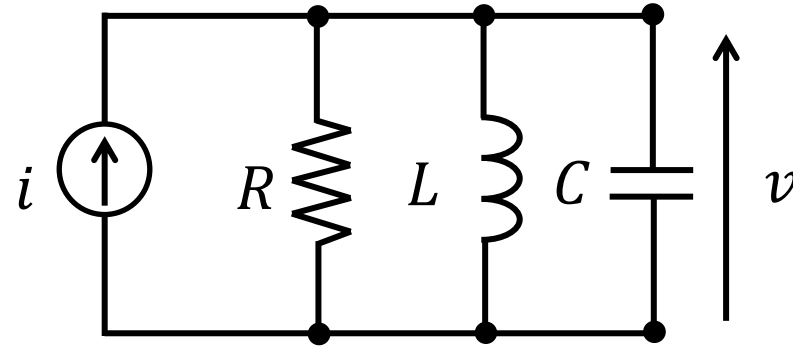
非因果的モデリング (微分代数方程式)



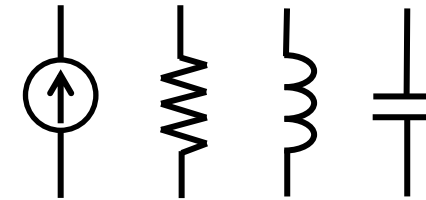
因果的モデリング と 非因果的モデリング

微分方程式

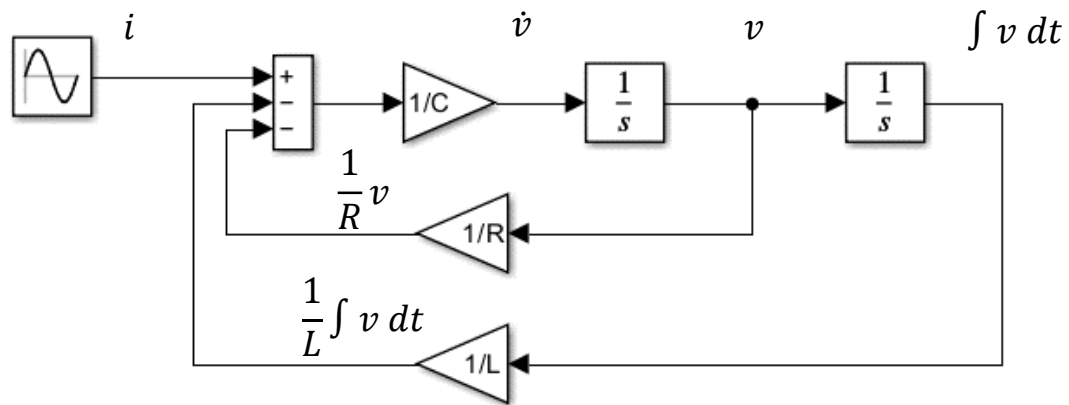
$$C\dot{v} + \frac{1}{R}v + \frac{1}{L}\int v dt = i(t)$$



部品 (特性・振る舞い)
接続関係 (保存則・拘束)



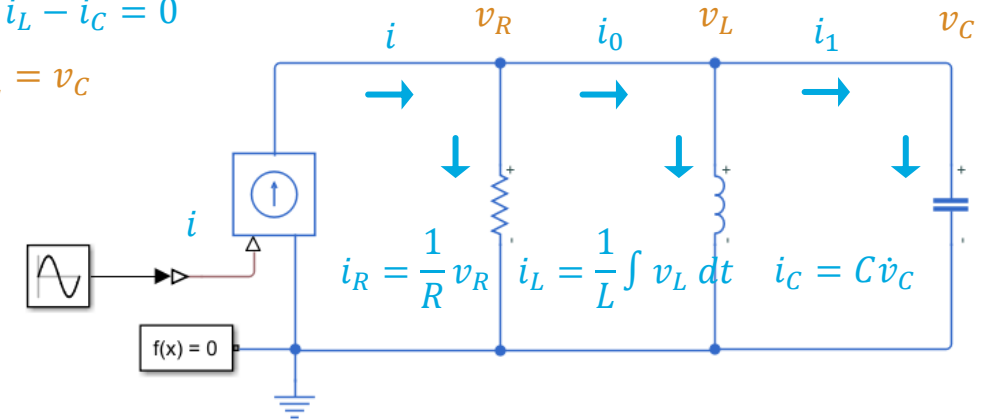
因果的モデリング (微分方程式)



非因果的モデリング (微分代数方程式)

$$i - i_R - i_L - i_C = 0$$

$$v_R = v_L = v_C$$

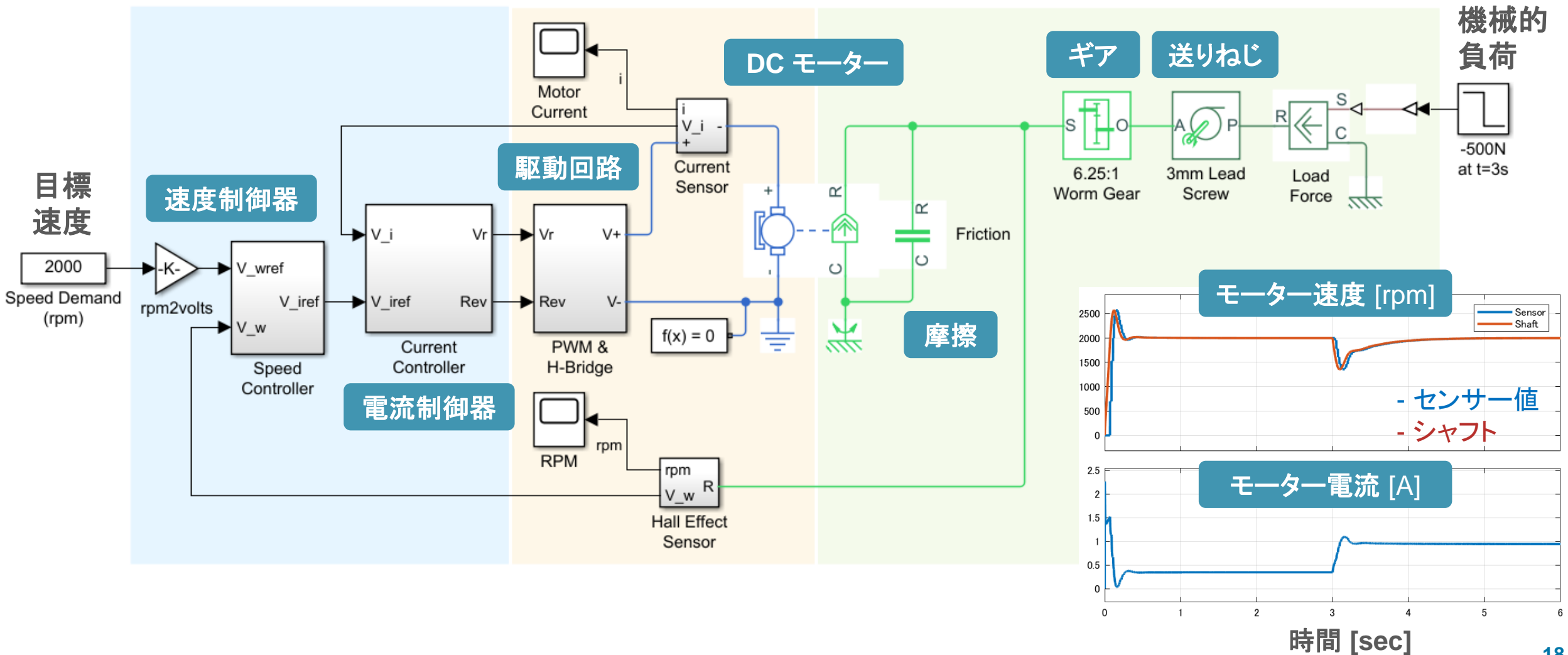


例題： リニアアクチュエータ

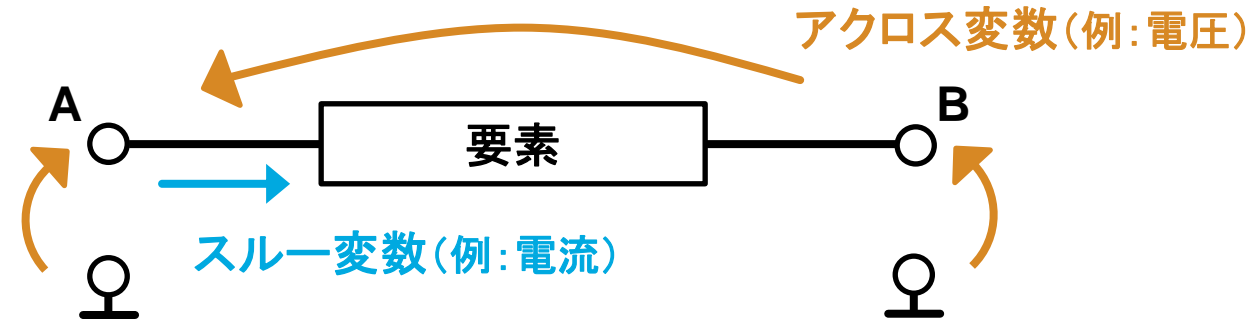
制御(ブロック線図)

