

現場で使えるMBD：モーター駆動システムの開発効率化、 風力発電システムへの適用例

MathWorks Japan
アプリケーションエンジニアリング部



はじめに

本セミナーの対象者

- システムエンジニアリング設計者
- モーター制御開発者
- データエンジニア/データサイエンティスト

本セッションでお伝えしたいこと

MATLAB/Simulinkによるモデルベースを活用した
システム全体を見通した開発の進め方と、
モーター制御開発や故障予測モデル作成のためのワークフロー



モーター



コントローラ

電力システムの主要分野

MATLAB/Simulinkを活用することで、様々な解析が可能です

EV&HEV



CEMS



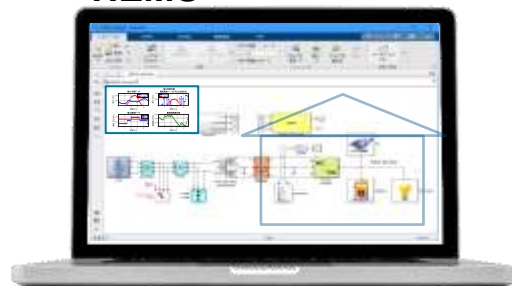
産業機器



充電機器 & バッテリー



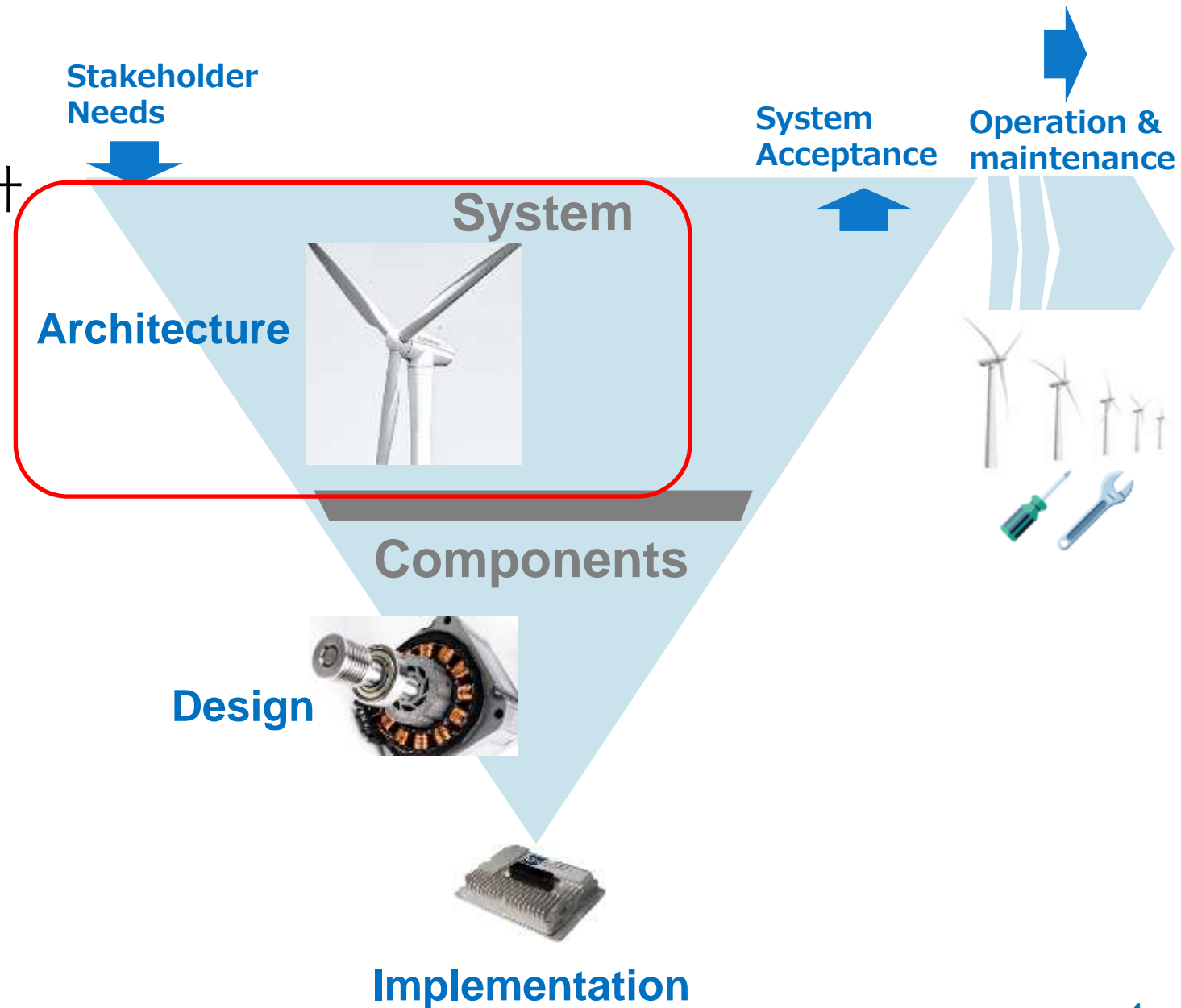
HEMS



“本日の対象”

アジェンダ

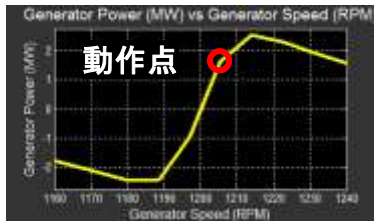
- 風力発電のアーキテクチャ設計
- モーター制御ソフトのコンポーネント設計
- コード生成
- 運用・メンテナンス



風力タービン制御システムの構成と目的

目的：

風況に応じ発電機を定格の動作点近傍で回転させる



手段：

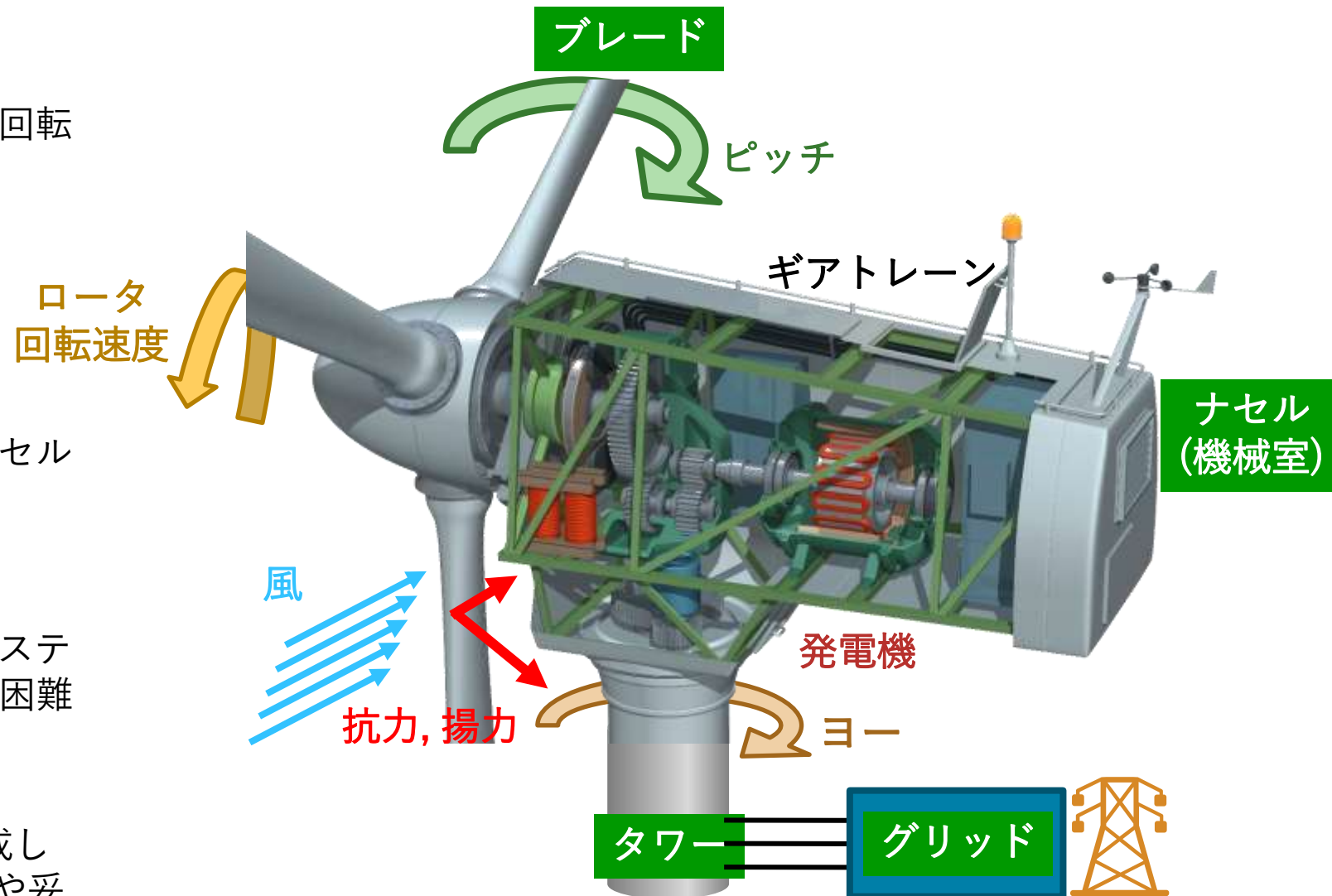
風況に応じて、ブレードのピッチ角やナセルのヨー角を制御する

課題：

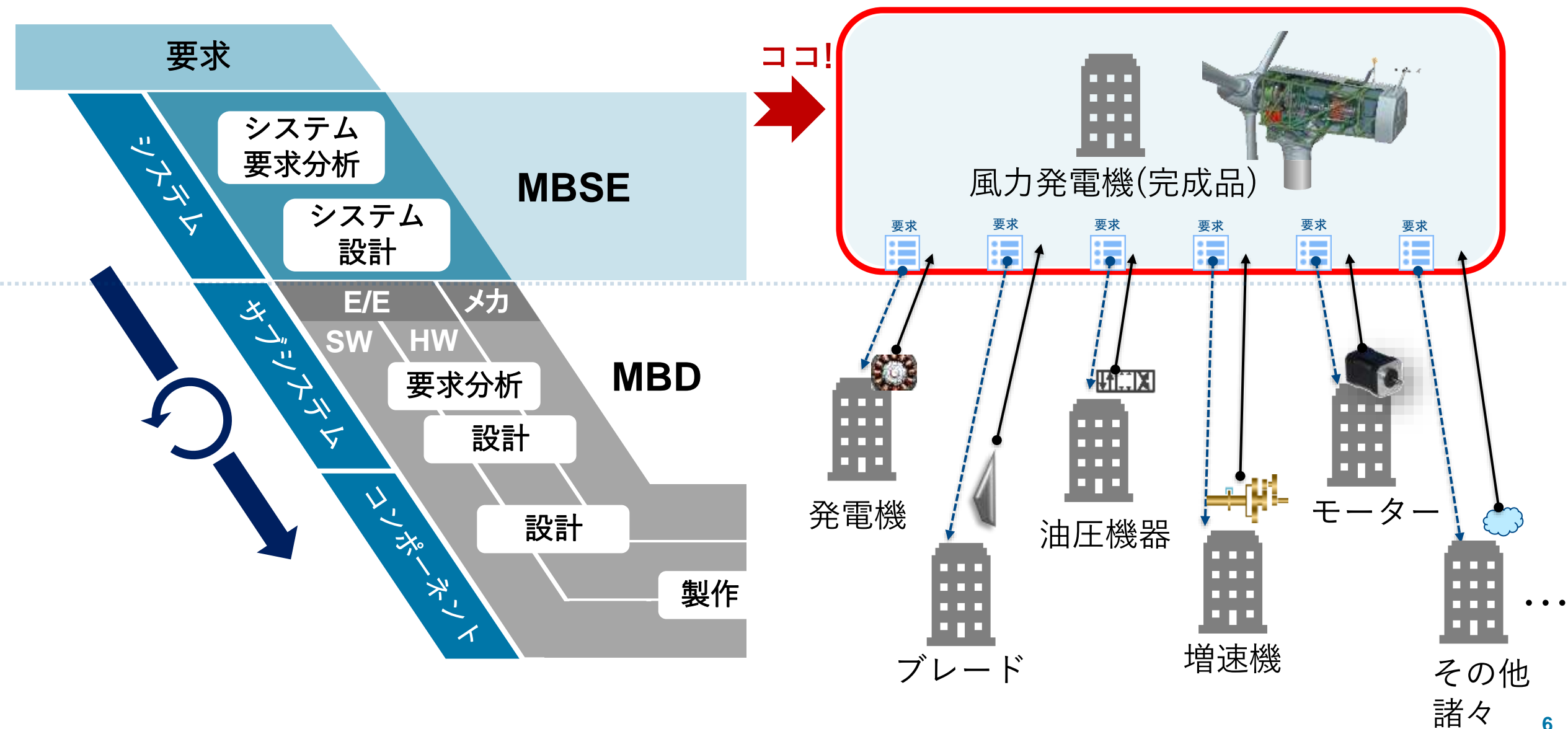
電気/機械/油圧など複数の要素が絡むシステムの設計を効率よく短期間に行うことが困難

