

# 空調用電動コンプレッサの モータ制御システム開発に おけるモデルベース開発事例

サンデン・オートモーティブコンポーネント株式会社  
開発本部 先行開発部 開発4Gr

木暮 雅之

# Agenda

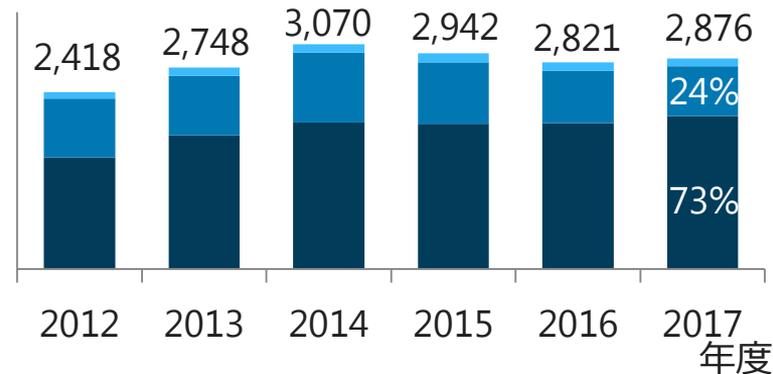
1. 会社概要
2. MBD取組みの背景
3. 事例紹介

# 1. 会社概要

## サンデングループ概要

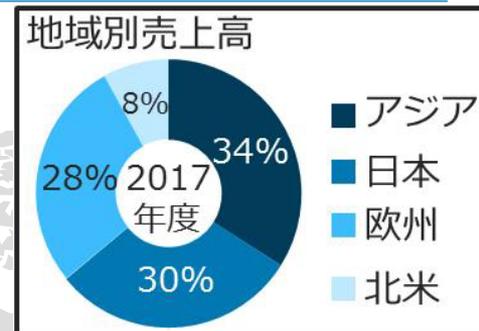
設立	1943年7月30日
資本金	110億円
主要事業	<p>■自動車機器</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・コンプレッサー (世界シェア2位)</li> <li>・エアコン</li> </ul> <p>■流通システム</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・店舗システム (国内シェア2位)</li> <li>・自動販売機 (世界シェア1位)</li> </ul> <p>などの製造・販売</p>
連結売上高	2,876億円 (海外売上比率70%) 2017年度
連結従業員数	13,000名 (合併含む：17,000名) 2018年3月末現在

連結売上高(単位：億円)



# 1. 会社概要

## 海外23カ国・地域 54拠点のグローバル体制



**海外生産拠点：28拠点**  
 (連結子会社：22、持分法：4、連結外：2)  
 2018年3月末現在

- 自動車機器事業
- 流通システム事業

# 1. 会社概要

## 世界最先端の環境共生型工場 2002年稼動



### サンデンフォレスト・赤城事業所

コンセプト“環境と産業の矛盾なき共存”

敷地面積：約20万坪、緑地率50%

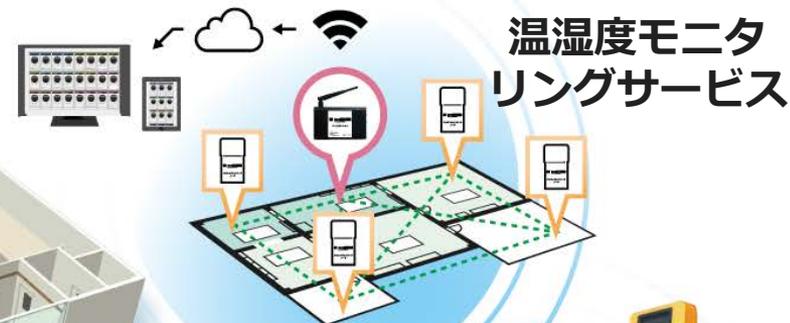
民間初の大規模な「**近自然工法**」を導入し、  
自然環境との共存を達成

- 2008 経産大臣表彰  
朝日企業市民賞
- 2011 OECDで紹介
- 2012 環境大臣表彰  
COP11事例発表
- **2013 内閣総理大臣表彰**
- 2014 COP12事例発表
- 2017 土木学会デザイン賞表彰  
優秀賞
- 2017 第5回みどりの社会貢献賞



# 1. 会社概要

## 流通システム事業



電子マネー端末



自動販売機

店舗システムとベンディングシステムの分野を中心に、  
食品流通ビジネスを支えています。  
お客様のビジネス成長に貢献する環境配慮型の製品、  
システム、サービスをグローバルに提供しています。

# 1. 会社概要

## 自動車機器事業

### 本開発事例



エバポレーター



コンデンサー



電動コンプレッサ



メカニカル  
コンプレッサ



エアコンユニット



インタークーラー

地球と人にやさしい次世代の空調システムを追求しています。  
サンデングループのカーエアコンシステム製品は、  
自動車の電動化ニーズにもいち早く対応し、  
世界中の自動車メーカーや建機・農機メーカーに採用されています。