エレキ(物理回路網)

メカ(物理回路網)



アクロス(Across)変数 と スルー(Through)変数



物理ドメイン アクロス変数の例

スルー変数の例

物理ドメイン	アクロス変数の例	スルー変数の例
電気	電圧	電流
気体	絶対圧力と絶対温度	質量流量とエネルギー流量
油圧	ゲージ圧力	体積流量
等温流体	絶対圧力	質量流量
磁力	起磁力 (mmf)	磁束
機械回転	角速度	トルク
機械並進	並進速度	力
湿り空気	絶対圧力、温度、比湿 (水蒸気の質量分率)、微量気体の質量分率	混合体の質量流量、混合体のエネルギー流量、水蒸気の質量流量、微量気体の質量流量
熱	温度	熱流量
熱流体	絶対圧力と絶対温度	質量流量とエネルギー流量
二相流体	絶対圧力と比内部エネルギー	質量流量とエネルギー流量

非因果モデルの一般的な構成方法

1 各要素の物理的な振る舞いは
保存則に基づく「微分代数方程式」で定義

2 要素間を接続することで、アクロス変数・スルー
変数の拘束条件が発生
(キルヒホッフ第 1, 2 法則のアナロジー)

節点方程式 $I_1 + I_2 + I_3 = 0$

閉路方程式 $V_{in} - V_1 - V_3 = 0$

$V_{out} - V_2 - V_3 = 0$

3 物理回路網全体の微分代数方程式を構成

$$C \frac{dV_2}{dt} = I_2$$

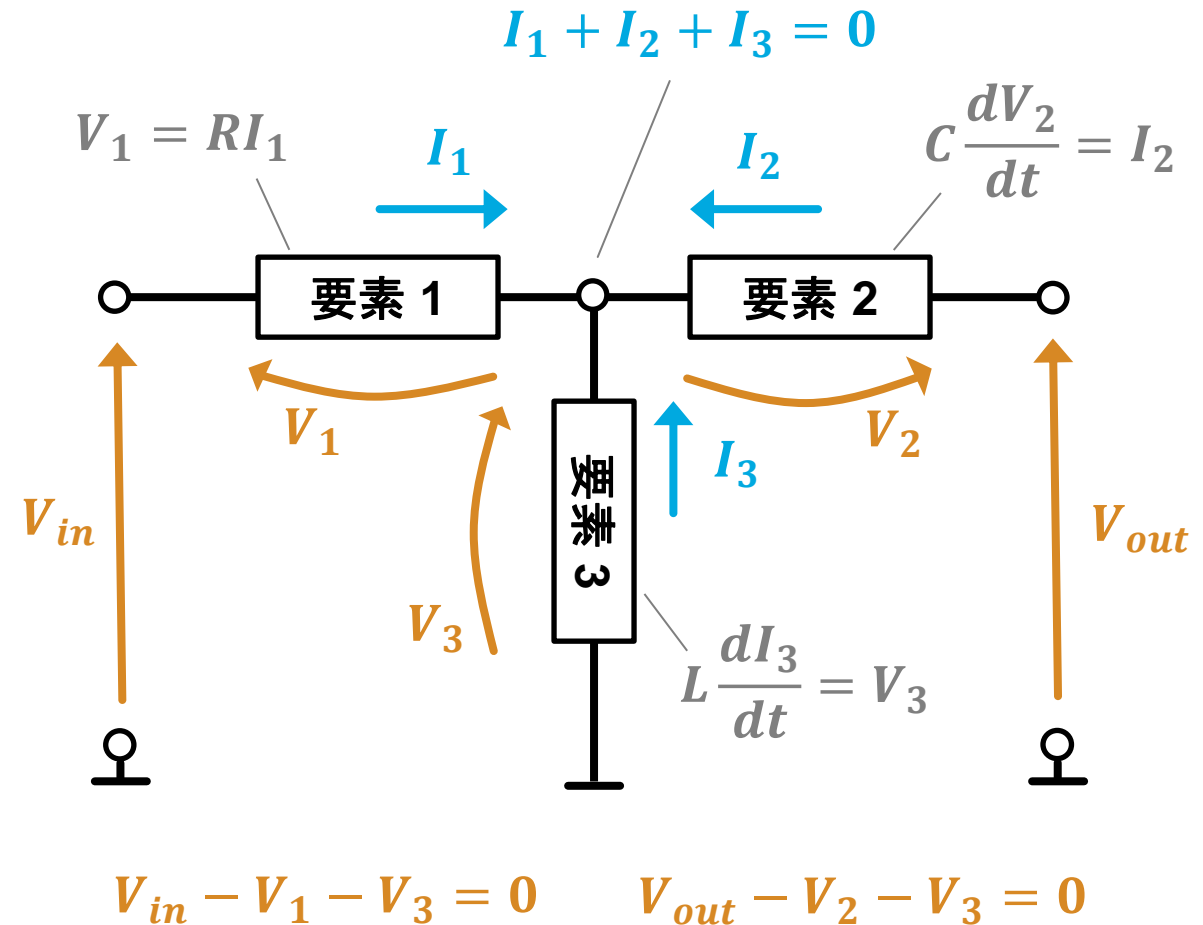
$$V_1 - RI_1 = 0$$

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

$$V_{in} - V_1 - V_3 = 0$$

$$V_{out} - V_2 - V_3 = 0$$

$$L \frac{dI_3}{dt} = V_3$$



例題： リニアアクチュエータ

制御(ブロック線図)

エレキ(物理回路網)

メカ(物理回路網)

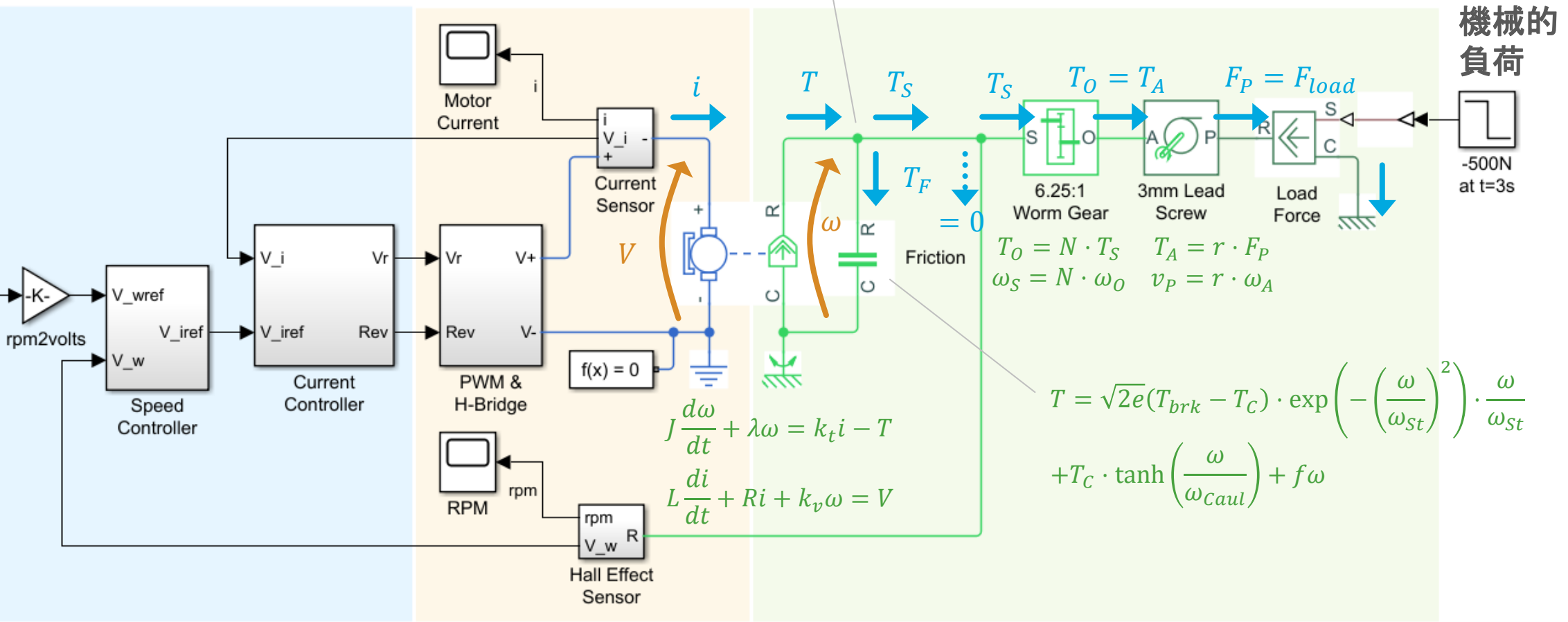
機械的
負荷

-500N
at t=3s

目標
速度

2000

Speed Demand
(rpm)