解決方法：

風力発電モデルをSimscape製品群で作成し早期(実機作成前)にシステム要件の定義や妥当性を確認

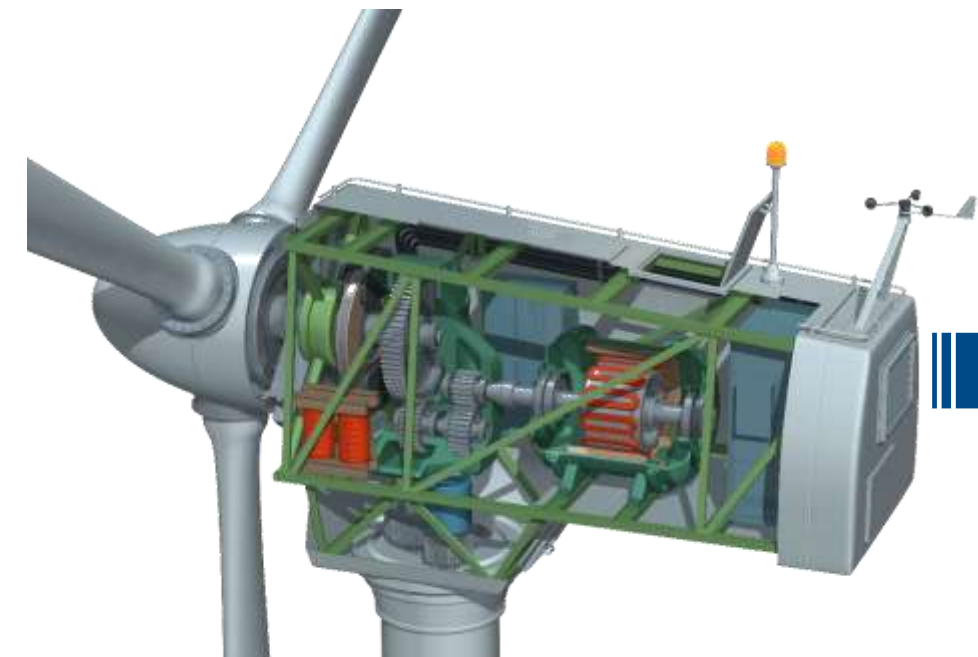


開発フローと部品供給体制





風力タービン モデルを構築し機能要件の分析と制御設計



風(方向, 速度)

ブレードの抗力, 揚力

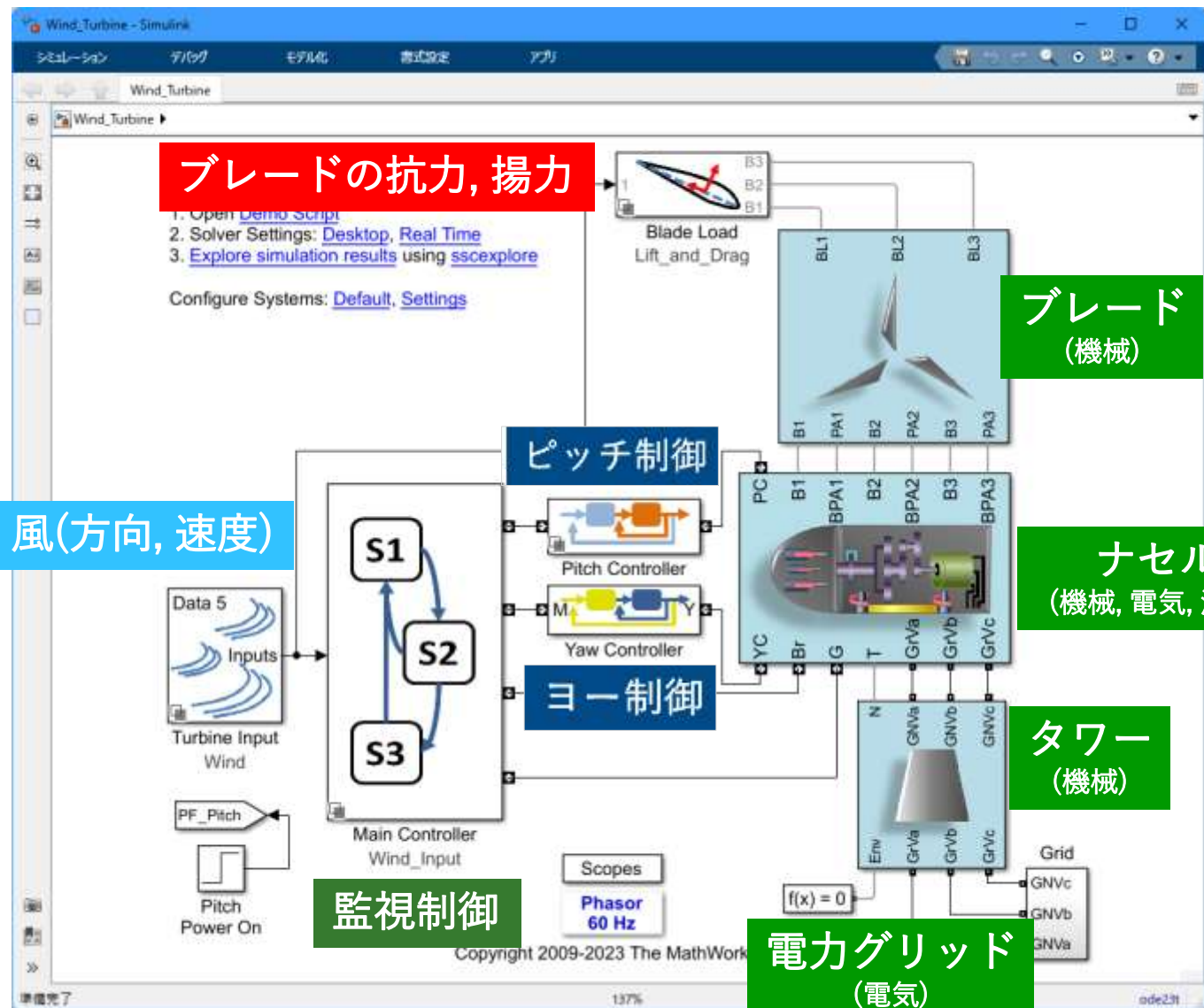
ブレード
(機械)

ナセル
(機械, 電気, 油圧)

タワー
(機械)

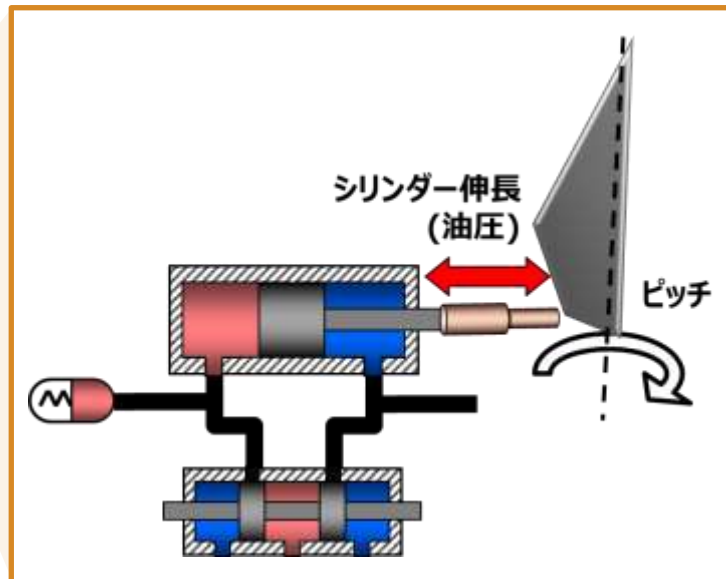
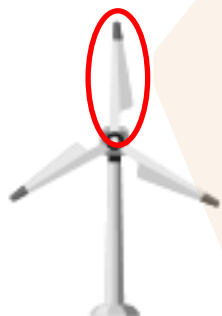
監視制御

電力グリッド
(電気)



ピッチ・アクチュエータの検討

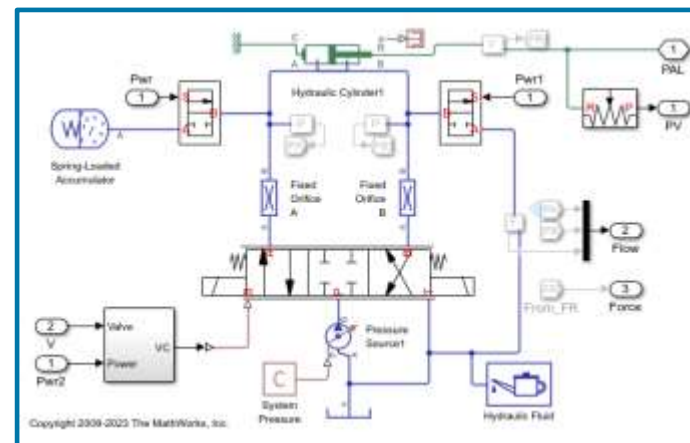
対象：



検討：

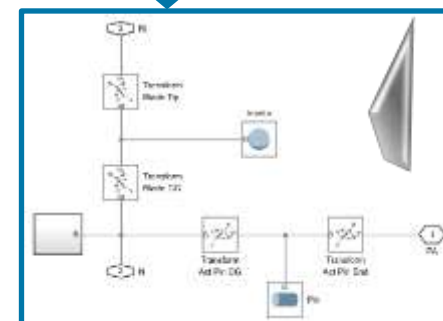
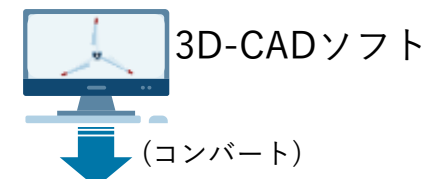
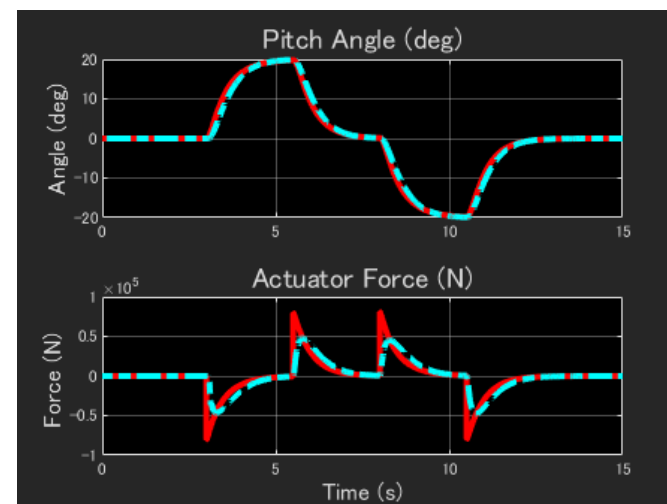
ブレードのピッチ角制御をシリンダーの伸長で行った際の挙動を確認

モデル：



Simscape Fluidsを使用

結果：

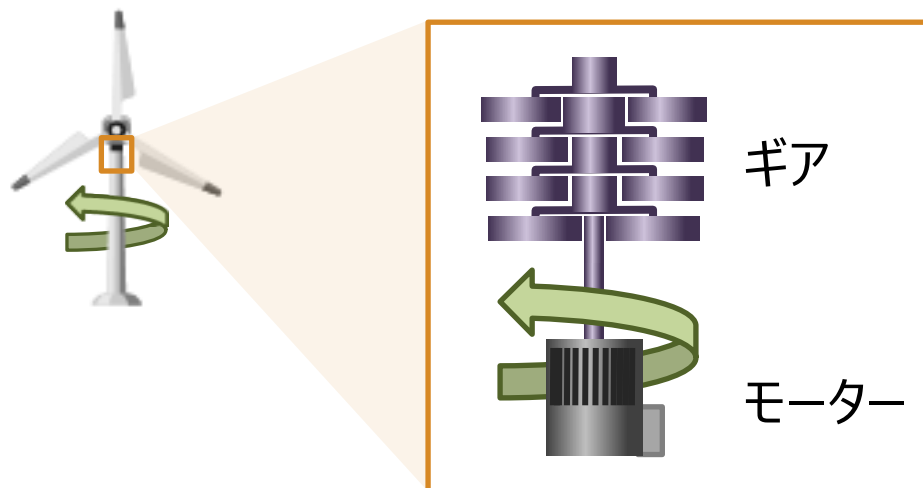


Simscape Multibodyを使用

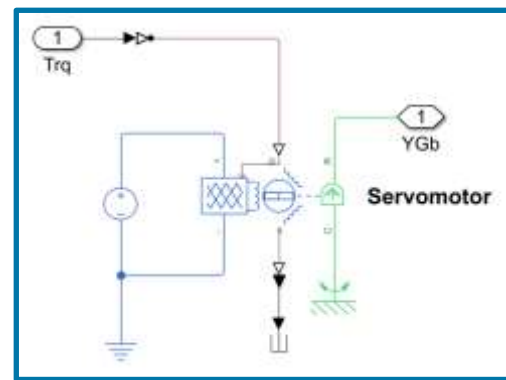


電気式ヨー・アクチュエータの検討

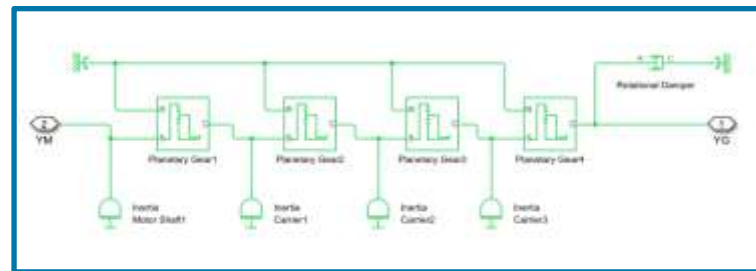
対象:



モデル:



Simscape Electricalを使用

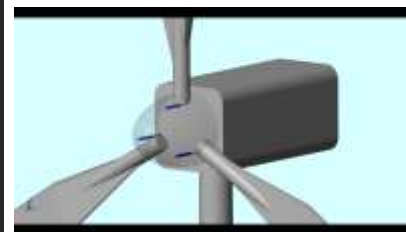
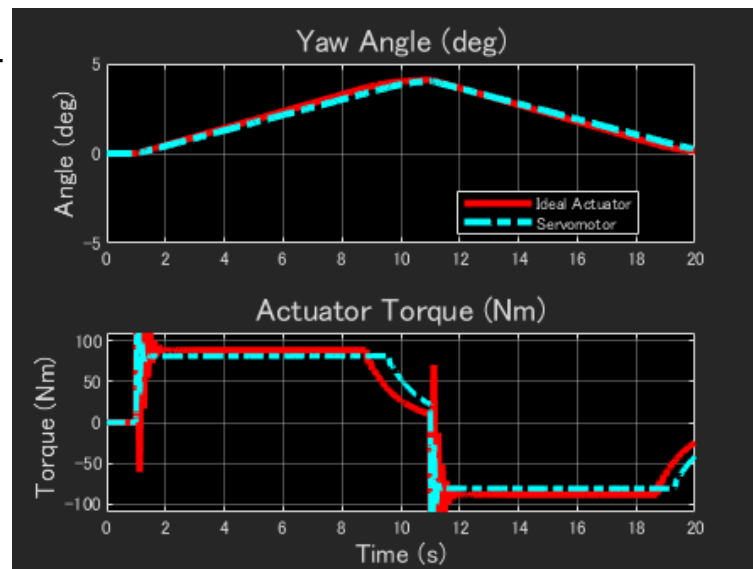