自動車



トラック



建設機械

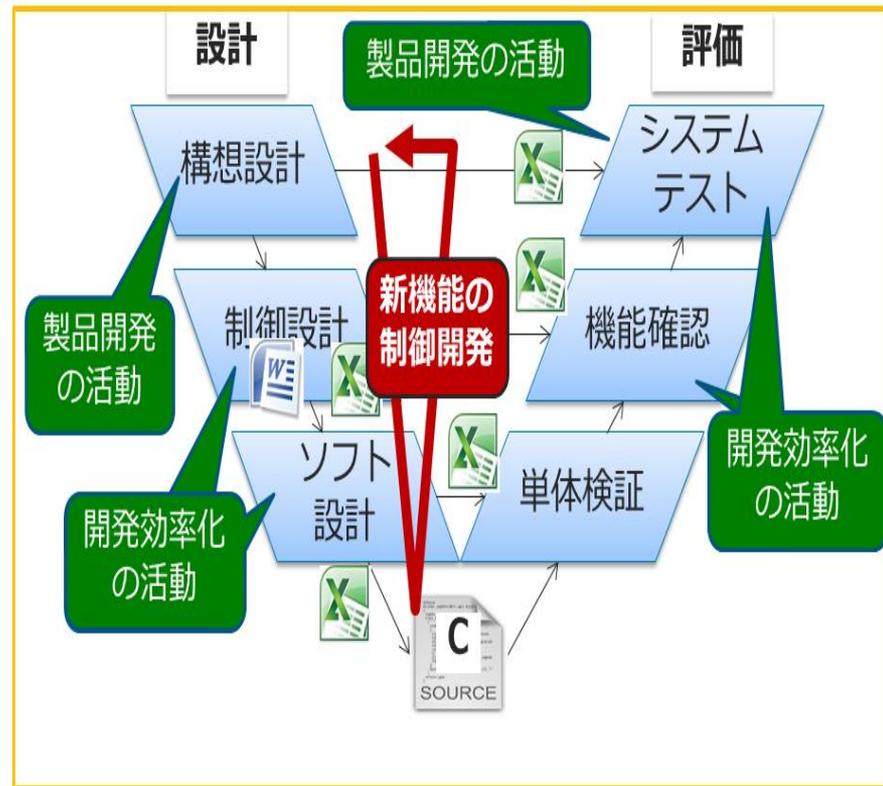
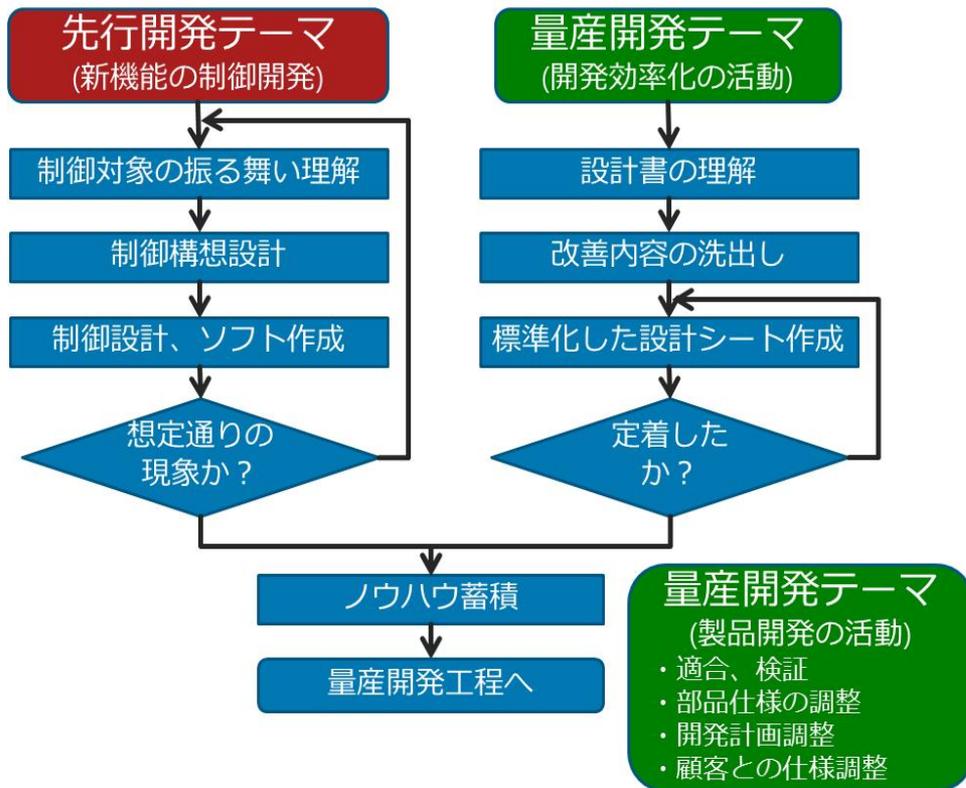
# Agenda

1. 会社概要
2. MBD取組みの背景
3. 事例紹介

## 2. MBD取組みの背景

～内的課題～

### 従来の電動コンプレッサのソフトウェア開発スタイル



## 2. MBD取組みの背景

～内的課題～

### 従来の強み

- ・ 実システム(電気、メカ特性)の課題を切分けながら開発を行う為、製品システムの成立性を考慮した熟練が育つ
- ・ 構想設計からソフト作成までを一人で行う為、頭の中で瞬時にソフト設計できる熟練が育つ
- ・ Cベースで開発する為、性能を担保したソースコードを量産開発へ展開できる
- ・ シンプルなツールを使用する為、メンバー間で仕事を理解・フォローしあえる