Across 変数 電圧 V

Through 変数 電流 i

Across 変数 回転速度 ω ・ 並進速度 v

Through 変数 トルク T ・ 力 F

モデルを抽象化する 3 つの理由

設計の目的やフェーズに応じて、モデル詳細度の使い分けが必要

モデル抽象化の ポイント

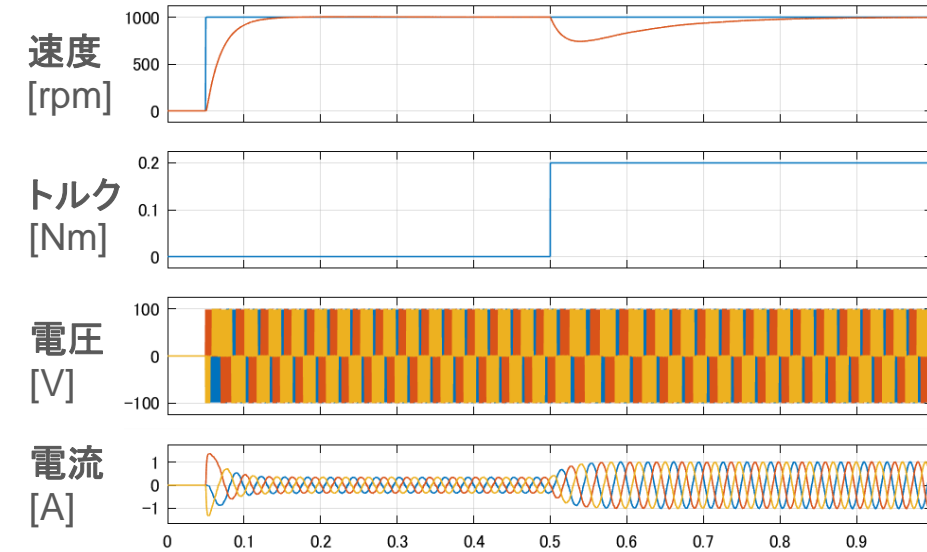
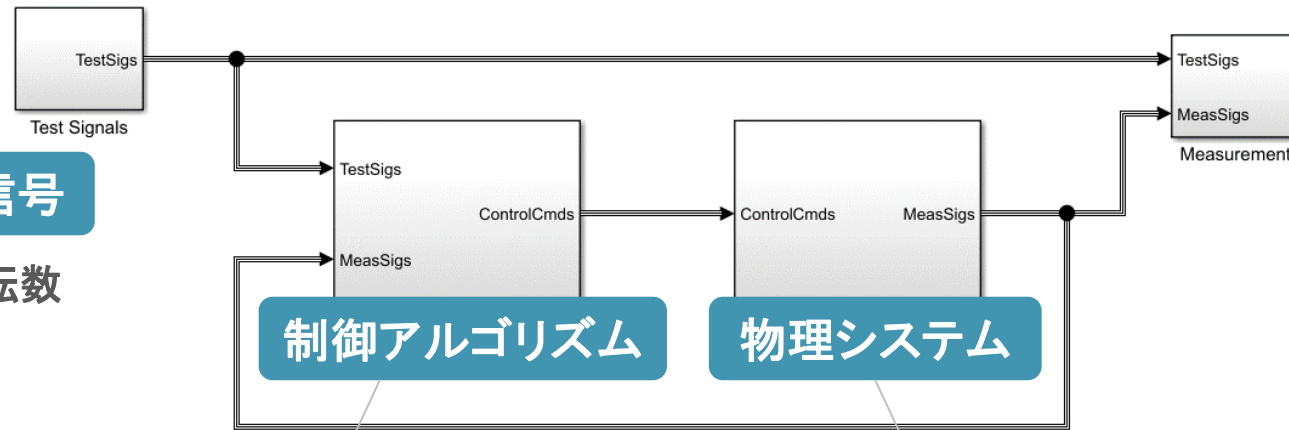


- システムの理解を容易に
 - システム全体の振る舞いや相互作用の把握を容易に
 - 異なる分野の技術者同士のコミュニケーション活性化
- 汎用性・再利用性の向上
 - 他の開発やプロジェクトにおけるモデルの再利用
 - 組織を超えたモデルの共有・展開
- 計算時間の短縮
 - 広い設計区間や多くのシナリオを短期間で評価
 - リアルタイムシミュレータへの応用

例題： モーター駆動システム

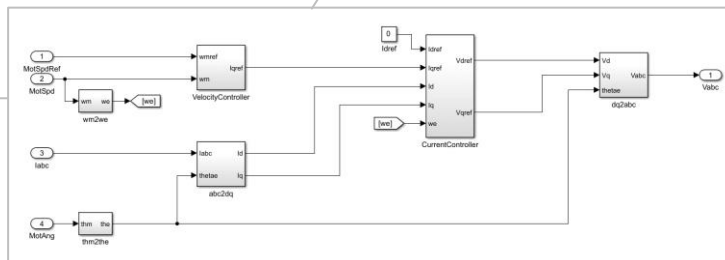
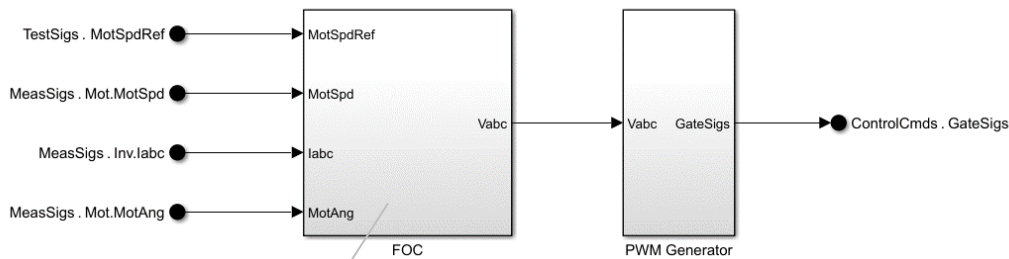
テスト信号

目標回転数

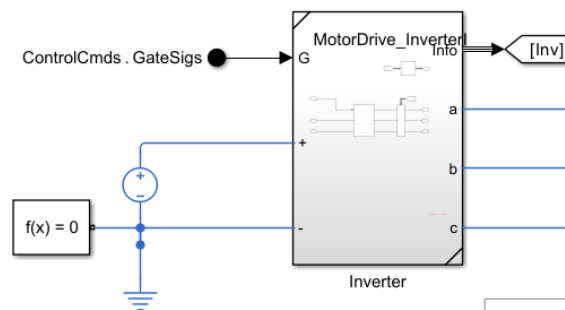


ベクトル制御

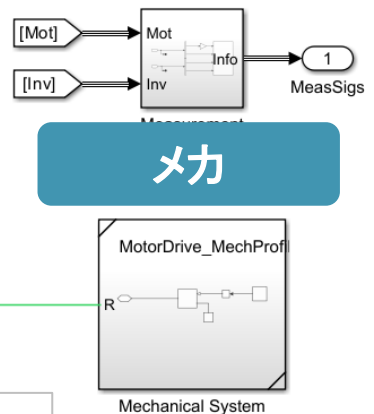
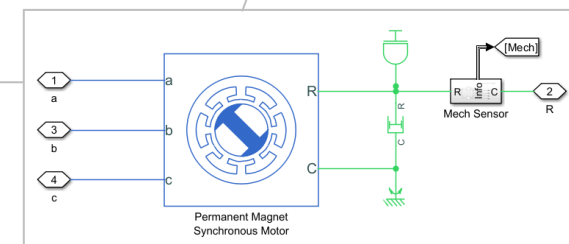
PWM 生成



インバータ



モーター

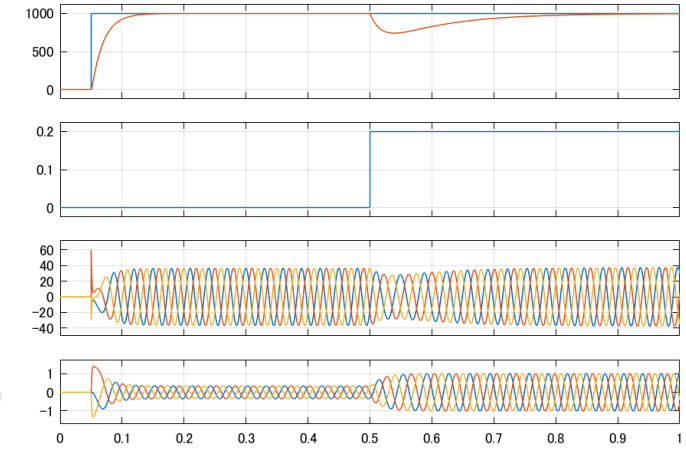
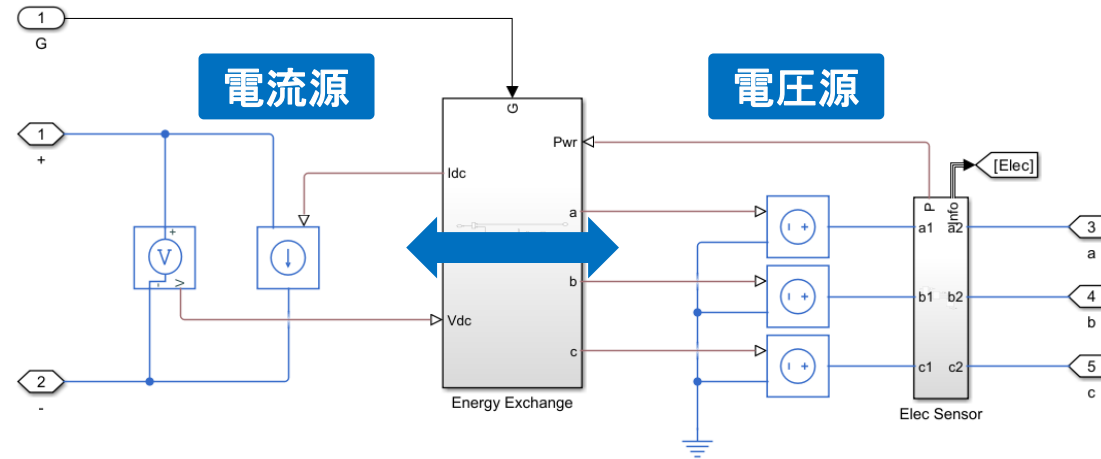