Simscape Drivelineを使用

検討:

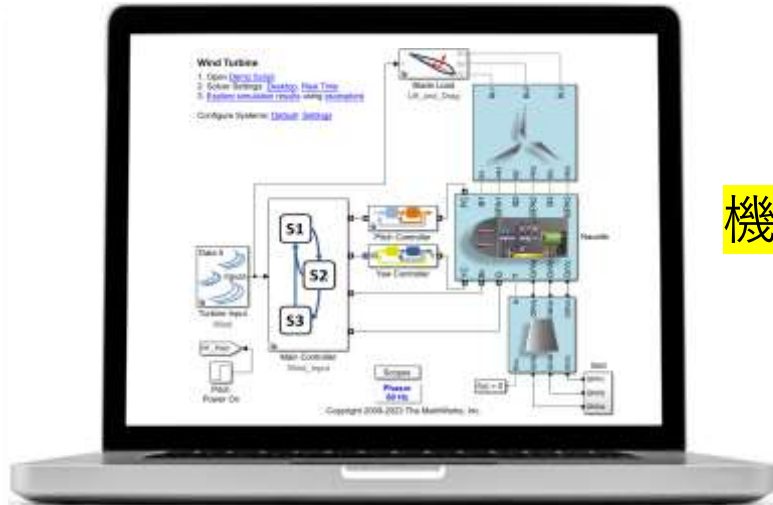
ナセルのヨー角の制御を
サーボモータとギアで行った際の、
システムの挙動を確認

結果:

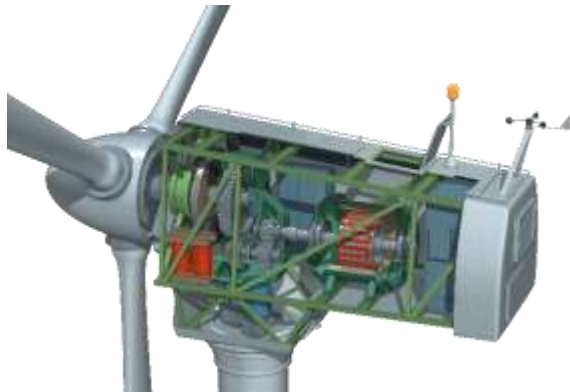


システム構成の検討 & 定義

システムアーキテクチャを検討

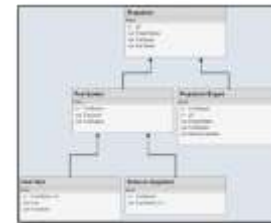
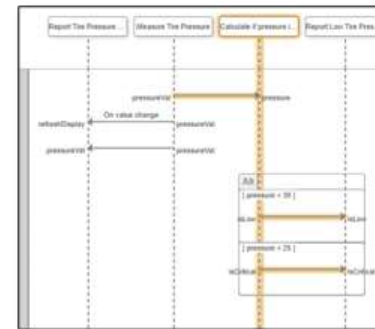