### 従来の弱み

- ・ 高度な技術が必要となる為、人材育成に時間がかかる
- ・ 実機ベースでソフトの作込みを行う為、工数が多大となる
- ・ 他の要素設計チームとの設備調整が頻繁する為、調整の工数が発生する

## 2. MBD取組みの背景

～外的課題～

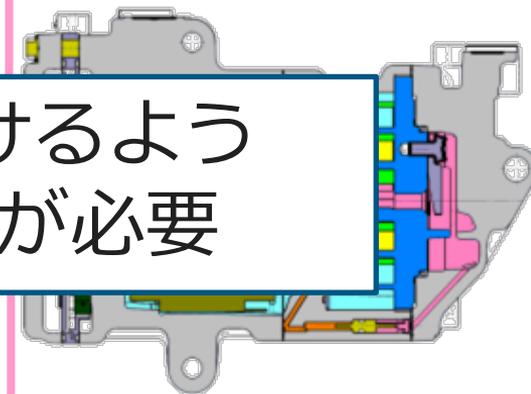
### 従来の開発スタイルの課題

通信仕様

電気回路

モータ・

市場の開発スピードについていけるよう  
『開発効率化』と『人材育成』が必要



標
本
H社
D社代表LIN
...

D仕様

B仕様

C仕様

### ソフトウェアの構成

通信仕様、電気回路、モータ、コンプレッサの要素間が複雑となり、  
熟練は仕様調整に時間を取られ、制御開発に工数をさげなくなってきた

## 2. MBD取組みの背景

『開発効率化』と『人材育成』を進める一方で. . .