インバータモデル

低

等価回路

基本原則: $P_{dc} = \eta P_{ac}$ (η : 変換効率)



エネルギー収支に基づき
機器特性をモデル化

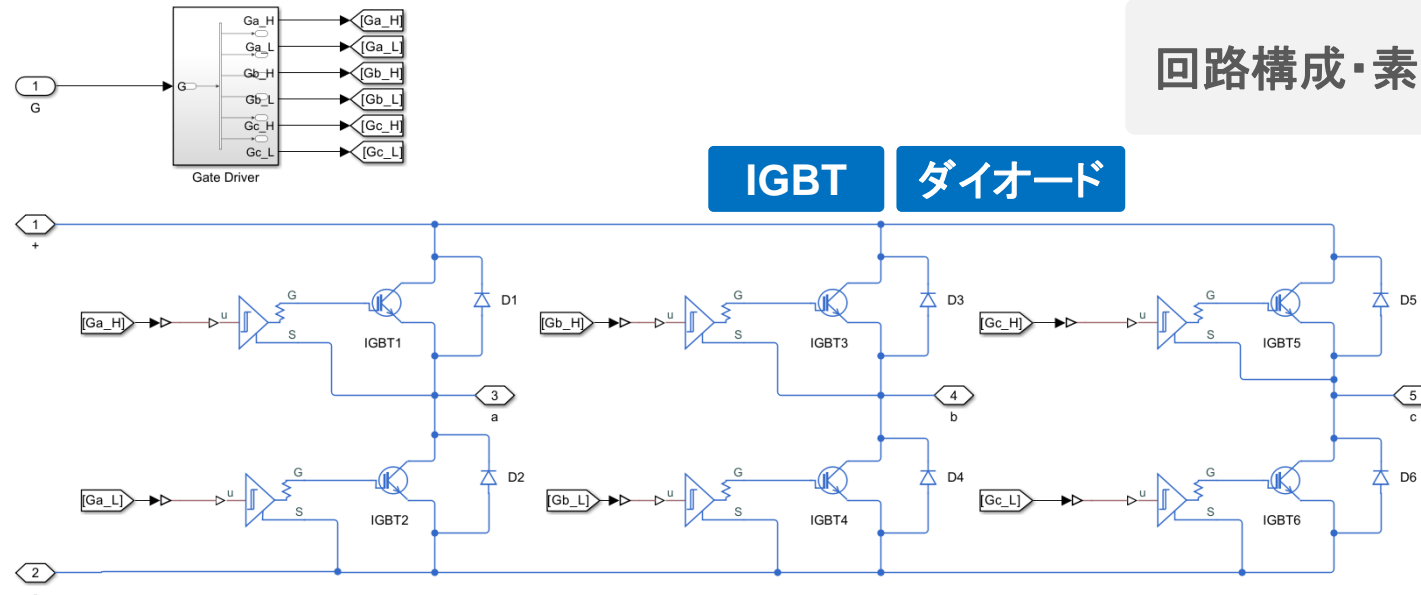
モデル
詳細度

平均化

理想素子特性

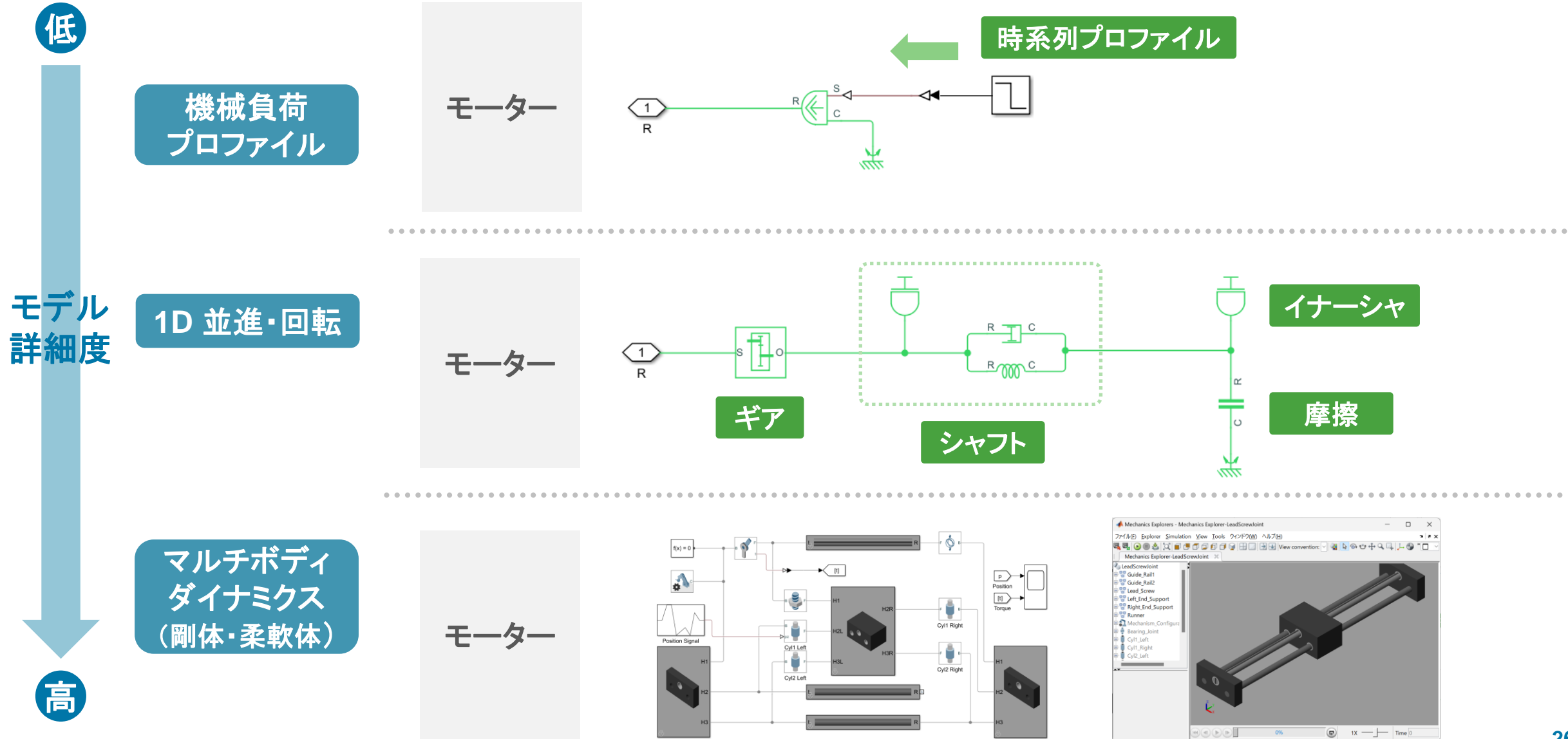
詳細素子特性

高



回路構成・素子特性をモデル化

メカモデル



内容

- モデリングとシミュレーション
- 1D-CAE 概要
- 1D-CAE 導入のポイント
- 1D-CAE 活用事例
- まとめ

1D-CAE 導入のポイント

1D-CAE 導入 のポイント



- **ニーズの明確化**
 - 導入の目的、導入する設計フェーズ、評価するシステムの機能・性能
- **適切なモデリング手法とツールの選択**
 - 目的に応じたモデリングのアプローチとシミュレーションツールの選択
- **利用可能なデータや既存資産(モデル)の把握**
 - 組織内でモデリングや検証に利用できるデータや資産の整理
- **PoC やパイロットプロジェクトによる 1D-CAE のトライアル**
 - 現物・実体と照らし合わせた評価からスタート
- **モデリング技能のトレーニング・教育**
 - 「モデル」は対象の振る舞いの知識、育むもの