機能



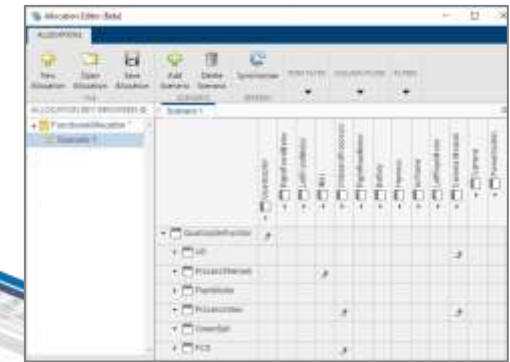
構造

- 機能要素と構成部品との対応関係
- 構成要素間のインターフェースの明確化



機能設計

構造設計

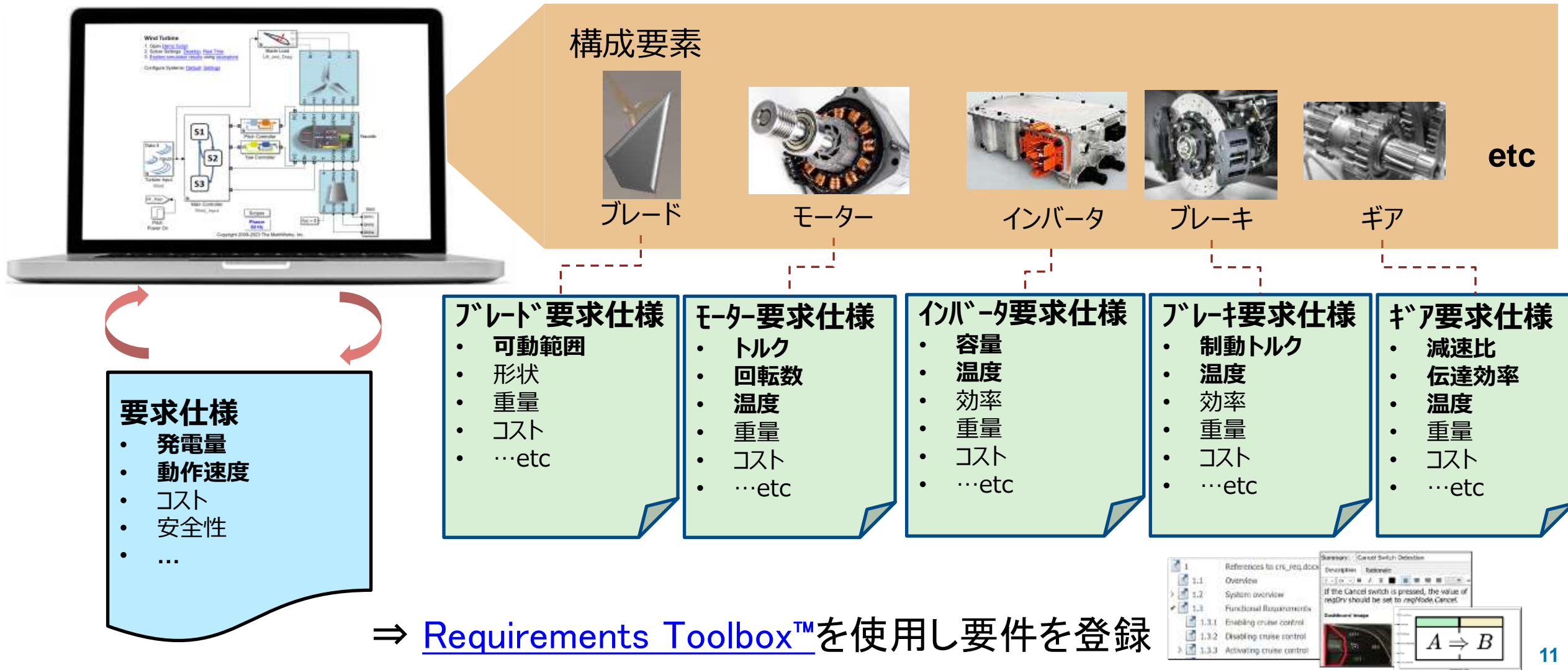


機能割付け

System Composer

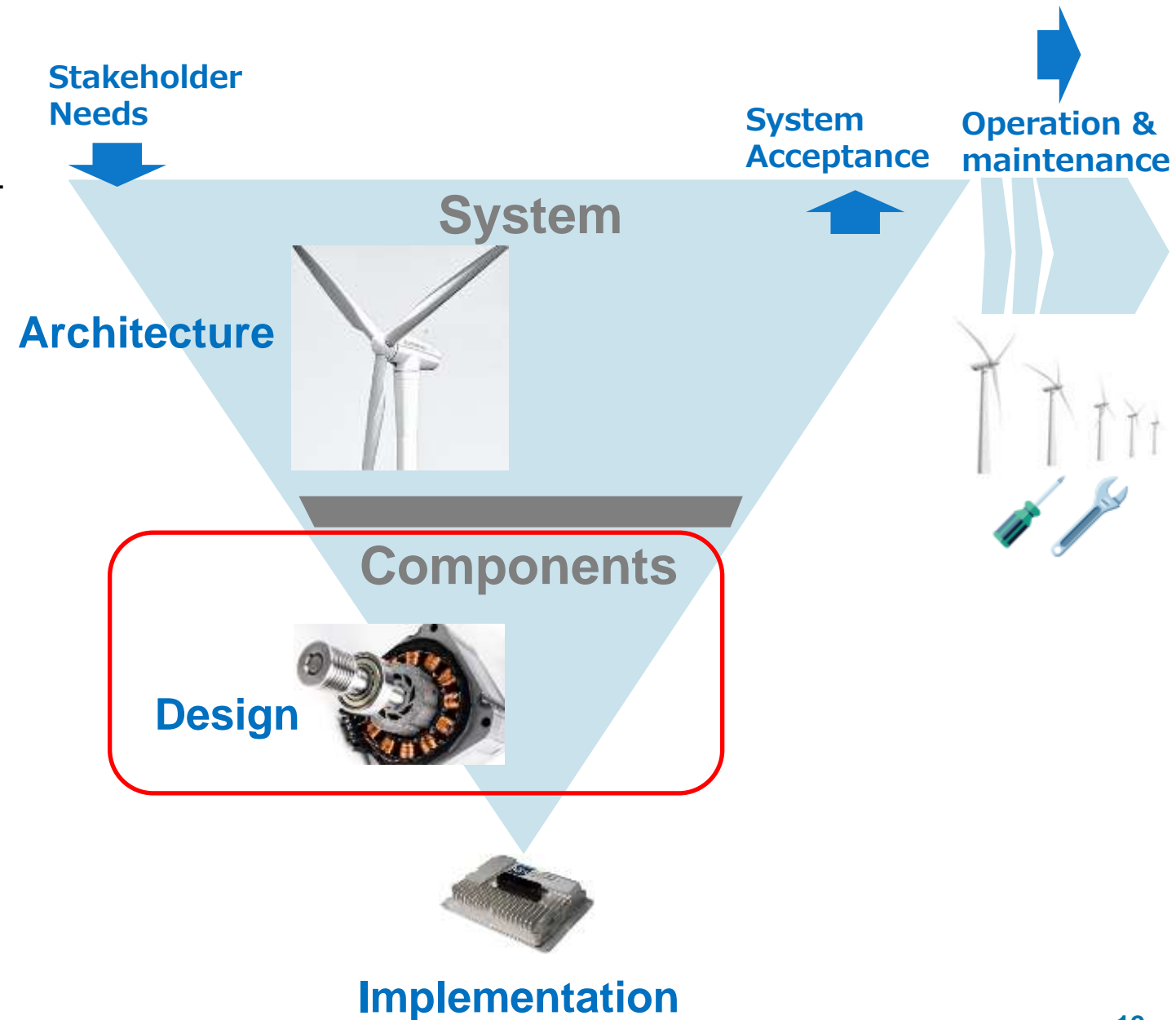
要求仕様の定義

システム要求を満たす形で、コンポーネント毎の要求を定義

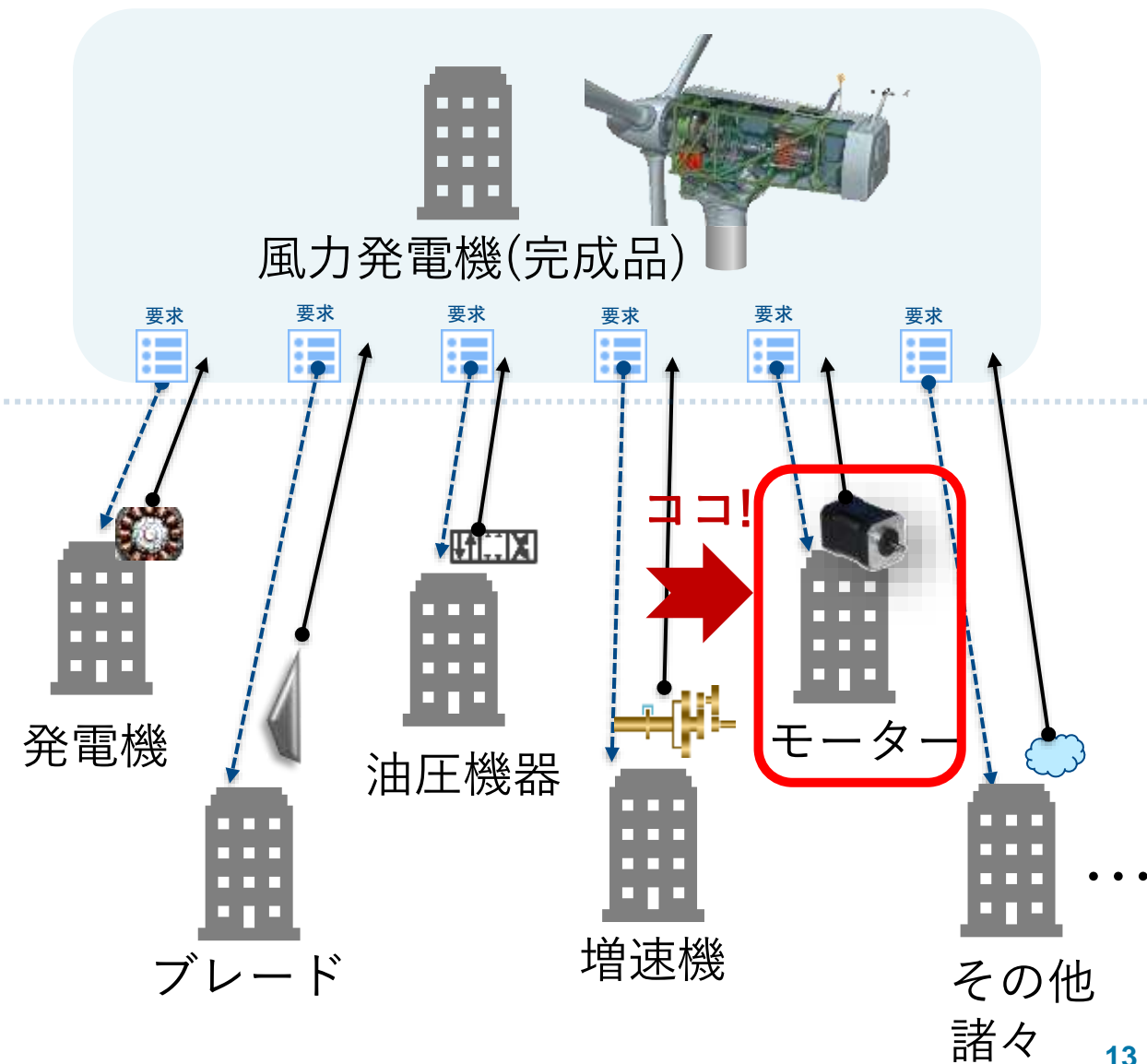
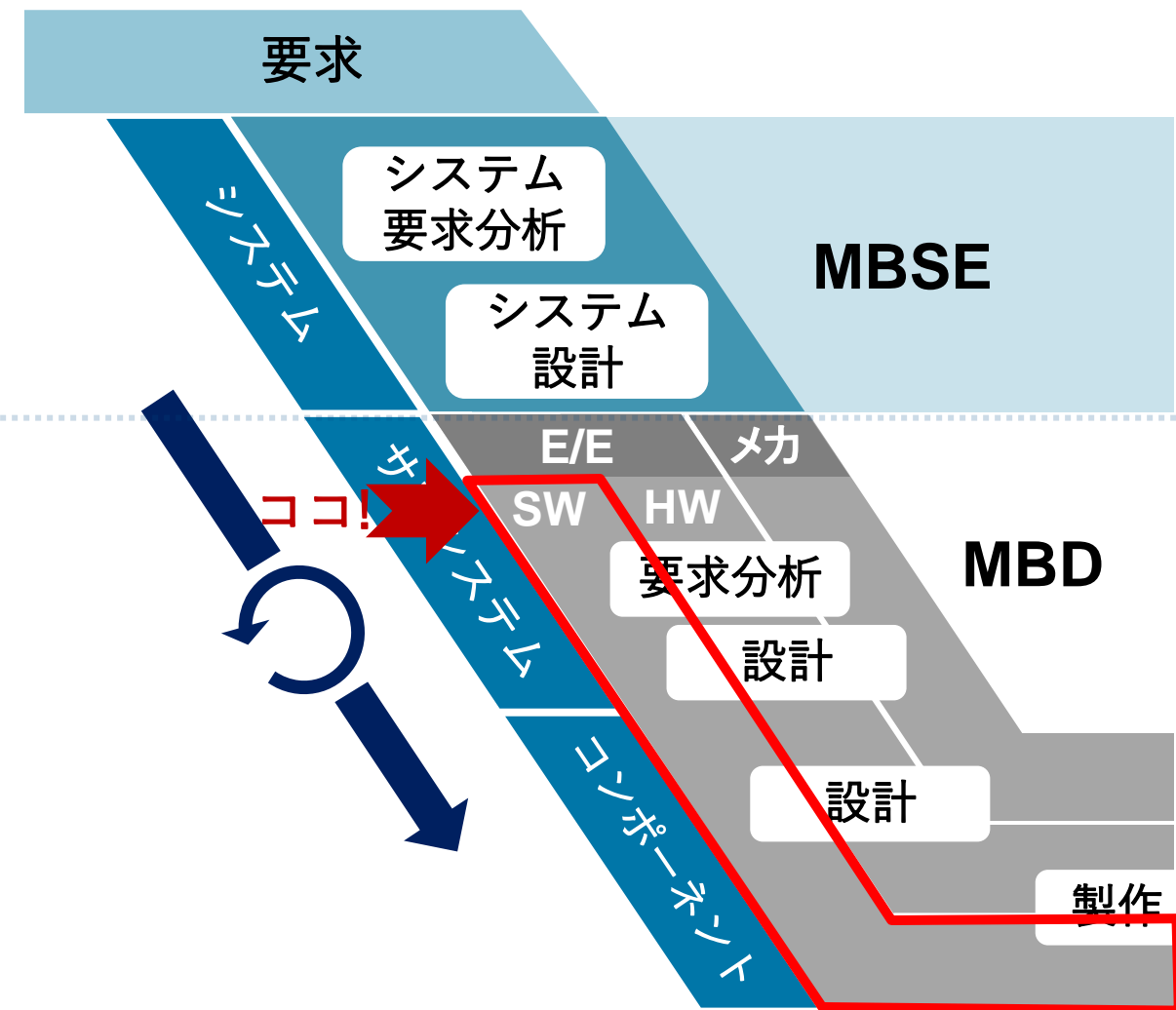


アジェンダ

- 風力発電のアーキテクチャ設計
- ➡ ■ モーター制御ソフトのコンポーネント設計
- コード生成
- 運用・メンテナンス



開発フローと部品供給体制



モーターの制御システム設計 & 性能検討のワークフロー

1

上位要求の
取得・整理



Requirement Toolbox™

モーター要求仕様

- トルク
- 回転数
- 温度
- 重量
- コスト
- ...etc

2

モーター
モデル作成

検討したいモーターを選択し
モーターの諸元を設定する

Simscape Electrical™

PMSM

巻線界磁モータ



FEM

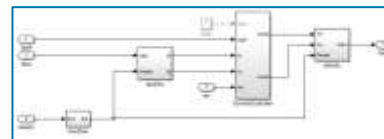
【新規モーター設計時】
電磁解析ソフトの諸元値
を活用

3

制御設計
(アルゴリズム検討)

制御アルゴを構築し
性能確認

Motor Control Blockset™



応答
オーバーシュート
外乱への感度 等

4

上位要求の
更新・修正

要求の妥当性確認/
モーター選定・アドバイス





モーター制御システム



コントローラー

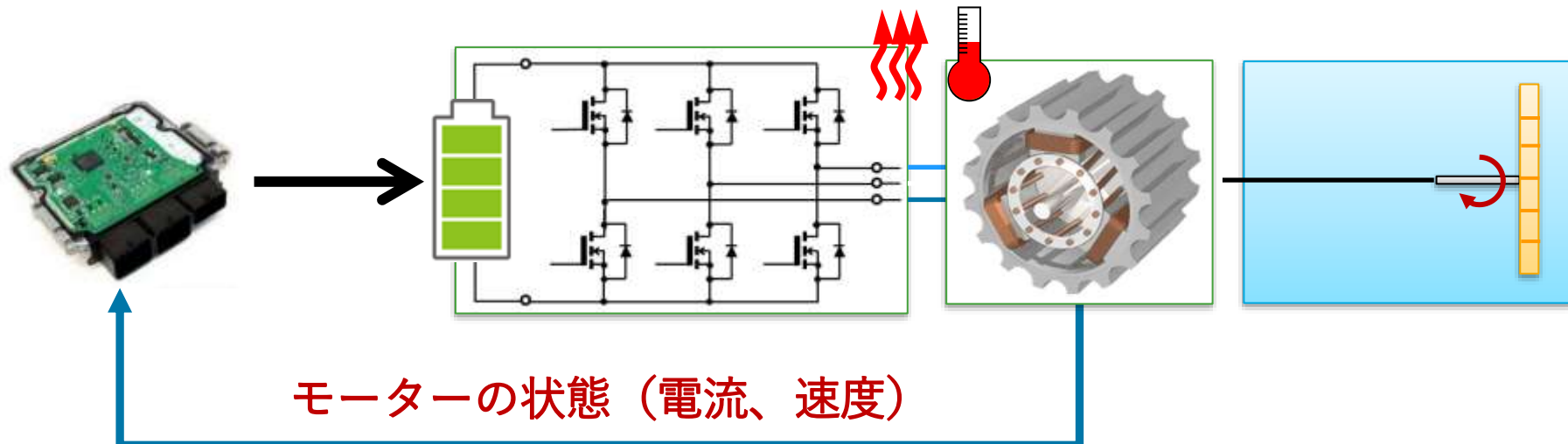
バッテリー

インバーター


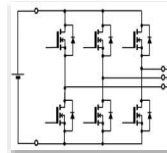
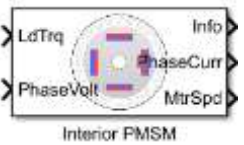


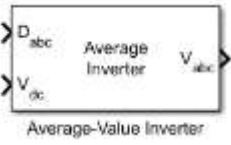
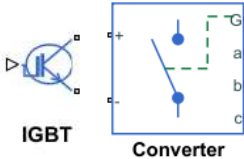
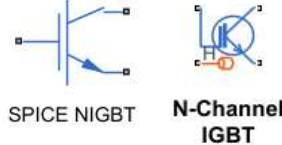
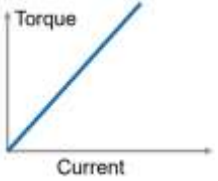
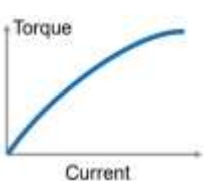
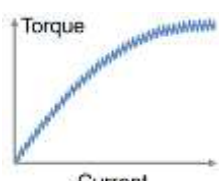
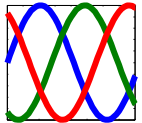
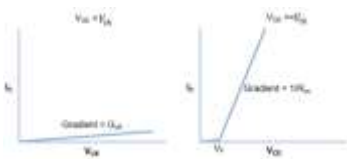
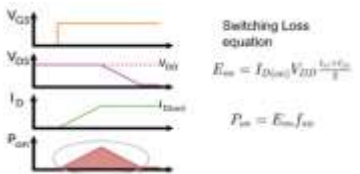




熱

モーター

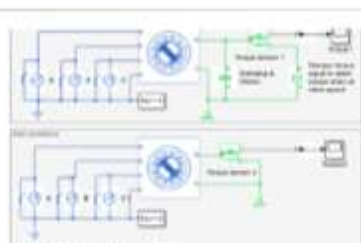
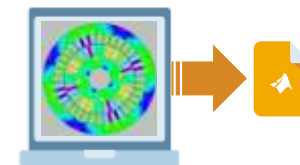
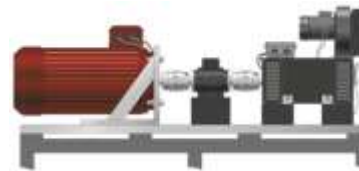
負荷機械



モデルの忠実度とシミュレーション速度のバランス

対象	 モーター (ex: PMSM)			 駆動回路 (インバーター)		
用途	制御アルゴリズム設計	磁気飽和の影響を加味した制御の検証	コギングやリップルに対するPWM設計、オプザバーの検証 等	制御アルゴリズム設計	スイッチングの影響を加味した制御の検証	損失の見積りと熱解析
モデル	 Interior PMSM	 Permanent Magnet Synchronous Motor	 FEM-Parameterized PMSM	 Average-Value Inverter	 IGBT Converter	 SPICE NIGBT N-Channel IGBT
特徴	Lumped Parameters (集中定数) 	Saturation (飽和) 	Saturation + Spatial Harmonics (飽和 + 空間高調波) 	Average-Value (平均値) 	Ideal (理想スイッチ, 区分線系) 	Detailed (詳細スイッチ) 
詳細度	低  高			低  高		
計算速度	早  遅			早  遅		
製品	Motor Control Blockset Simscape Electrical			Motor Control Blockset Simscape Electrical		

プラントモデルの忠実度に合わせてモーターパラメータを準備



PMSM Parameterization from Datasheet

Two test harnesses that add confidence that a PMSM is correctly parameterized from a datasheet. It also calculates motor efficiency at

[Open Model](#)

Estimate Motor Parameters Using Motor Control Blockset Parameter Estimation Tool

Motor Control Blockset™ provides a parameter estimation tool that estimates the motor parameters accurately. Use the estimated motor parameters to simulate the motor model and design the control system. Therefore, the simulation response with the estimated parameters for the motor model is close to the behavior of the motor under test.

The parameter estimation tool determines these motor parameters for a Permanent Magnet Synchronous Motor:

Motor parameters	Units
Phase resistance (R_s)	Ohm
d and q axis inductances (L_d and L_q)	Henry
Back-EMF constant (K_b)	VpA _{LL} /rpm (where VpA _{LL} is the peak voltage line-to-line measurement)
Motor inertia (J)	kg·m ²
Friction constant (F)	N·m·s

The parameter estimation tool accepts the minimum required inputs, runs tests on the target hardware, and displays the estimated parameters.

[Link](#) [Link](#)

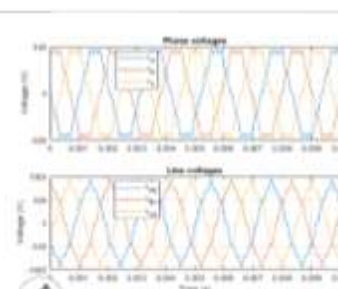
Generate Parameters for Flux-Based PMSM Block

Using MathWorks tools, you can create lookup tables for an interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) controller that characterizes the d -axis and q -axis current as a function of d -axis and q -axis flux.

To generate the flux parameters for the Flux-Based PMSM block, follow these workflow steps. Example script `CreatingIdgTable.m` calls `gridfit` to model the current surface using scattered or semi-scattered flux data.

Workflow	Description
Step 1: Load and Preprocess Data	Load and preprocess this nonlinear motor flux data from dynamometer testing or finite element analysis (FEA): <ul style="list-style-type: none"> d- and q-axis current d- and q-axis flux Electromagnetic motor torque
Step 2: Generate Evenly Spaced Table Data From Scattered Data	Use the <code>gridfit</code> function to generate evenly spaced data. Visualize the flux surface plots.
Step 3: Set Block Parameters	Set workspace variables that you can use for the Flux-Based PM Controller block parameters.

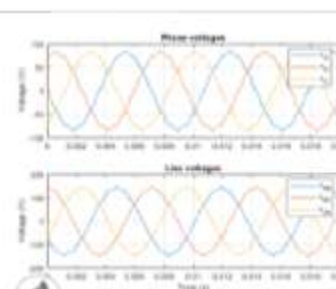
[Link](#)



Import IPMSM Flux Linkage Data from ANSYS Maxwell

Import a motor design from ANSYS® Maxwell® into a Simscape™ simulation.

[Open Model](#)



Import IPMSM Flux Linkage Data from Motor-CAD

Import a motor design from Motor-CAD into a Simscape™ simulation.