ミッション：

高効率、高出力密度、低NVH※を実現する制御設計

コア技術

高性能な  
制御ロジック

高精度な  
制御対象の振舞い解析

高度な制御解析・検証技術

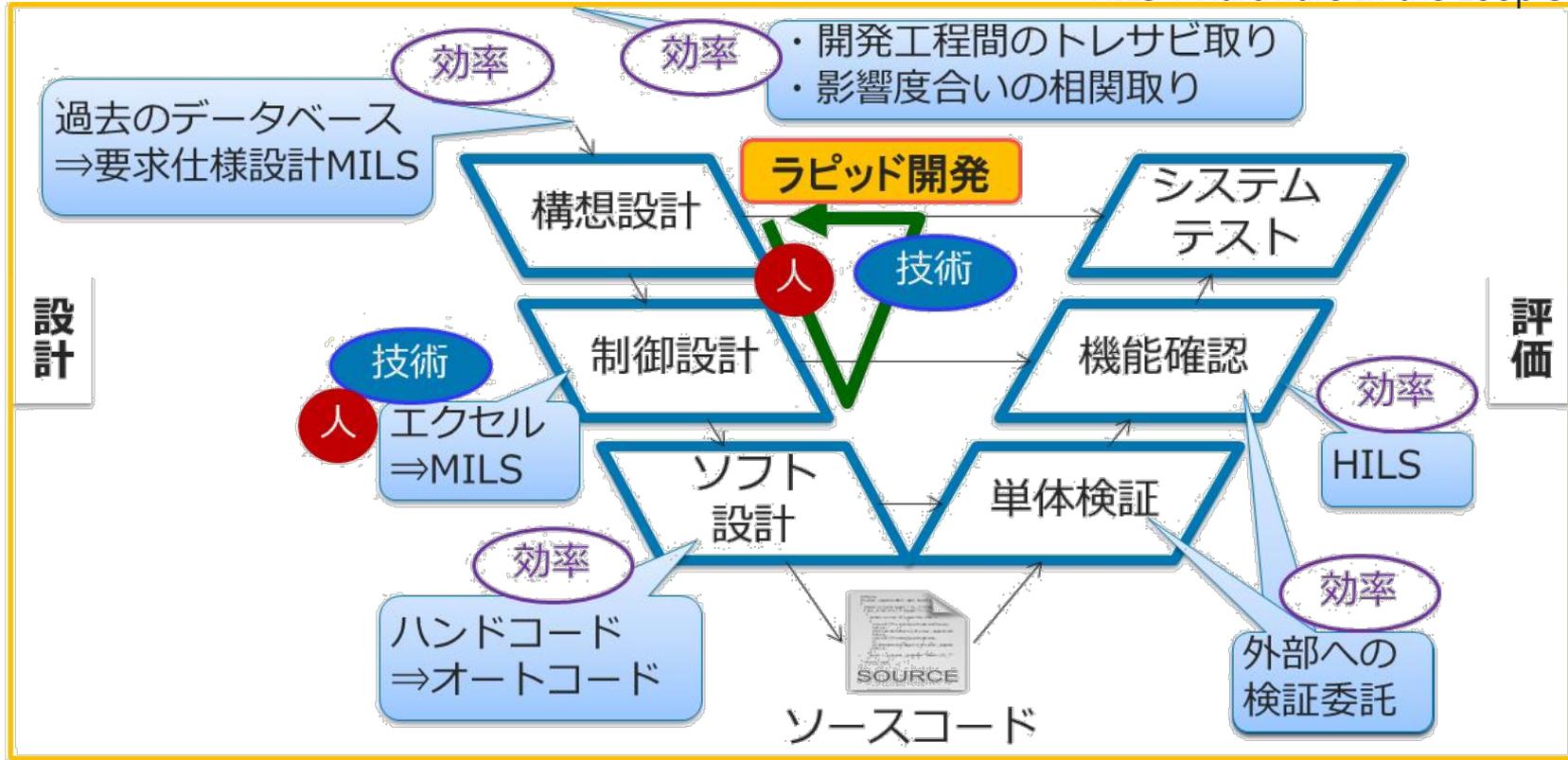
※NVH : Noise、Vibration、Harshness

# 2. MBD取組みの背景

## 将来のありたい姿

MILS : Model In the Loop Simulator

HILS : Hardware In the Loop Simulator



# Agenda

1. 会社概要
2. MBD取組みの背景
3. 事例紹介

### 3. 事例紹介 ～本活動事例の全体像～

#### Step1



- ・ 制御仕様書の整備 
- ・ MILS(Model In the Loop Simulator)基本環境の構築 
- ・ HILS(Hardware In the Loop Simulator)の導入 
- ・ HILS(Hardware In the Loop Simulator)による検証自動化 

#### 活動の振り返り



#### Step2

- ・ MILS用プラントモデルの精度Up①  
- ・ MILS用プラントモデルの精度Up②  



#### Step3

- ・ 性能予測シミュレーションMILSのトライアル 

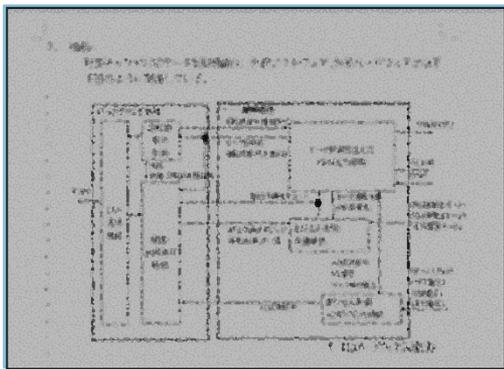
# 3. 事例紹介 ～Step1～

## 制御仕様書の整備

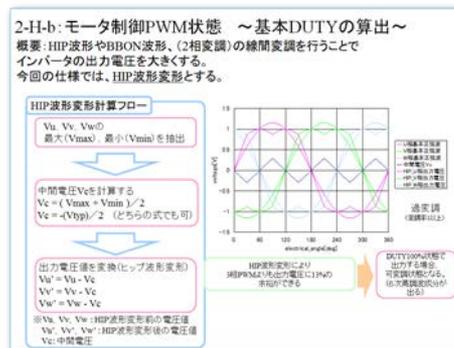
製品開発としては円滑だが...

- ・制御仕様書に最低限の説明しかない

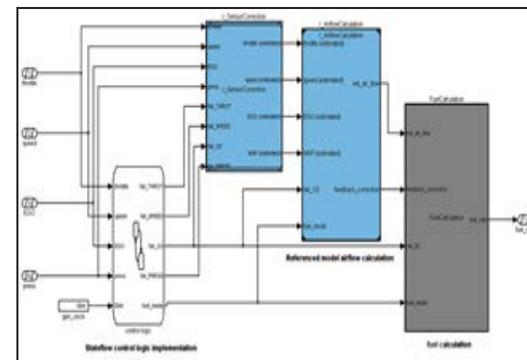
- ・熟練ノウハウの明文化し、ドキュメントを一新
- ・検証時の入力条件も同時に記載