一方、1D-CAE の難しさもあります

やはりモデリングの知識・経験の蓄積が求められる

1D-CAE の 難しさ



- シミュレーションの目的に応じた
モデリング手法とモデル詳細度の見極め
- モデル詳細度と計算コストとのバランス
- 異なる領域のモデルの準備・統合
- シミュレーション結果の解釈・活用
- シミュレーションツールの使いこなし

内容

- モデリングとシミュレーション
- 1D-CAE 概要
- 1D-CAE 導入のポイント
- 1D-CAE 活用事例
- まとめ

例題：プリンタ紙送りシステム

目標：高速・高精度かつバラツキに強い紙送りシステム

制御装置

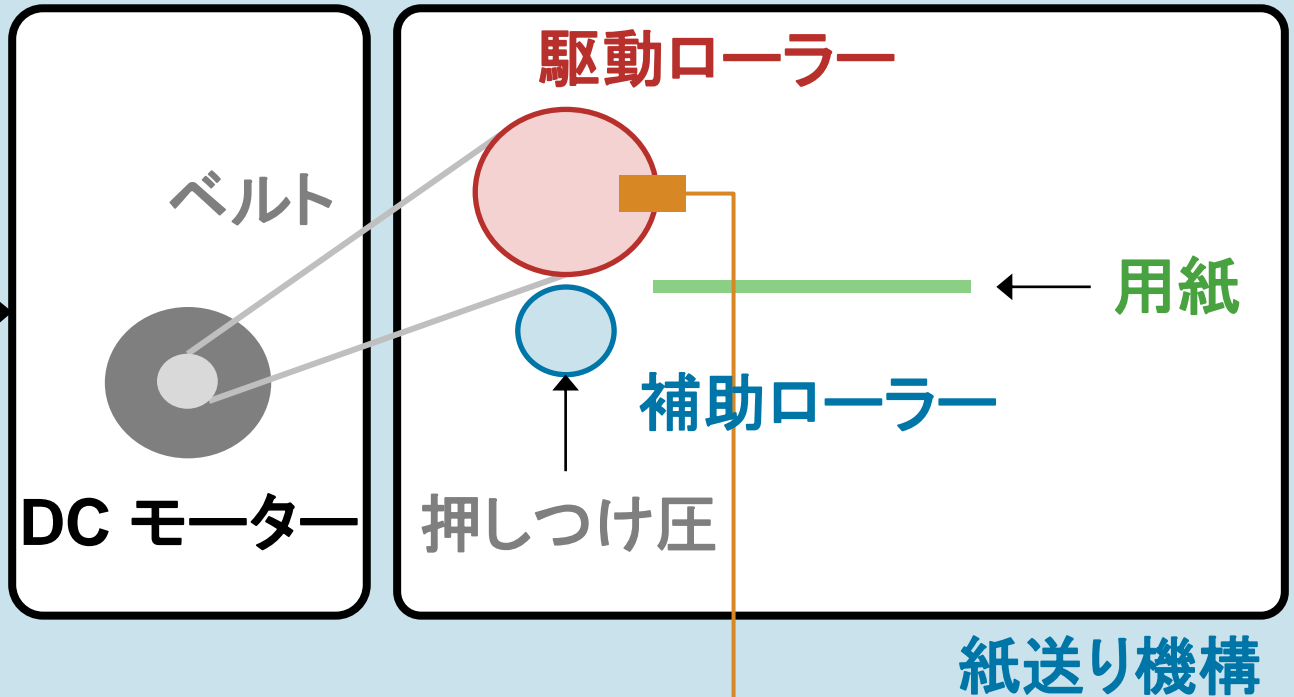
マイコン

位置決め
制御

ハード
回路

駆動ローラーの回転角度を制御して
「紙送り量」を制御

ハード
回路



エンコーダ

回転角度を測定

1D-CAE の使い道

1. 制御性能評価

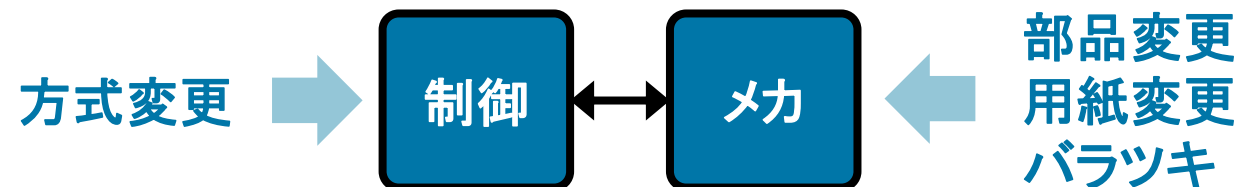
- 部品構成や物性パラメータを変更
- ユースケース(用紙種類の違い)
- 物性パラメータのバラツキを考慮

2. メカ・制御設計

- バラツキに強いメカ・制御設計
- メカ屋と制御屋の連携

1D モデルが必要な理由

1. 上流でメカ変更の影響を知るために
簡潔に抽象化されたモデルが必要
2. 再利用性を高めるために
汎用的なモデルが必要
3. 繰り返しシミュレーションするために
軽いモデルが必要
4. メカ屋と制御屋が会話するために
システムの可視化が必要



1D-CAE の検討例

1. 制御性能評価

- 部品構成や物性パラメータを変更
- ユースケース(用紙種類の違い)
- 物性パラメータのバラツキを考慮

各部品(モーター、ローラー、ベルト)や
用紙による負荷の違いによる
制御性能分析

バラツキを確率分布で与え、
モンテカルロシミュレーションを実行し
影響度/寄与度分析

2. メカ・制御設計

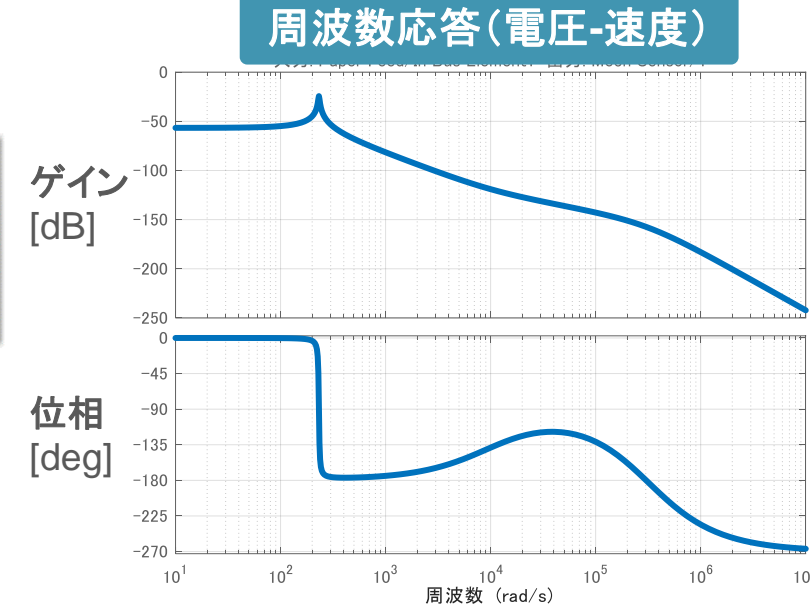
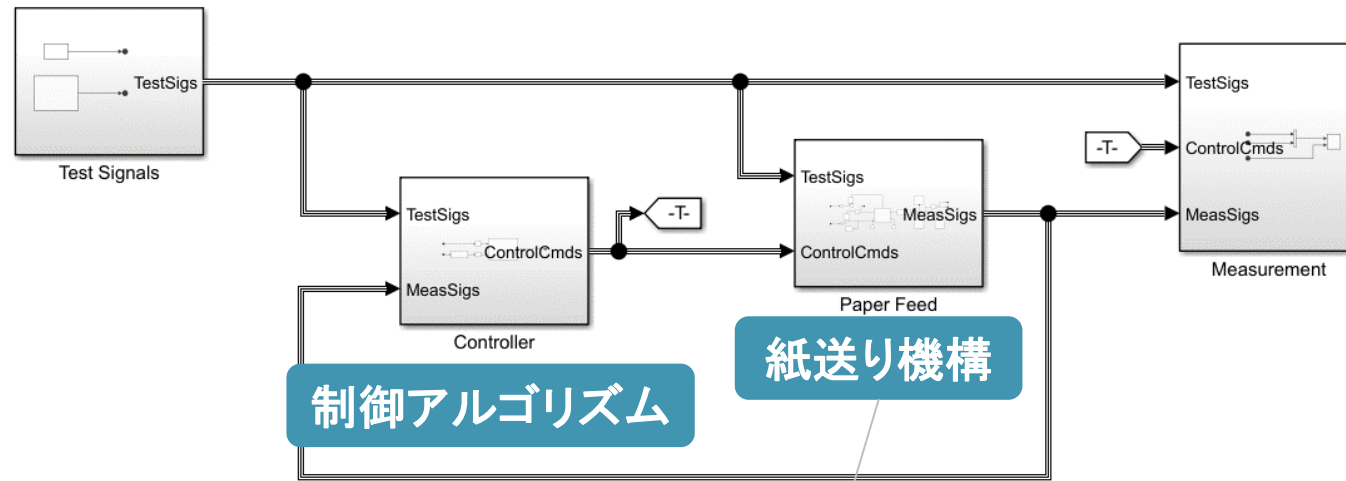
- バラツキに強いメカ・制御設計
- メカ屋と制御屋の連携