[Open Model](#)

ANSYS Maxwell、JMAG、Motor-CAD などのFEAツールを活用

[Link](#) [Link](#) [Link](#)

データシートを活用

[Link](#)

実機を動かして計測したテストデータを活用

ダイナモテストデータを活用

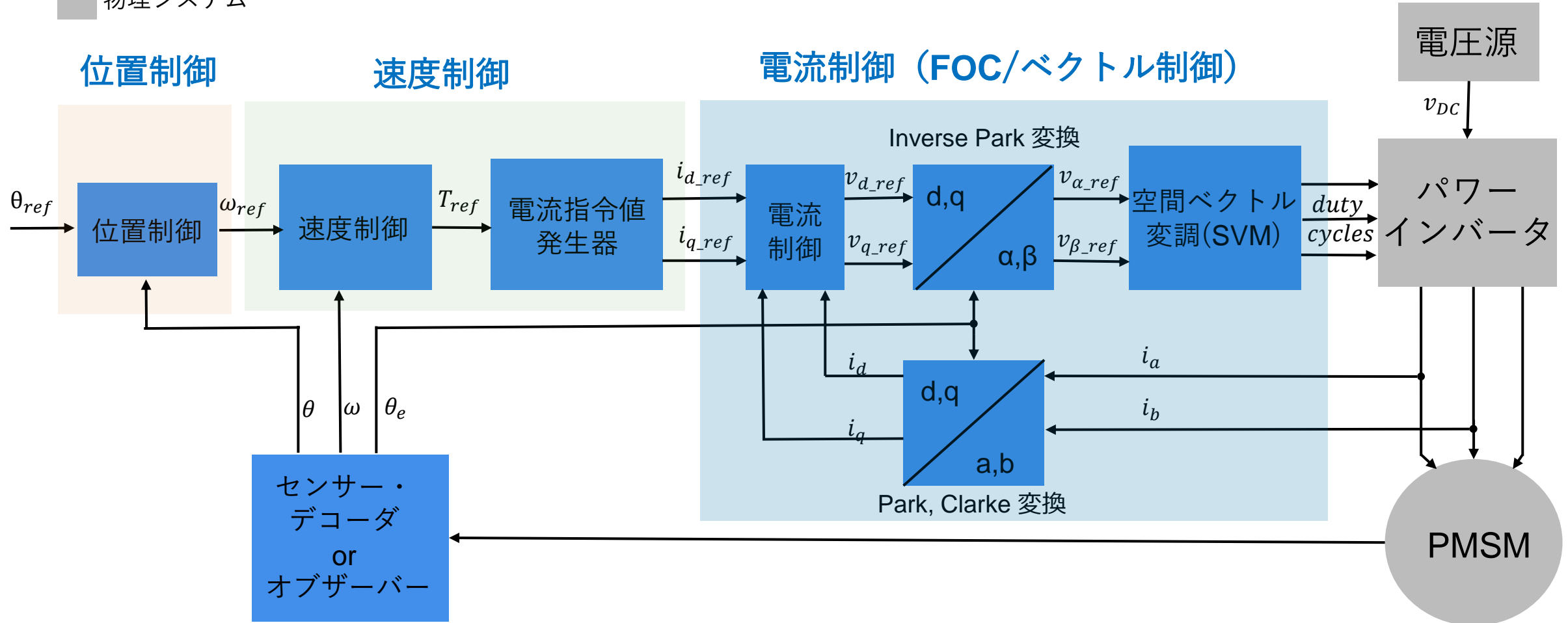
Lumped Parameters
(集中定数)

Saturation
(飽和)

Saturation + Spatial Harmonics
(飽和 + 空間高調波)

モーター・位置制御 ブロック図

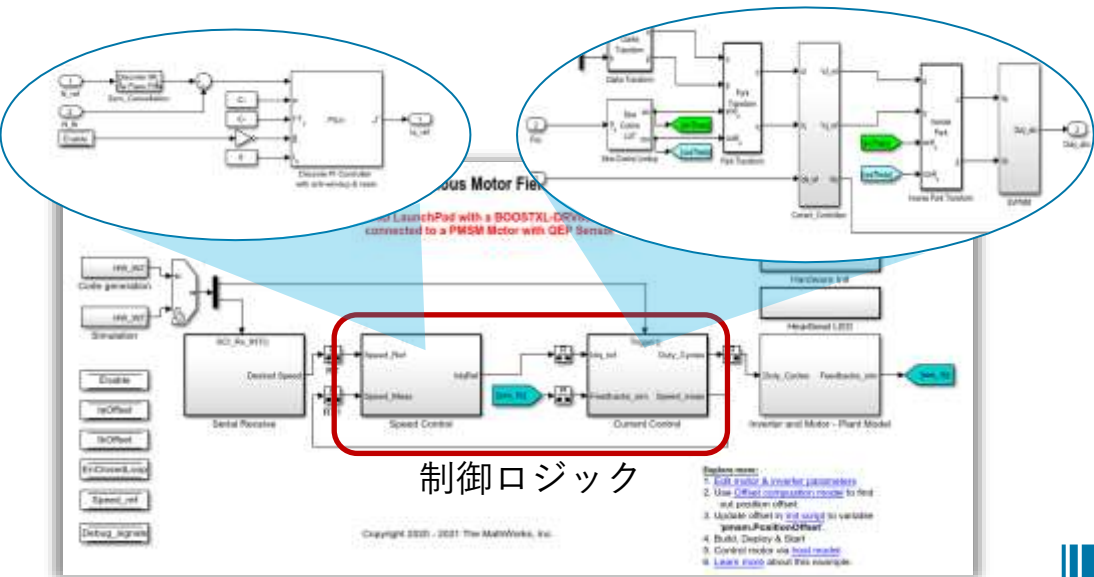
■ 制御アルゴリズム
■ 物理システム



SRM 速度制御



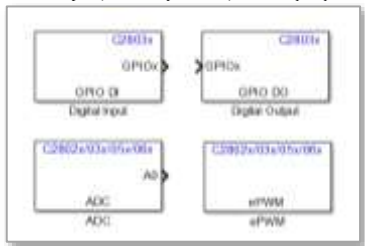
Tips: 制御ロジックのマイコン実装 & モーターによる動作



Motor Control Blocksetのデモ ([Link](#))

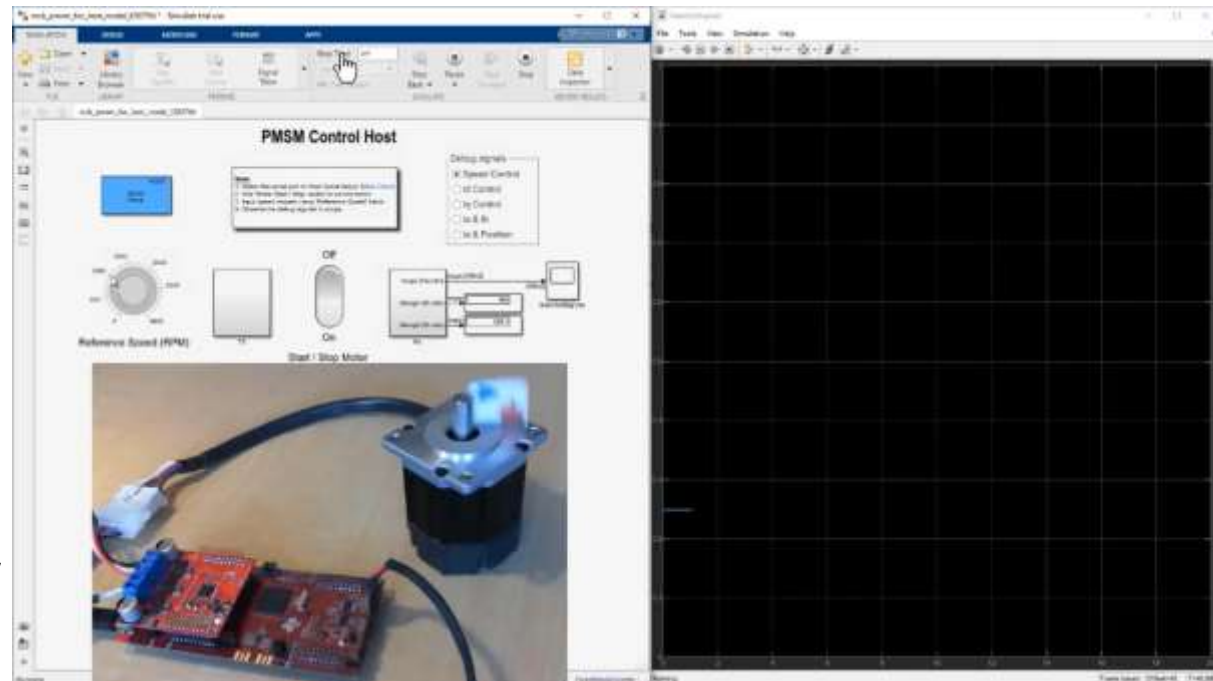


ペリフェラルブロック



[TI C2000 Micro controller toolbox](#)

Embedded Coder



TI社製
マイコン搭載開発ボード

モーター制御システム設計 & 性能検討のワークフロー

1

上位要求の
取得・整理



Requirement Toolbox™

モーター要求仕様

- トルク
- 回転数
- 温度
- 重量
- コスト
- …etc

2

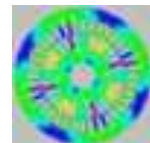
モーター
モデル作成

検討したいモーターを選択し
モーターの諸元を設定する

Simscape Electrical™

PMSM

巻線界磁モータ



JMAG-RT

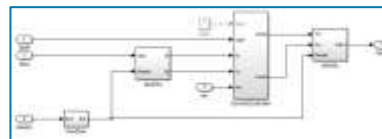
【新規モーター設計時】
電磁解析ソフトの諸元値
を活用

3

制御設計
(アルゴ検討)