制御仕様書



制御構想書



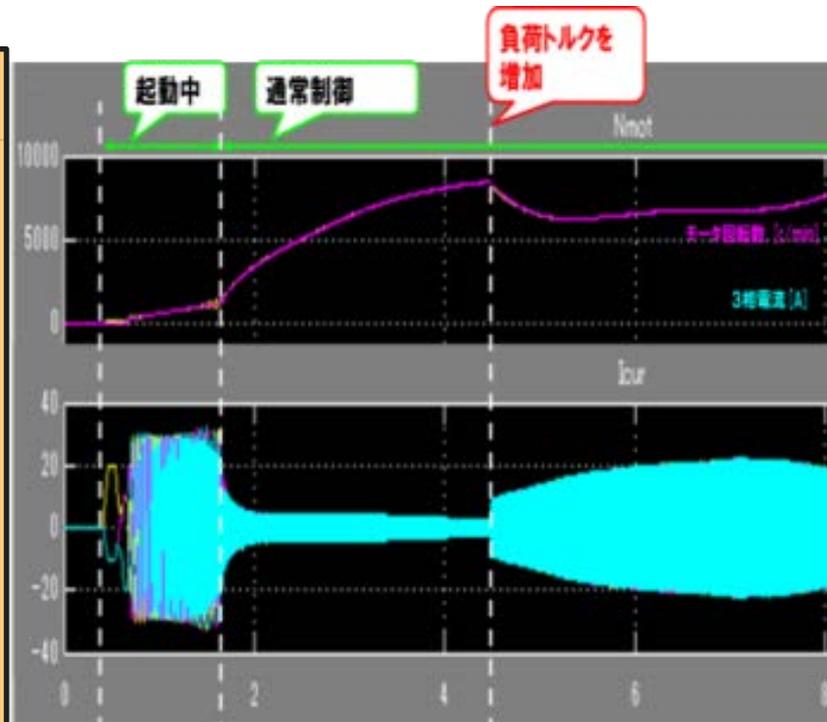
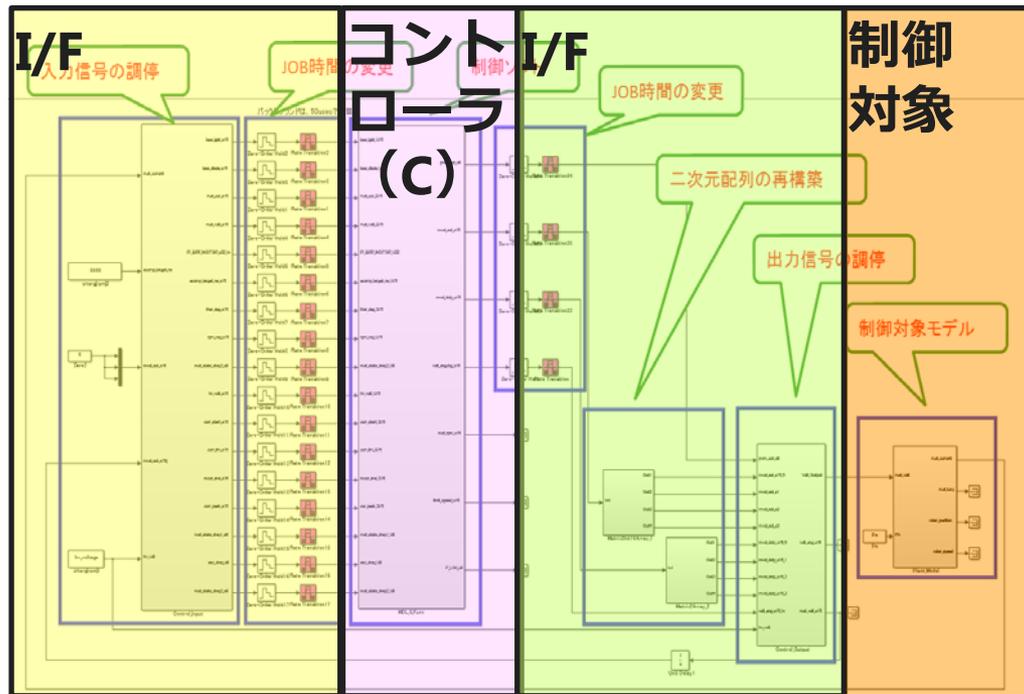
制御仕様書

# 3. 事例紹介 ～Step1～

## MILS(Model In the Loop Simulator)環境の構築

- 従来設計資産を活用したCベースのMILS(S-Function利用)