品質工学(例: タグチメソッド)に基づく
ロバスト最適設計

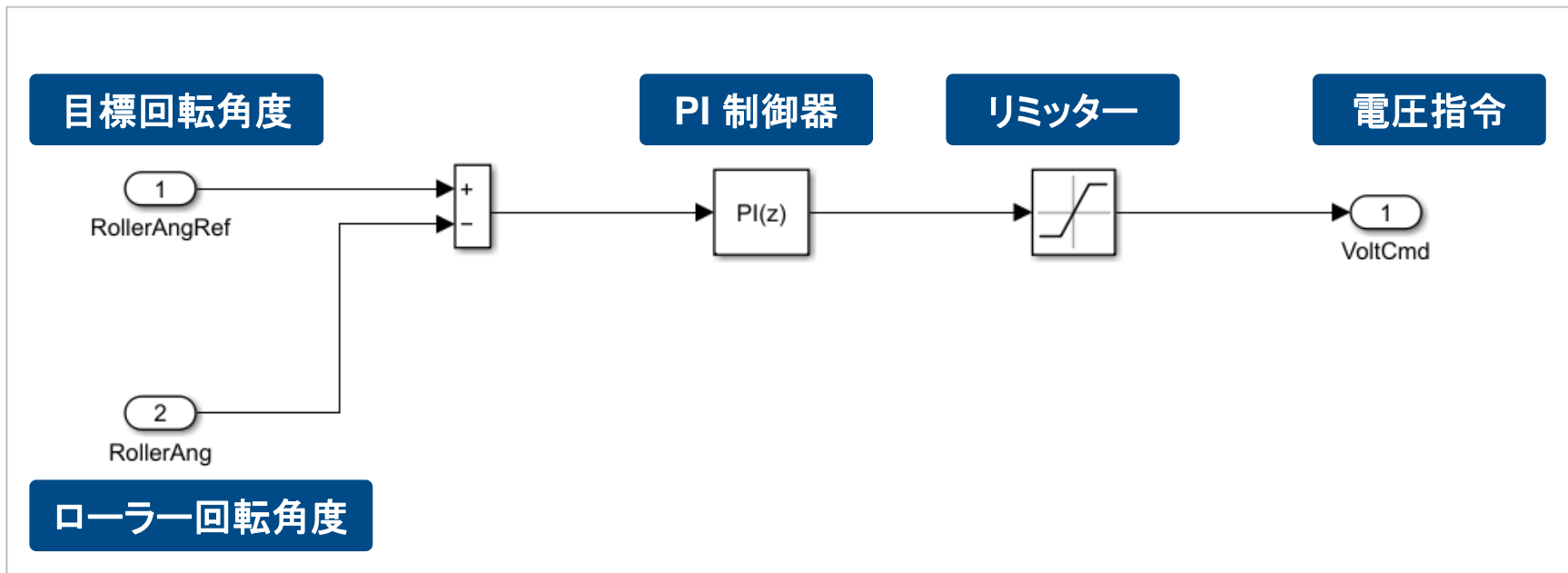
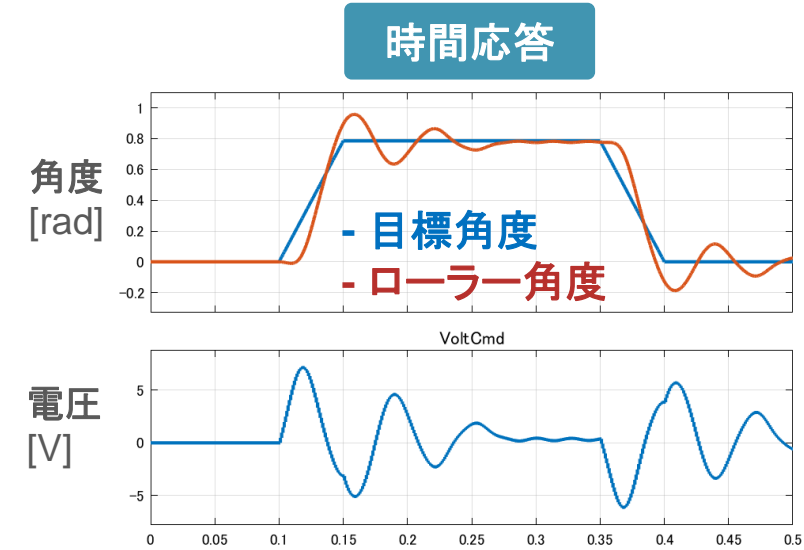
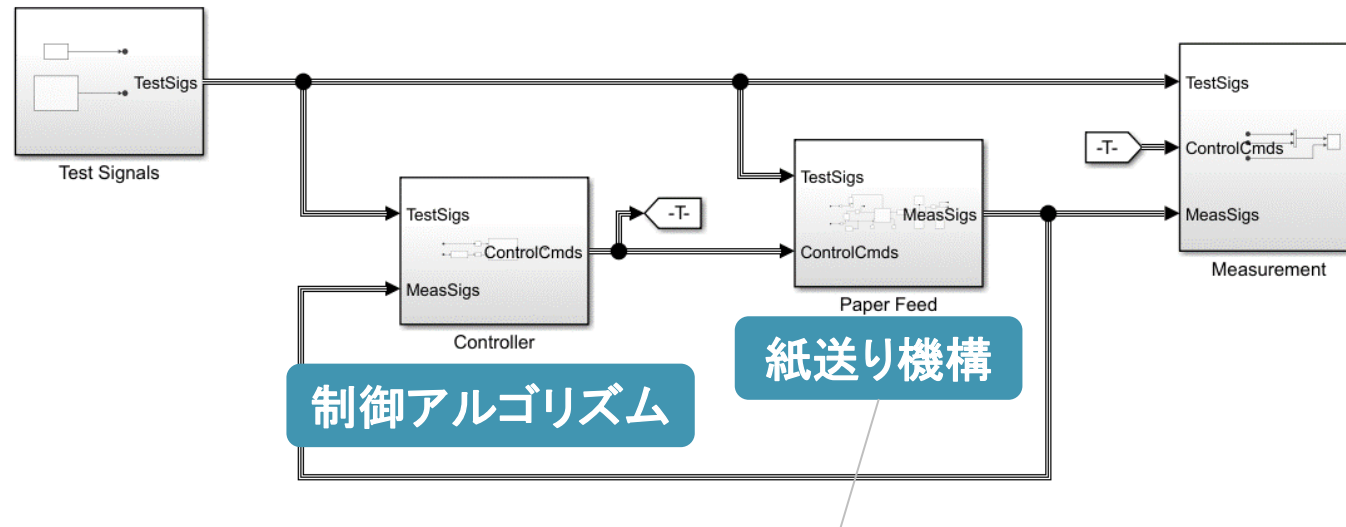
コストと性能の**トレードオフ分析**
部品や制御手法の選定

重要パラメータの抽出
設計中心値の提案

- 目標回轉角度
- 周辺温度

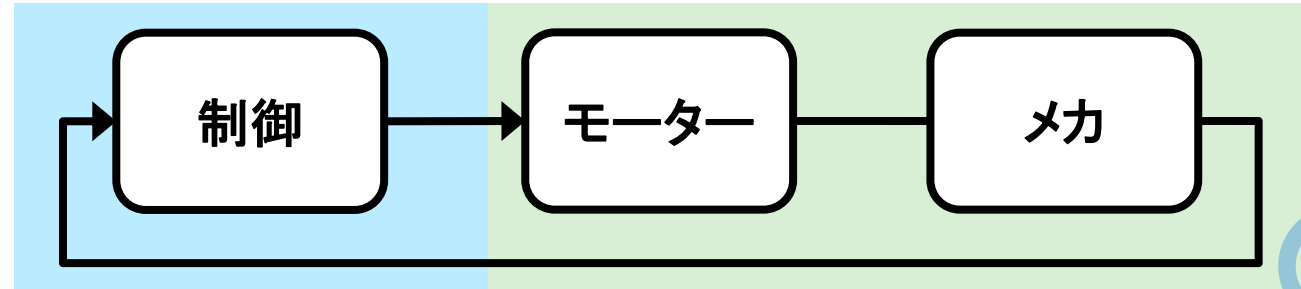


- 目標回轉角度
- 周辺温度



性能バラツキシミュレーションへの応用

1D モデル

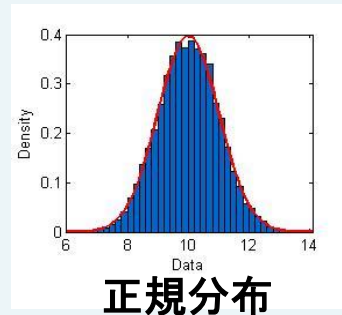


パラメータを振って
繰り返しシミュレーション

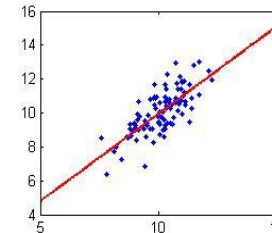
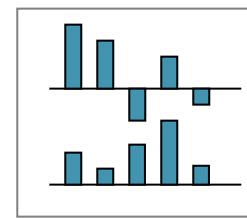
パラメータの
バラツキ・変化