制御アルゴを構築し
性能確認

Motor Control Blockset™



応答
オーバーシュート
外乱への感度 等

4

上位要求の
更新・修正

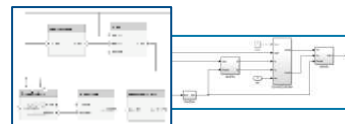
要求の妥当性確認/
モーター選定・アドバイス



5

ソフトアーキ設計
/ 制御設計

ソフトウェアの
基本設計・詳細設計



System Composer™/Simulink

6

検証
/ コード生成

モデル/コード検証
自動コード生成

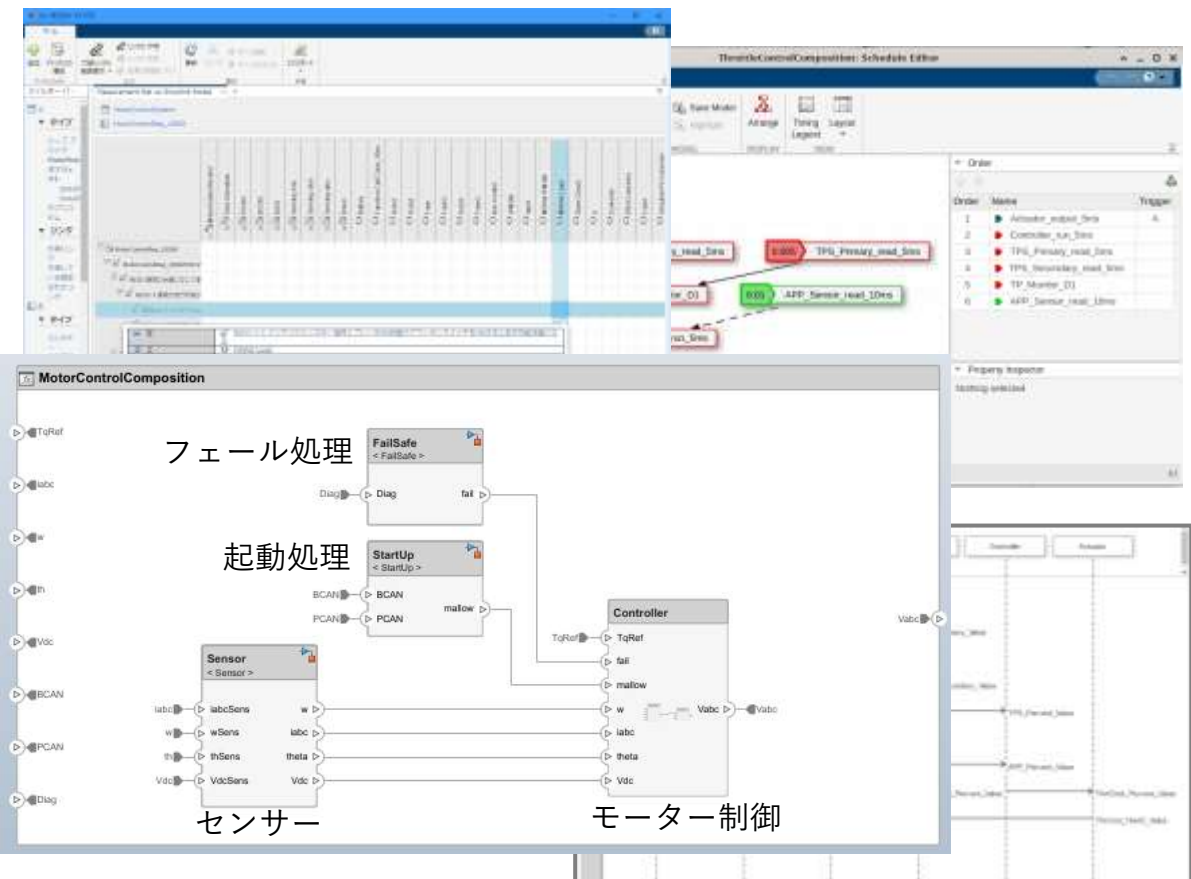


V&V製品 / Embedded Coder™

モーター制御のアーキテクチャ設計／制御設計

- ソフトウェア・アーキテクチャ・モデルの作成
- 要件の割り当て/派生した要件
- トレーサビリティの確認
- 実行タイミング

System Composer™



制御モデル

フェール処理

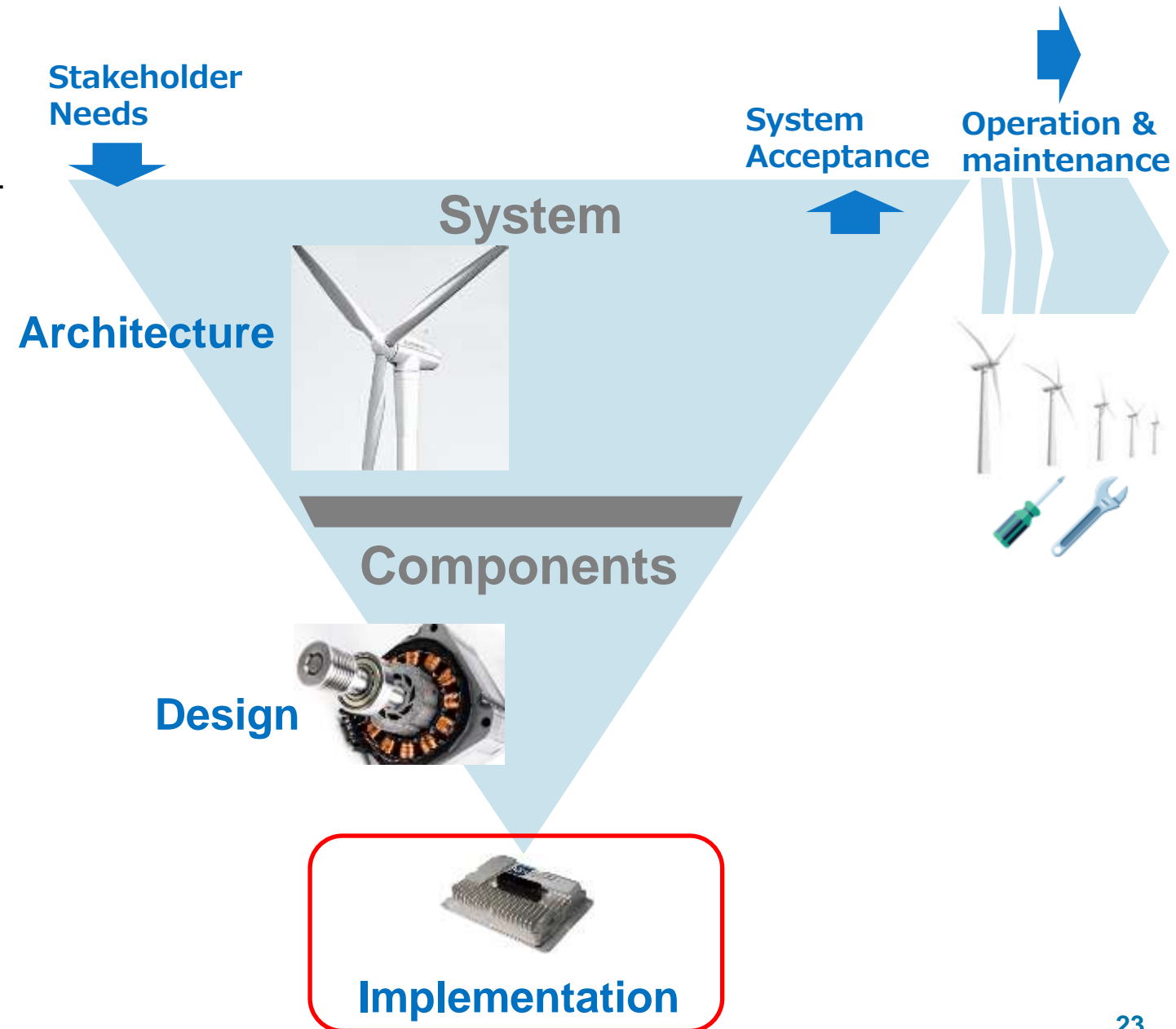
起動処理

センサー

モーター制御

アジェンダ

- 風力発電のアーキテクチャ設計
- モーター制御ソフトのコンポーネント設計
- コード生成
- 運用・メンテナンス



制御モデルの量産Cコード生成 フロー

上流開発モデル

実装モデル作成
(リファクタリング/データ型・
変数・定数設計/コンフィグ設計)

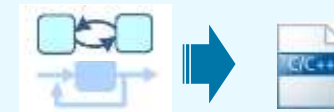
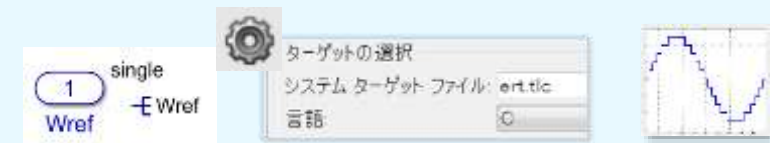
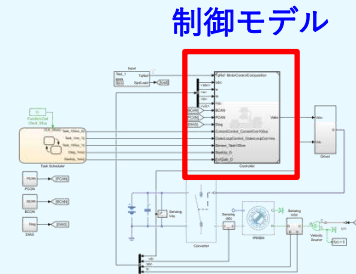
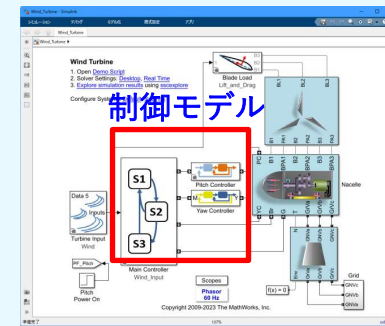
モデル検証/ガイドライン
チェック

コード生成

コード検証

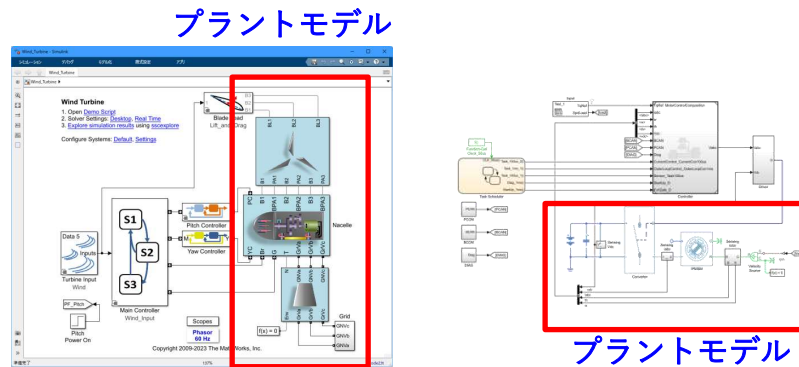


- ロジック開発・設計
- コード生成可能、かつ効率的なコードを生成するようにモデルを作成・修正
- 量子化/固定小数点化の影響を確認
- 関数I/F・コード書式の設計
- 期待値との比較/カバレッジ測定/設計エラーチェック 等
- モデル生成コードの利用は無料
- 静的解析/コーディングエラーチェック



HIL: Hardware-In-the-Loop

リアルタイム・シミュレータを活用したコントローラーの機能検証



自動コード生成



コントローラー



リアルタイム・シミュレータ



ホストPC

※画像はSpeedgoatハードウェア

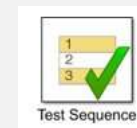
✓ 任意の試験条件を素早く再現

✓ 実機では危険な試験を安全に実施

✓ 24時間自動テスト可能

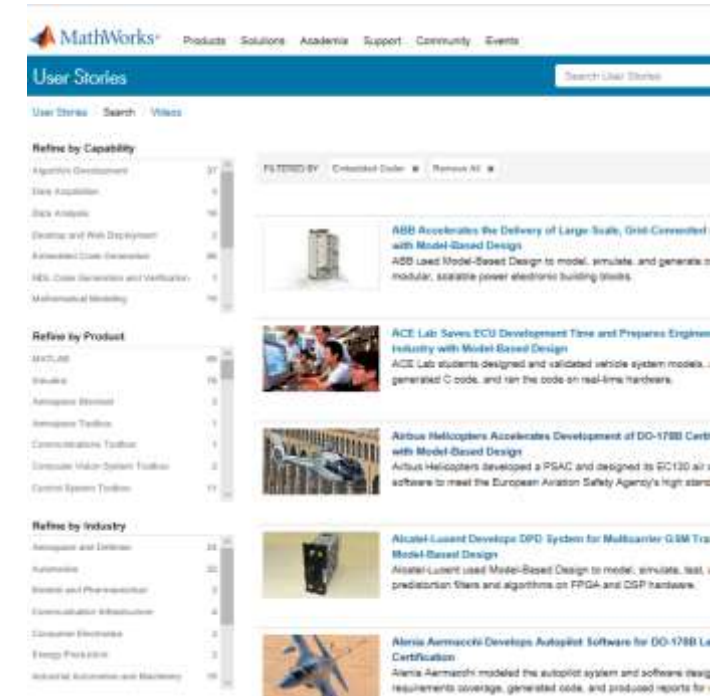


Simulink Test™ でテストの自動化



多くのお客様がモデルベースデザインで高い ROI を達成

ABB	生産性が10倍向上
Airbus	ソフトウェアのテスト時間を2/3に短縮
ATB	2倍のスピードでプロジェクトを完了
B&R	KPI が30%以上改善
BAE	ハンドコーディングの1.5~2倍の効率化
Baker Hughes	新規プロジェクトのリソースを50%削減
Chery	年間200万ドル近くを削減
CNH	開発期間50%削減、生成コードは即座に運用可能
Continental	6ヶ月の労力を削減、検証時間を50%削減
Danfoss	開発期間を最大15%短縮
Embraer	開発期間を6ヶ月以上短縮
Honeywell	生産性が5倍向上
IVECO	開発期間40%短縮
KARI	開発期間半減、設計の繰り返し最小化
KOSTAL	認証にかかる時間を30%短縮
Lear	開発期間40%短縮、保証問題報告0件
Lockheed Martin	開発効率2倍、設計更新は1日で