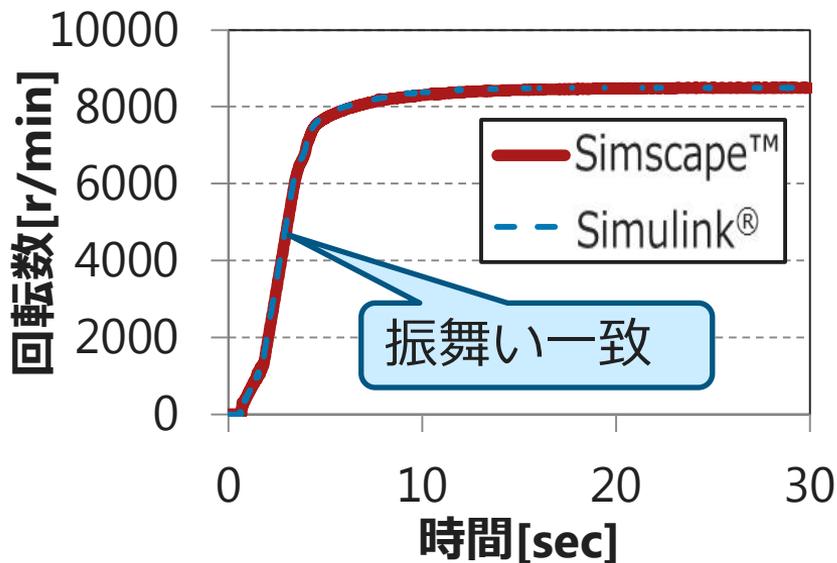
効率



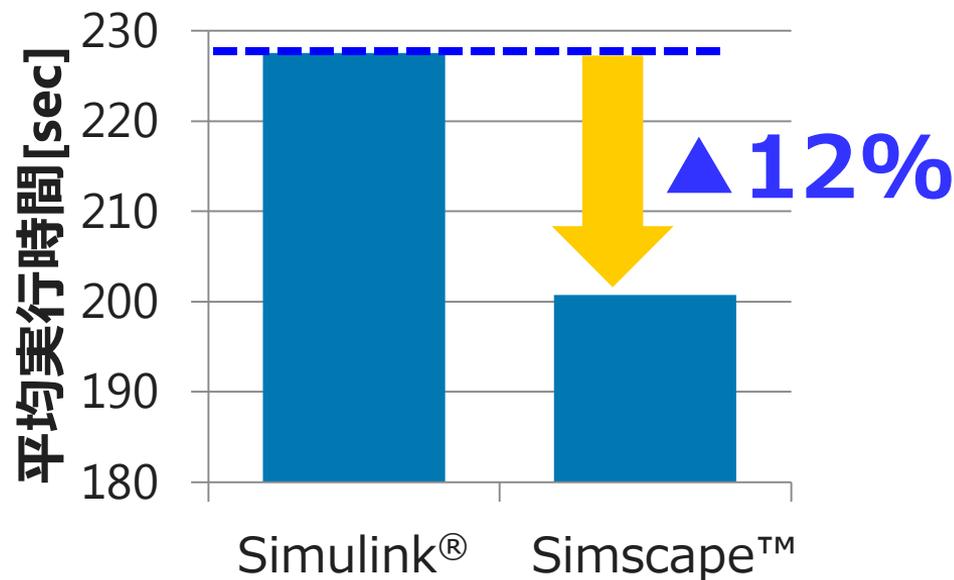
### 3. 事例紹介 ～Step1～

## MILS用の自作モデルとSimscapeモデルのベンチマーク

#### 応答性の等価性の比較



#### シミュレーション時間の比較

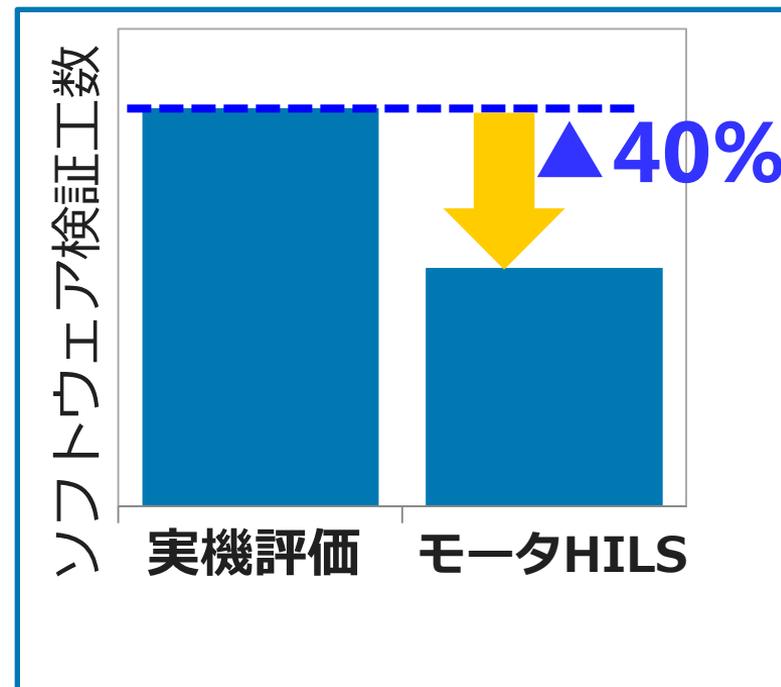
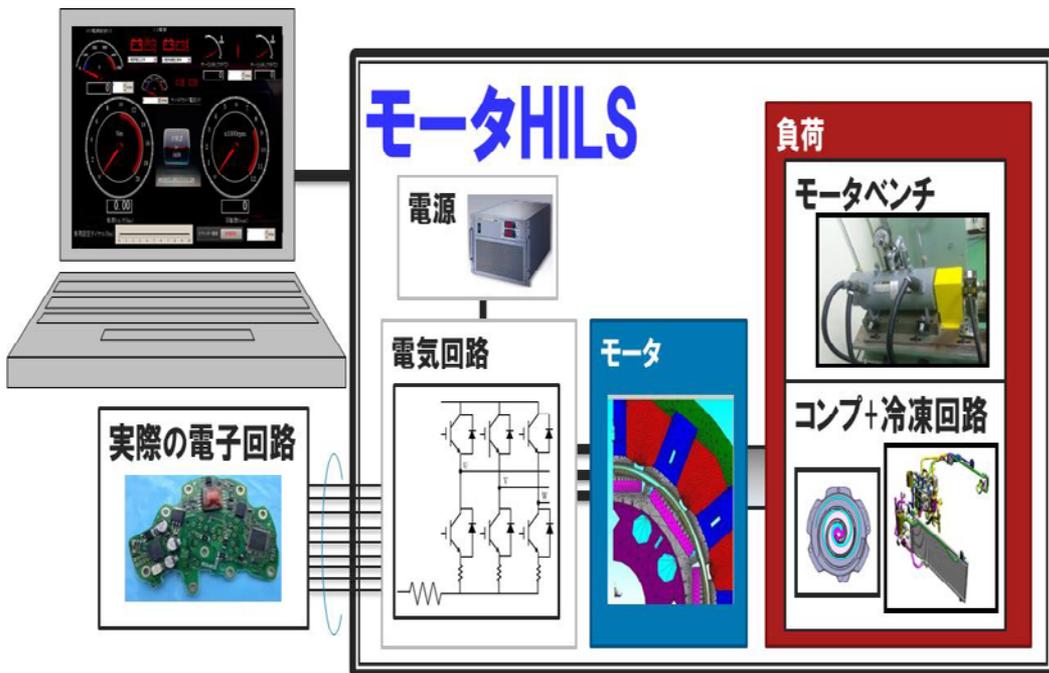