モンテカルロ
シミュレーション

統計解析



- メカの統計的バラツキ
- 制御パラメータの変化

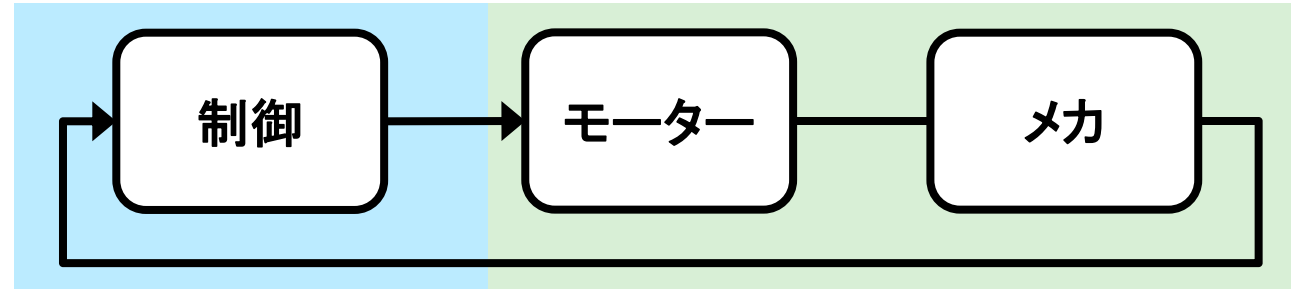


- 感度・相関解析
- ロバスト性解析

ロバスト設計
最適設計

性能バラツキシミュレーションへの応用

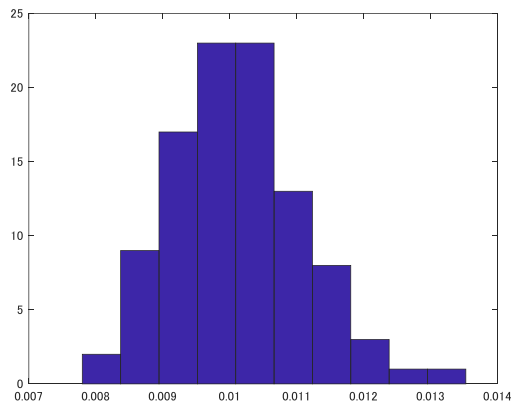
1D モデル



オーバーシュート OS

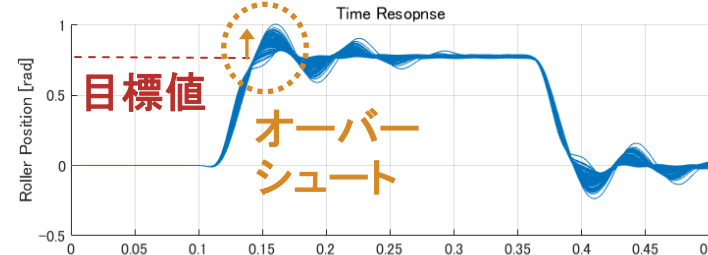
- 平均: 12.3199
- 分散: 29.3882
- 相関: -0.9380
- 感度: $-5.0308e+03$

モータートルク定数

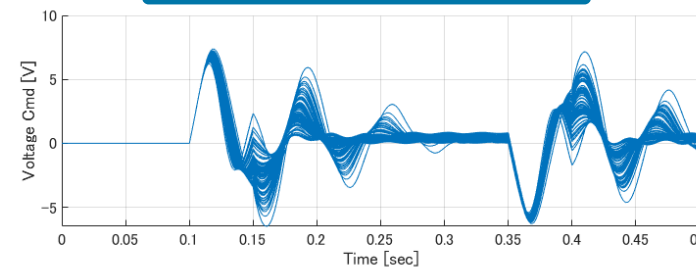


バラツキ(正規分布)

駆動ローラー位置

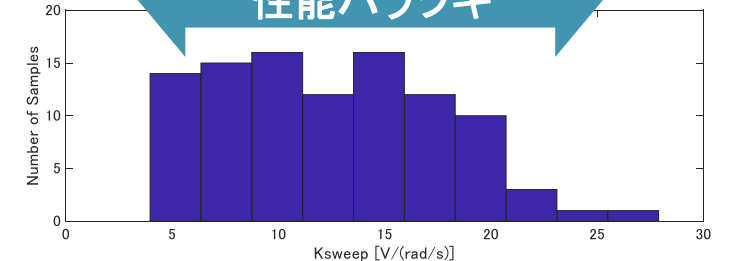


モーター電圧指令

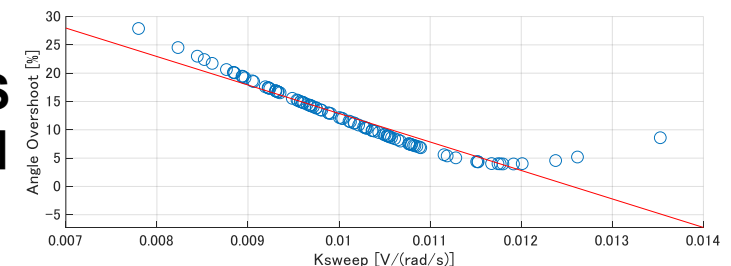


オーバーシュート OS
(行き過ぎ量)

性能バラツキ



OS [%]



トルク定数 [Vs/rad]

内容

- モデリングとシミュレーション
- 1D-CAE 概要
- 1D-CAE 導入のポイント
- 1D-CAE 活用事例
- まとめ

まとめ

まとめ



- **競争力の源泉はエンジニアリングチェーンの上流にシフト**
 - 開発上流のエンジニアリングチェーン・設計力強化が課題に
 - 製品の価値・機能を起点とした上流設計の手段が必要に
- **1D-CAE/システムシミュレーションでシステム全体の機能・性能を適正化**
 - 物事の本質を的確に捉え、機能を見通しの良い形式でシンプルに表現する
 - 「機能ベース」で対象とするシステム全体を表現し、評価解析可能とする
- **1D-CAE の導入ポイント**
 - ニーズの明確化、適切なモデリング手法とツール選択
 - 利用可能なデータ・資産の把握、1D-CAE のトライアル活動
 - モデリング技能のトレーニング・教育