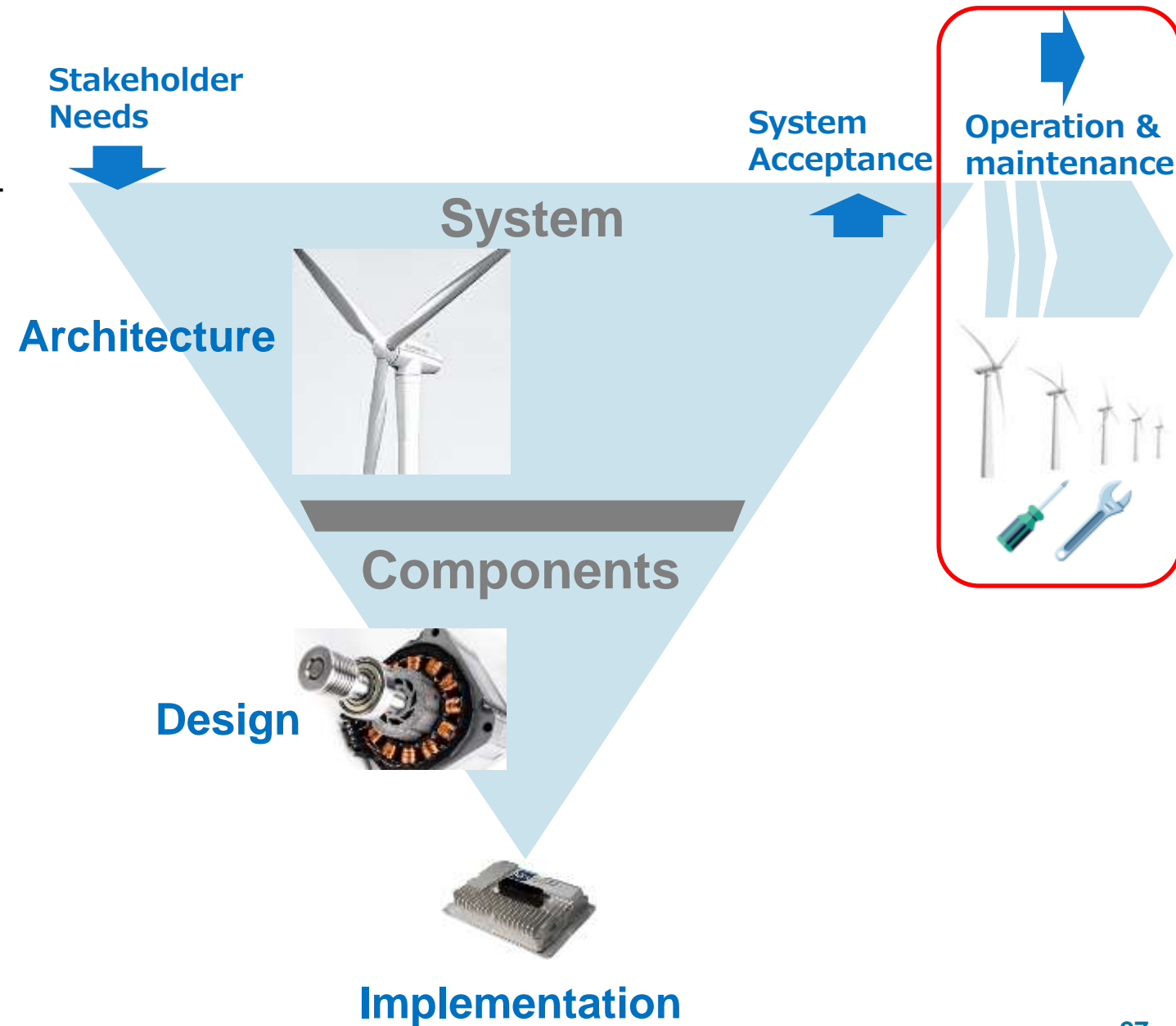
詳細はユーザー事例 Web をご覧ください

https://www.mathworks.com/company/user_stories.html

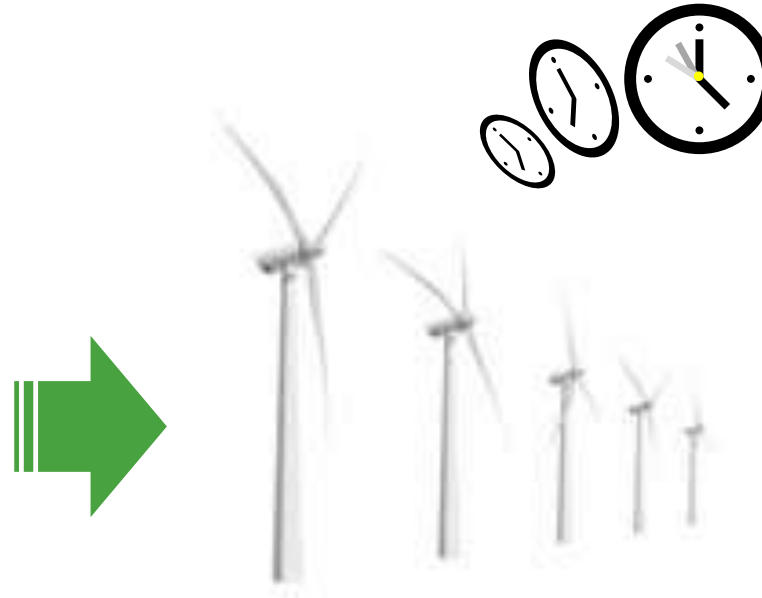
**40~50% の
コスト削減を実現**

アジェンダ

- 風力発電のアーキテクチャ設計
- モーター制御ソフトのコンポーネント設計
- コード生成
- ➡ ■ 運用・メンテナンス



運用後の設備メンテナンス



- ・機械の状態は？異音はしないか？
- ・効率よく稼動しているか？
- ・ボルトは緩んでいないか？
- ・安全装置は動作するか？ etc



事故が起こることによって失うモノ

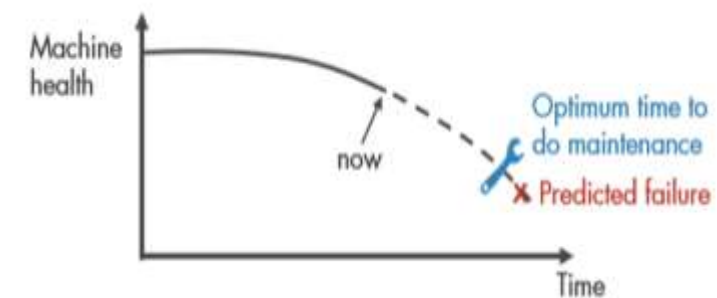
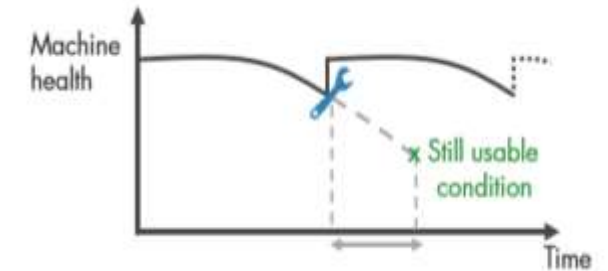
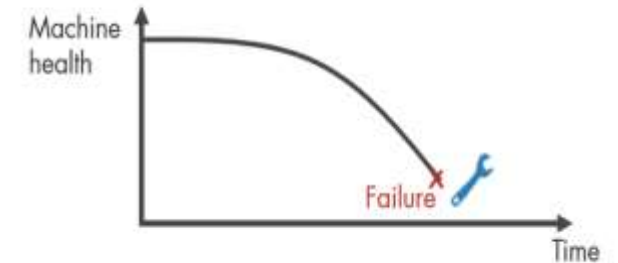
- ・金銭的な損失
- ・企業の信用の失墜

故障を
予知したい



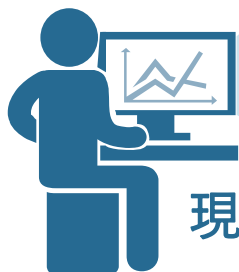
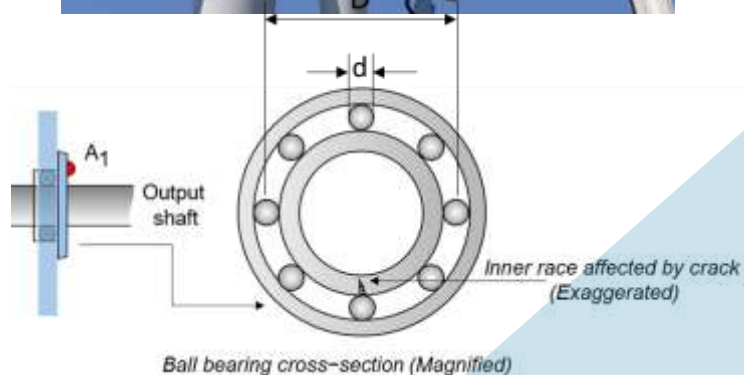
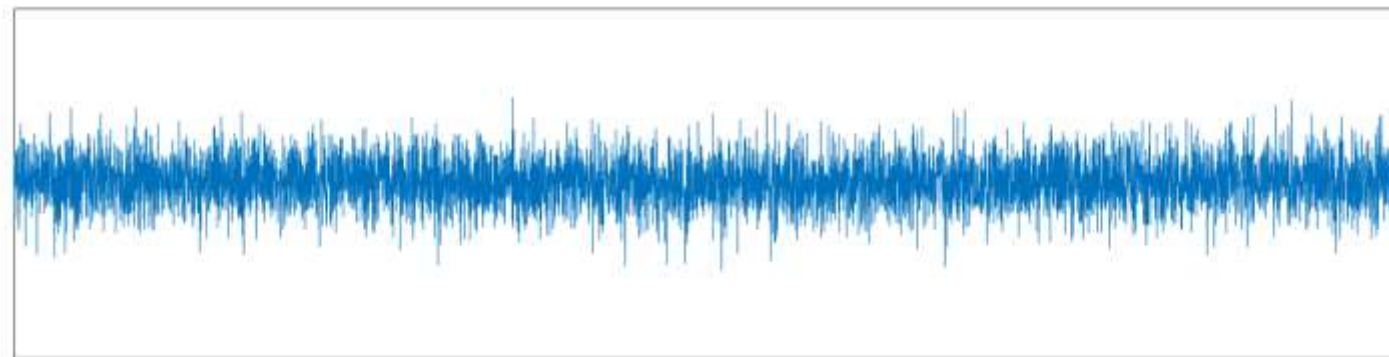
メンテナンスの種類

- **Reactive** – 問題が起こった時に（事後保全）
 - 例：車のバッテリーに問題が発生した時に交換
 - 欠点：予期しない故障には危険が伴い、高コスト
- **Preventive** – 一定期間経過した時に（予防保全）
 - 例：走行距離3,000 km または 3 ヶ月毎のオイル交換
 - 欠点：不必要なメンテナンス。故障をすべて防げるわけではない
- **Predictive** – 問題が発生すると予測される時に（予知保全）
 - 例：バッテリー・燃料ポンプやセルモーターの問題を事前に予測
 - 欠点：正確な予測は困難



予知保全：風力タービンへの応用

シャフトに発生する振動データ（加速度）

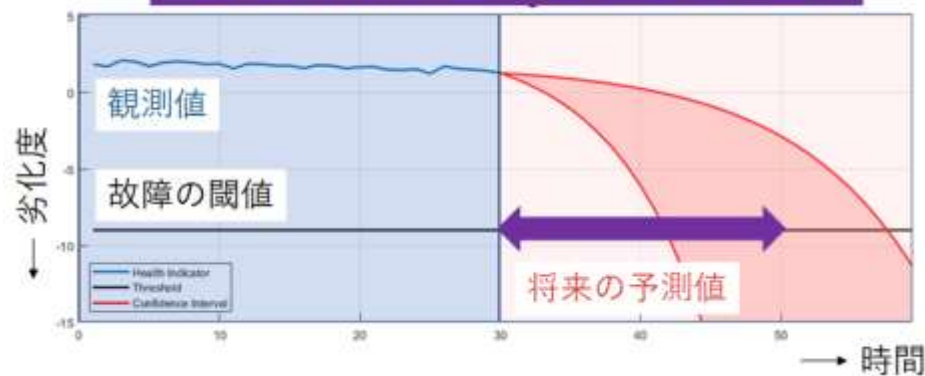


現場エンジニア

正常に機能する
残り時間は？

寿命予測

残寿命予測：Remaining Useful Life (RUL)

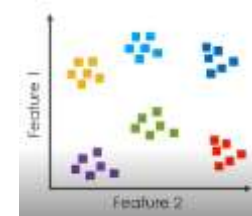
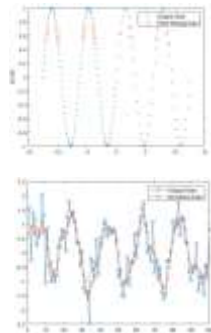
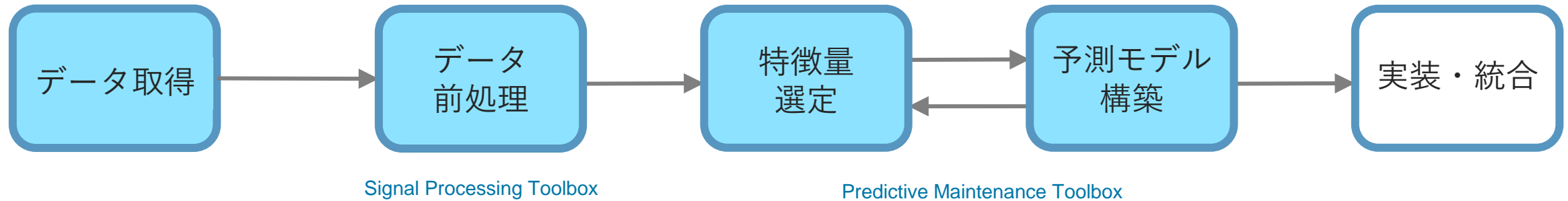


メンテナンスが必要
ベアリングが故障

15時間以内に機械が停止

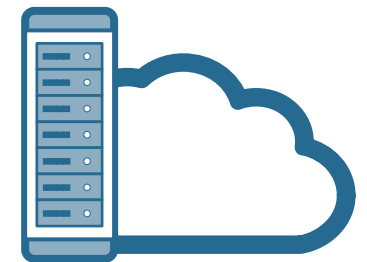
寿命

予知保全システム構築ワークフロー



指数劣化モデル

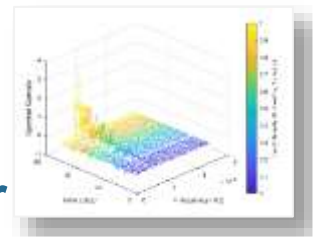
$$h(t) = \phi + \theta \exp\left(\beta t + \epsilon - \frac{\sigma^2}{2}\right)$$



IT Systems



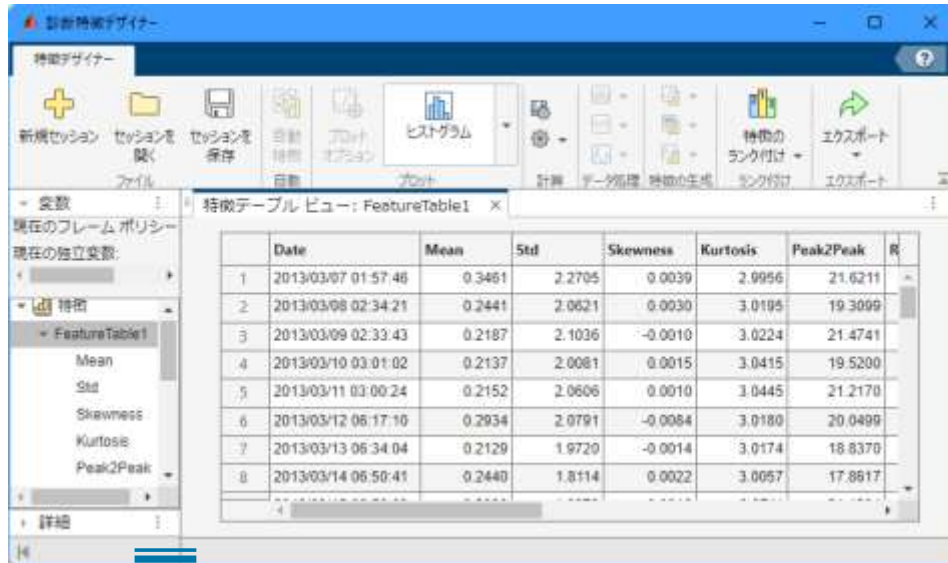
Data Engineer



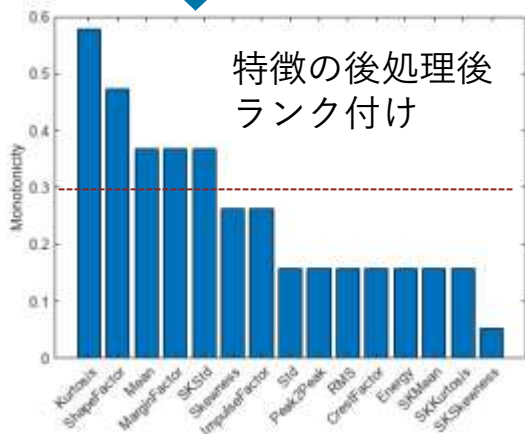
Data Scientist

風力タービンの故障予測アルゴリズム開発

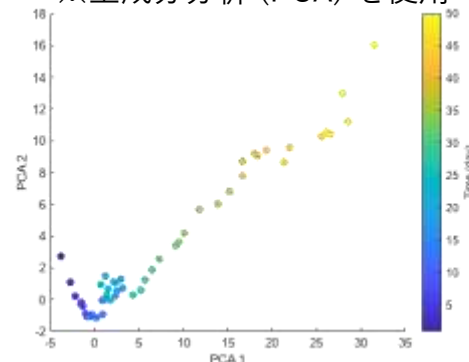
特徴抽出



特徴の後処理後
ランク付け



次元削減と特徴の融合
※主成分分析 (PCA) を使用



予測モデル作成

% 指数劣化モデルの作成

```
mdl = exponentialDegradationModel;
```

$$h(t) = \phi + \theta \exp\left(\beta t + \epsilon - \frac{\sigma^2}{2}\right)$$

```
for currentDay = 1:totalDay
```

```
% 事後確立分布の更新
```

```
update(mdl, [currentDay healthIndicator(currentDay)])
```

```
% RUL(Remaining Useful Life)の予測
```

```
[estRUL, CIRUL, pdfRUL] = predictRUL(mdl, ...  
    [currentDay healthIndicator(currentDay)], threshold);
```