### 3. 事例紹介 ～Step1～

## HILS(Hardware In the Loop Simulator)の導入

- ・ MILSプラントモデルをHILSに流用し、安全性と開発効率化を実現

効率



# 3. 事例紹介 ～Step1～

## HILSのモデルアーキテクチャ変更

調停モデル  
が散々

### HILS入力

- ・ A/D、DI
- ・ CAN/LIN

### 物理現象

- ・ 回路モデル
- ・ モータモデル
- ・ 負荷モデル

### HILS出力

- ・ D/A、DO
- ・ CAN/LIN
- ・ モニタ変数

物理現象主体から  
エレメント主体へ変更

### 外部環境の 設定

#### 電氣的な要素

- ・ コネクタ・回路入力
- ・ 回路ロジック
- ・ マイコンへの出力

#### 力学的な要素

- ・ モータモデル
- ・ 負荷モデル

### HILSモニタ設定

- ・ モニタ変数

# 3. 事例紹介 ～Step1～

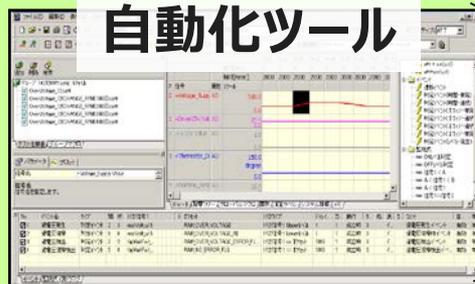
## HILS検証の自動化

効率