シミュレーションへの第一歩を踏み出し、エンジニアリングの未来に挑戦しませんか？

付録

MathWorks が提供するシステムシミュレーション/1D-CAE 環境



Simulink モデル

ブロック線図

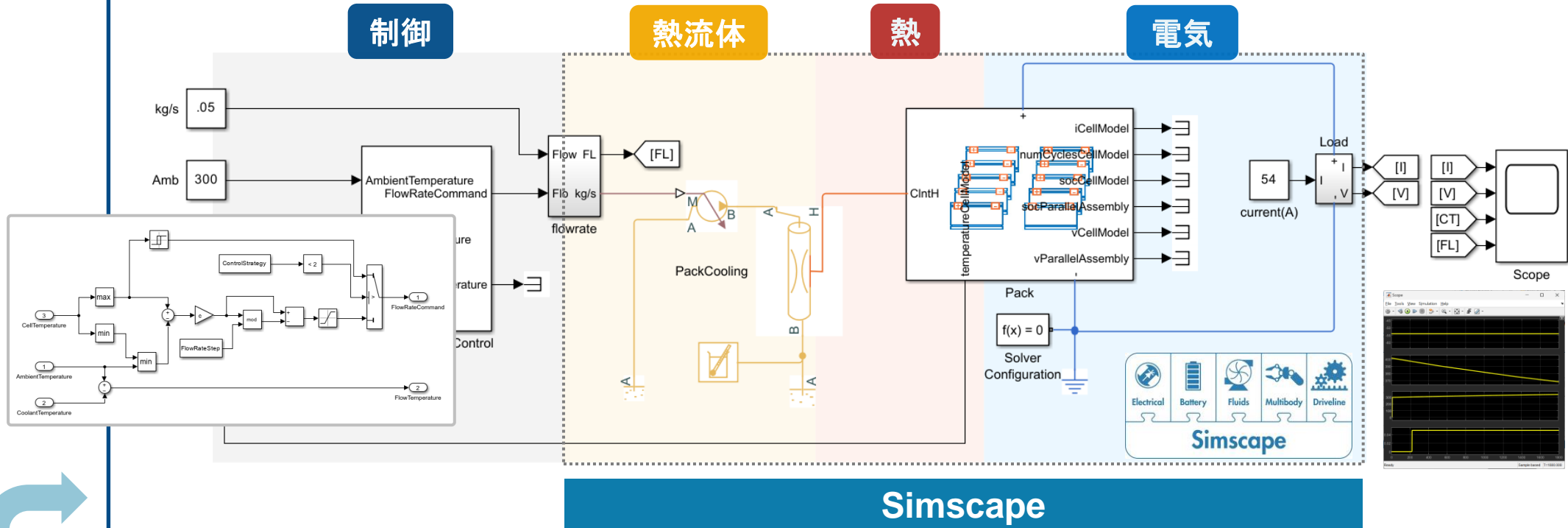
制御

熱流体

熱

電気

物理回路網



自動化・
高速化
テスト

コード生成

データ処理・解析

データ可視化

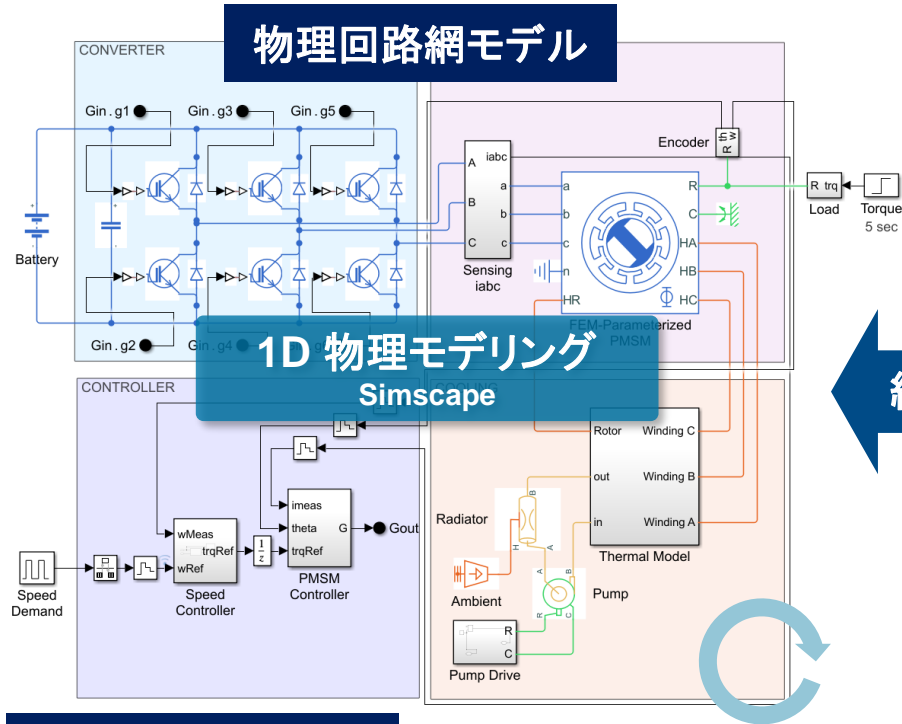
レポート生成

アプリ化・展開

MATLAB

MathWorks が提供する物理システムモデリングソリューション

物理法則型モデリング

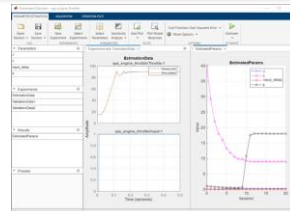


ブロック線図モデル

自動車モデリング
Powertrain Blockset
Vehicle Dynamics Blockset



パラメータ同定
Simulink Design Optimization



低次元化モデリング

NN モデル



深層学習

Deep Learning Toolbox

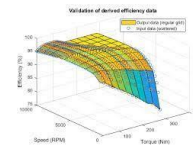
統計モデル

$$y(k) = \frac{B(q)}{A(q)}u(k) + \frac{D(q)}{C(q)}e(k)$$

システム同定

System Identification Toolbox

マップモデル



マップ作成

実験計画 ~ 自動化

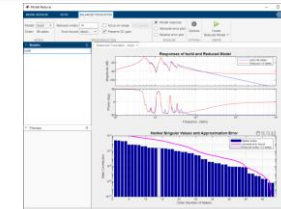
状態空間モデル

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

次元削減

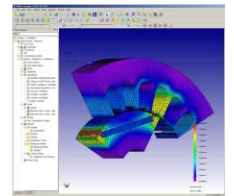
Control System Toolbox



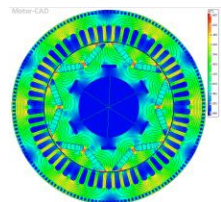
実機



詳細モデル



3D モデル

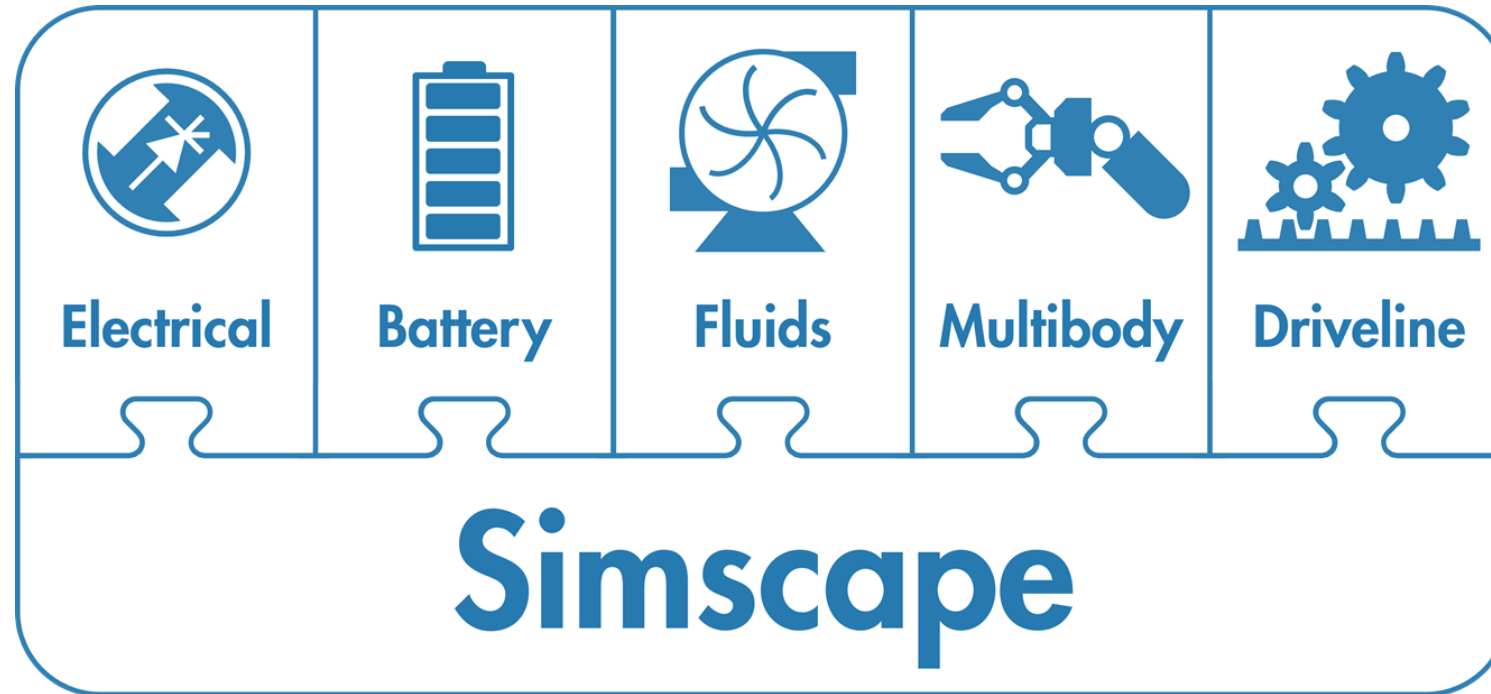


Simscape は物理システムのモデリング・シミュレーション環境

電気 バッテリー 流体 マルチボディ 駆動伝達

専門領域
アドオン

複合領域
基本環境



- MATLAB
- Simulink
- Toolboxes
- Blocksets
- Code Generation
- ...



Simscape 関連情報

製品名	概要	製品情報	ブロックリスト
Simscape	マルチドメイン物理システムのモデル化およびシミュレーション	詳しく見る	詳しく見る
Simscape Electrical	電子、メカトロニクス、および電力システムのモデル化とシミュレーション	詳しく見る	詳しく見る
Simscape Battery	バッテリーおよびエネルギー貯蔵システムの設計とシミュレーション	詳しく見る	詳しく見る
Simscape Fluids	流体システムのモデル化とシミュレーション	詳しく見る	詳しく見る
Simscape Multibody	マルチボディ機械システムのモデル化およびシミュレーション	詳しく見る	詳しく見る
Simscape Driveline	回転機械システムと並進機械システムのモデル化およびシミュレーション	詳しく見る	詳しく見る

電動化ソリューション
を詳しく見てみる

ユーザー事例
を詳しく見てみる

お問い合わせ
はコチラ

自己学習形式
オンラインコース

専門の講師による
トレーニングコース

技術コンサルティング
サービス