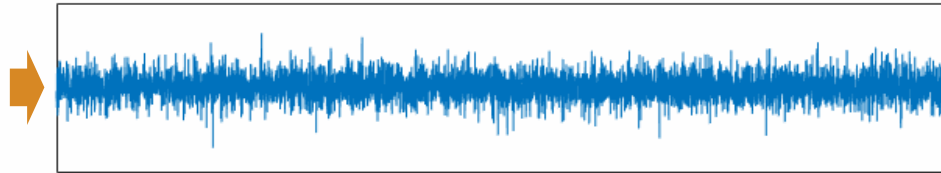
(省略)

```
end
```

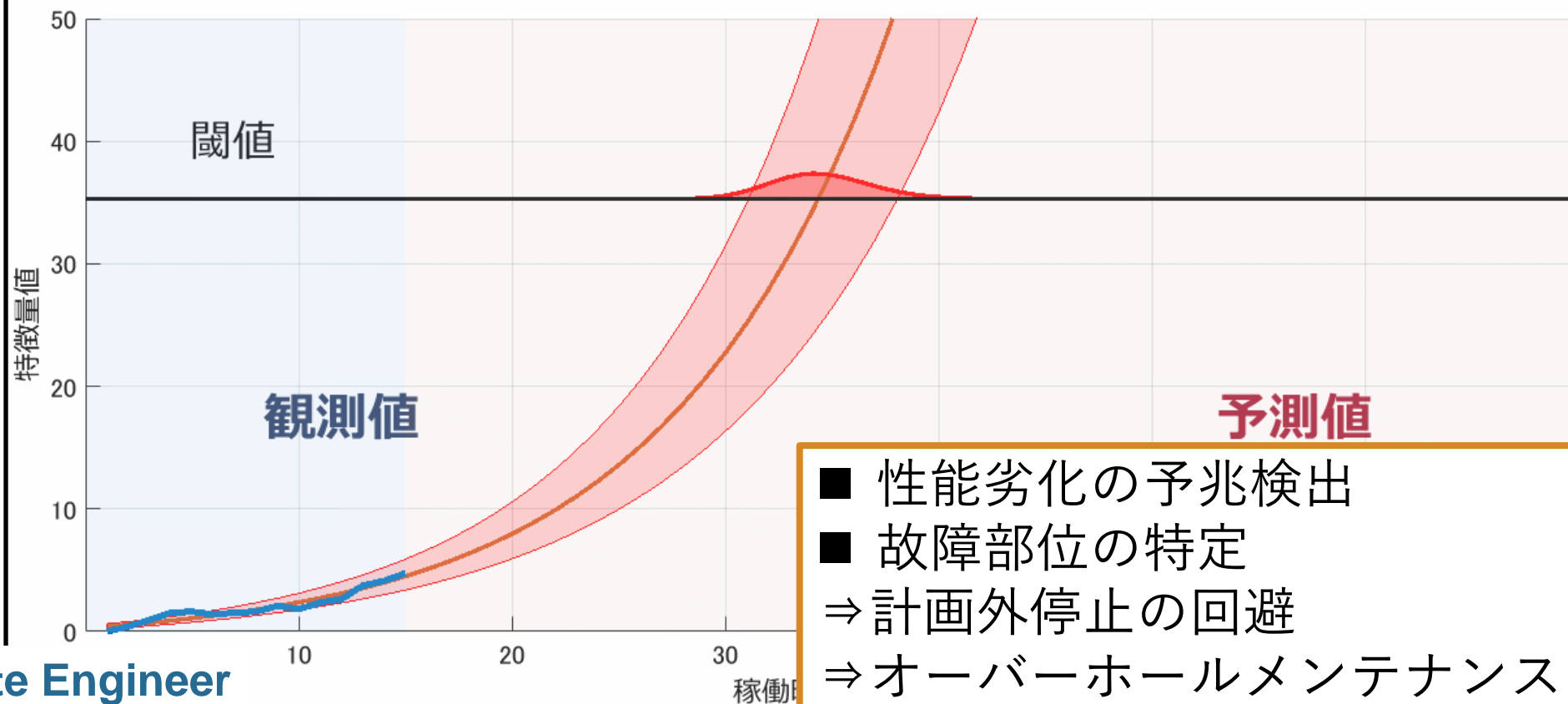
逐次モデルを更新

現時点での観測データ・閾値をもとに予測

異常検知・故障予測解析例



故障まで残り 459 時間
(95%信頼区間：374～558 時間)

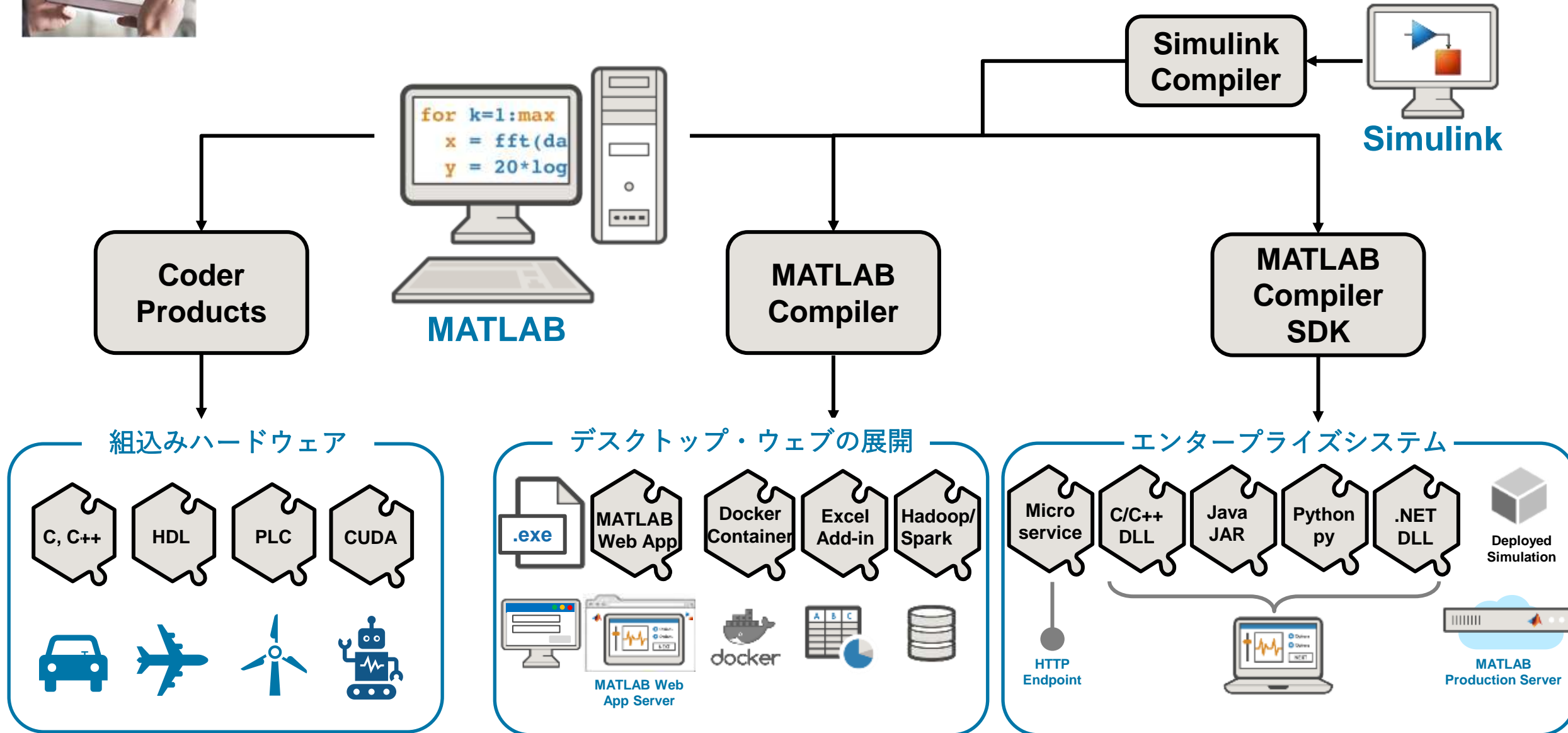


Site Engineer

- 性能劣化の予兆検出
 - 故障部位の特定
- ⇒ 計画外停止の回避
- ⇒ オーバーホールメンテナンスの最適化



開発したアプリの展開・実装



ユーザー事例

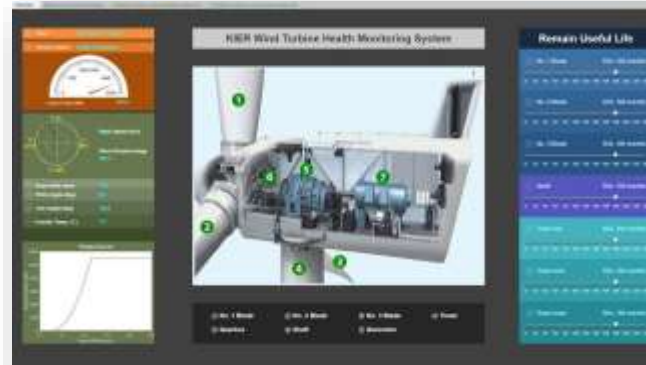
■BAKER HUGHES

[Link](#)

ポンプの状態監視システム

- バルブからの圧力・振動データにスペクトル解析を実施しニューラルネットワークによる故障予測
- \$1000万以上のコスト削減

■KIER

[Link](#)

洋上風力発電向け予知保全モデルを開発

- 開発期間を半分に短縮
- 90% 以上の予測精度を達成
- 厳しい納期に対応

■mondi

[Link](#)

生産機械の故障警報

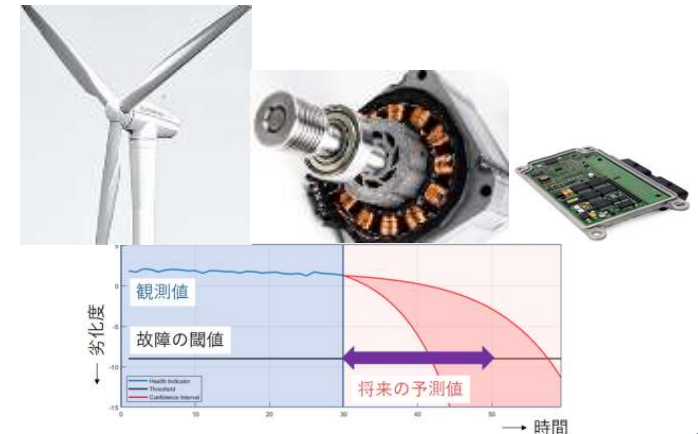
- 機械ダウンタイムと廃棄を削減
- 機械の故障を予測する監視ソフトウェアの開発・実装
- 年間 5万 € 以上のコスト削減

まとめ

- 本セッションの説明内容の振り返り
 - ✓ MATLAB/Simulinkを活用したシステムエンジニアリングによる開発フローの進め方
 - ✓ 設備メンテナンスにおける予知保全
- MATLAB製品の強み
 - ✓ 一気通貫で設計意図を伝搬する製品群 & 効率的に作業が行える環境を提供
 - ✓ 組込みハードウェアやデスクトップアプリ, サーバーへのコード生成アプローチ



様々な開発用途で、MATLAB製品を是非ご活用下さい。





Accelerating the pace of engineering and science

© 2023 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.

MBD 製品

分類	製品名	概要
制御モデリングとシミュレーション	Simulink	モデルベースデザインの基本環境
	Stateflow	状態遷移・フローチャートによる判定ロジックのモデル化とシミュレーション
システムズエンジニアリング	System Composer	システムおよびソフトウェア アーキテクチャの設計と解析
	Simulink Requirements	要件の作成、管理、およびモデル、生成コード、テストケースへのトレース
プラントモデリング	Simscape	複合物理領域の物理モデリング
	Simscape Electrical	パワエレ/電力システムのモデリング
	Simscape Battery	バッテリー/BMSのモデリング
	Simscape Driveline	動力伝達のモデリング (1Dのギア/クラッチなど)
	Simscape Multibody	機構のモデリング (3Dのロボットアームなど)
	Simscape Fluids	熱流体のモデリング (気体、液体)
モデル検証	Simulink Check	設計品質を測定し、検証作業を追跡して、規格への準拠を検証
	Simulink Coverage	モデルおよび生成コードのテストカバレッジを測定
	Simulink Design Verifier	設計エラーの特定、要件準拠の証明、テストの生成
	Simulink Test	シミュレーションベースのテストの開発、管理、実行
コード検証	Polyspace Bug Finder	静的解析を使用したソフトウェアのバグの特定
	Polyspace Code Prover	ソフトウェアにランタイムエラーがないことを証明
	Polyspace Test	動的解析を使用したソフトウェア検証

MBD 製品

分類	製品名	概要
量産コード自動生成	Embedded Coder	組込みシステム用に最適化された C/C++ コードの生成
	AUTOSAR Blockset	AUTOSAR ソフトウェアの設計とシミュレーション
	Fixed-Point Designer	固定小数点アルゴリズムと浮動小数点アルゴリズムをモデル化して最適化
レポート生成	Simulink Report Generator	モデルおよびシミュレーションからレポートを設計して自動生成
制御設計	Control System Toolbox	古典/現代制御理論に基づく制御系の設計と解析
	System Identification Toolbox	入出力の測定データから線形/非線形動的システムモデルを作成
	Simulink Control Design	Simulink モデルを起点とした制御系設計 (応答解析、自動調整)
	Simulink Design Optimization	Simulink モデルのパラメータ同定、コントローラー自動調整
	Model Predictive Control Toolbox	モデル予測コントローラーの設計およびシミュレーション
	Predictive Maintenance Toolbox	状態監視・予知保全向けアルゴリズムの設計・評価
	Motor Control Blockset	ベクトル制御・オブザーバの設計・シミュレーション
リアルタイムシミュレーション	Simulink Coder	モデルから C/C++ コードの自動生成 (高速化、RCP/HIL 用途)
	Simulink Real-Time	リアルタイム アプリケーションのビルド、実行およびテスト
	Simulink Desktop Real-Time	コンピュータでリアルタイムに Simulink モデルを実行
シミュレーションアプリ展開	Simulink Compiler	シミュレーションをスタンドアロンの実行可能ファイル、Web アプリ、および Functional Mockup Unit (FMU) として共有