自動化ツール

自動テスト環境共通化

OEM毎に  
個別に設定



↓ 自動テストパターン

測定PC

供試品



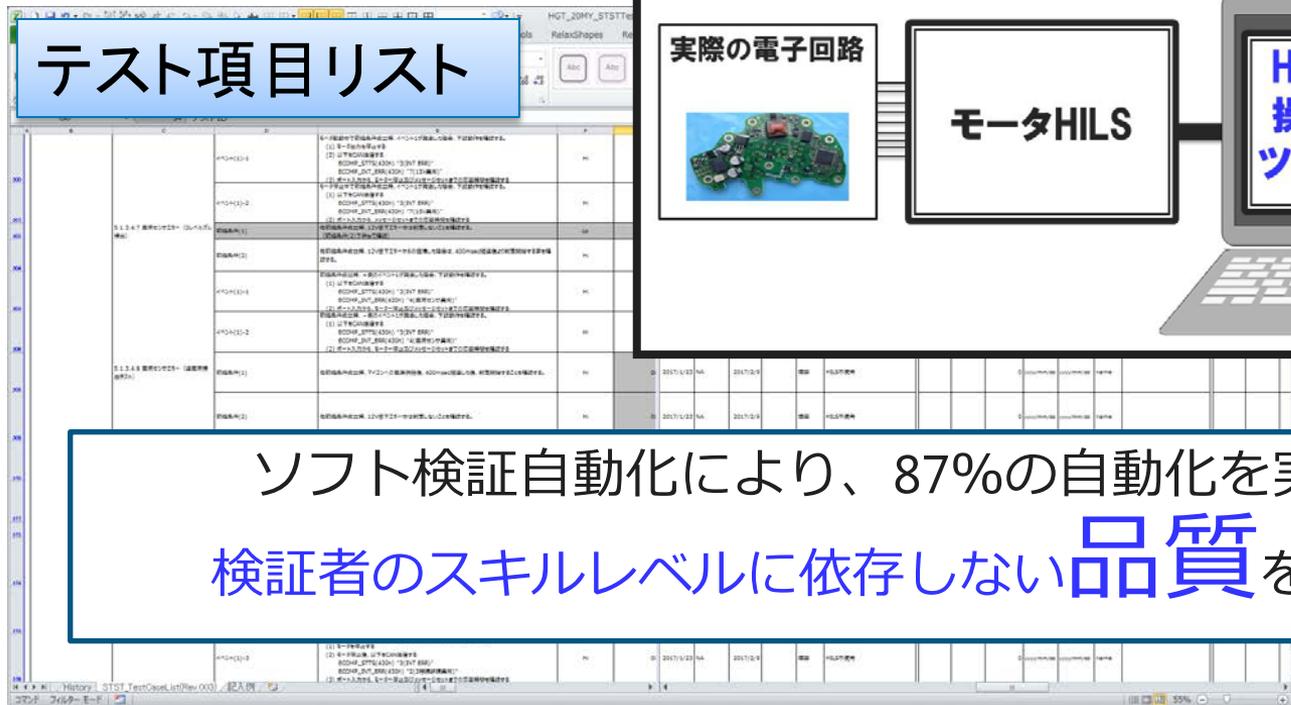
ゲートウェイ

モータHILS

# 3. 事例紹介 ～Step1～

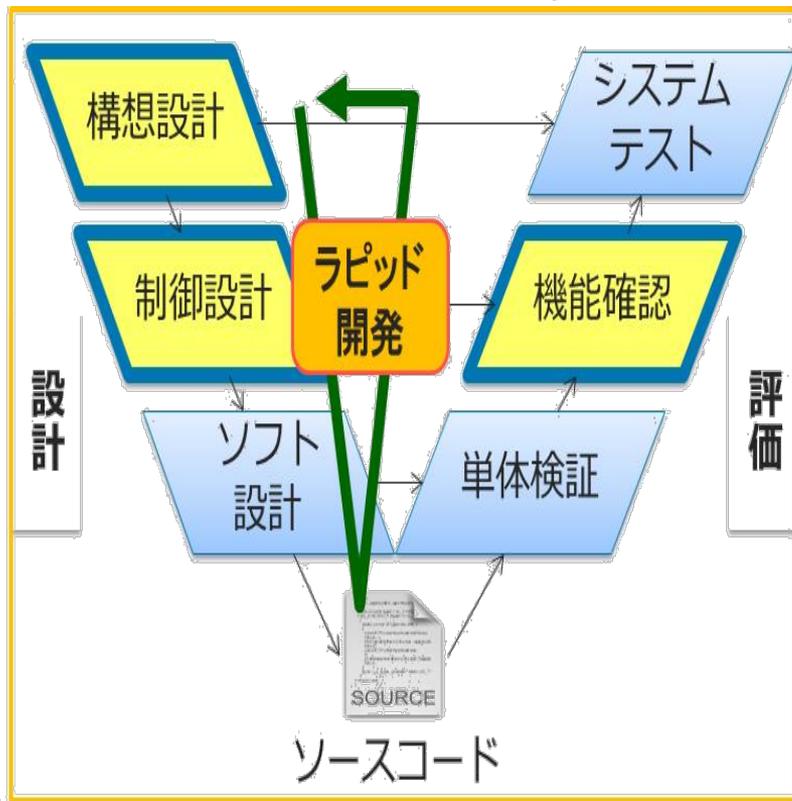
## HILS検証の自動化

効率



# 3. 事例紹介

## 進む方向性の振り返り



項目	評価軸	高度な制御設計	開発効率化	人材育成
Step2	モデル精度Up	◎	—	◎
Step3	性能予測MILS		◎	
	プラント・コントローラ解析	◎		◎
	効率的なラピッド開発	◎	◎	◎
	オートコード	—	○?	○
	工程間トレサビ(影響度合い解析)	—	◎	◎
	検証の外部委託	—	◎	—

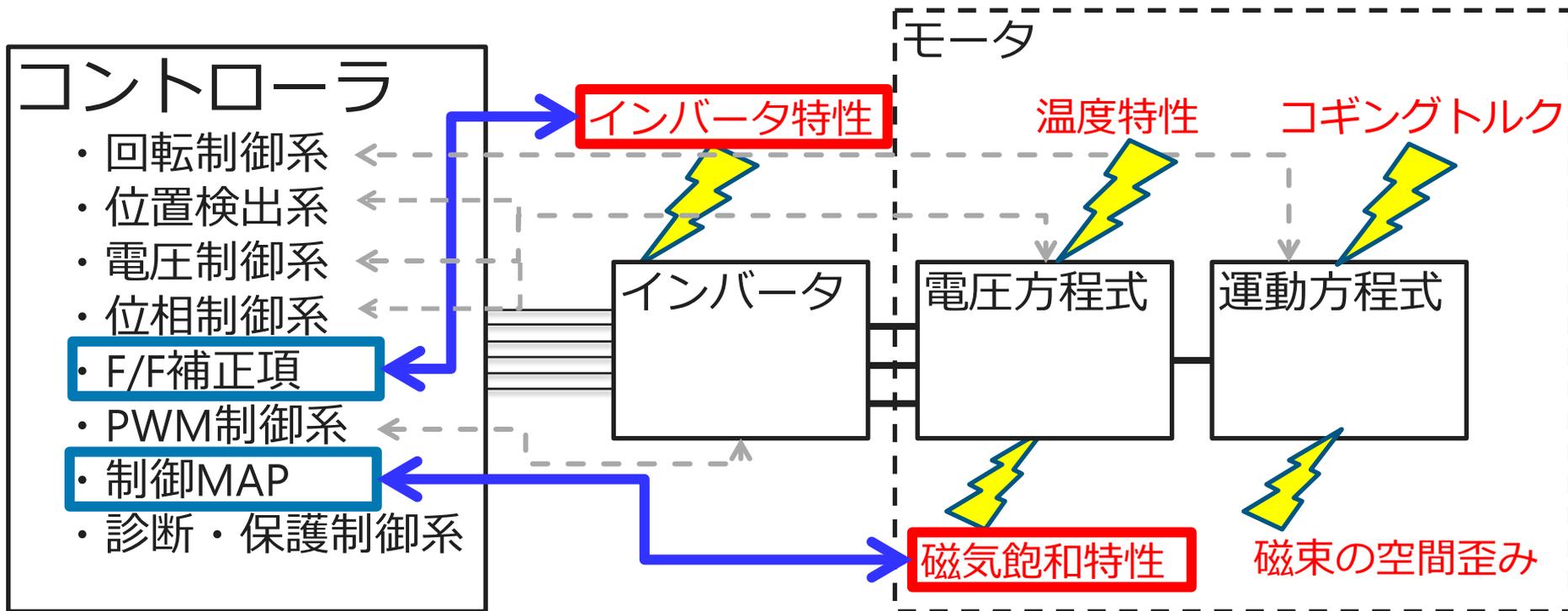
# 3. 事例紹介 ~Step2~

## プラントモデルの精度Up

- ・コントローラの機能と対をなす項目をプラントに反映させる

人

技術



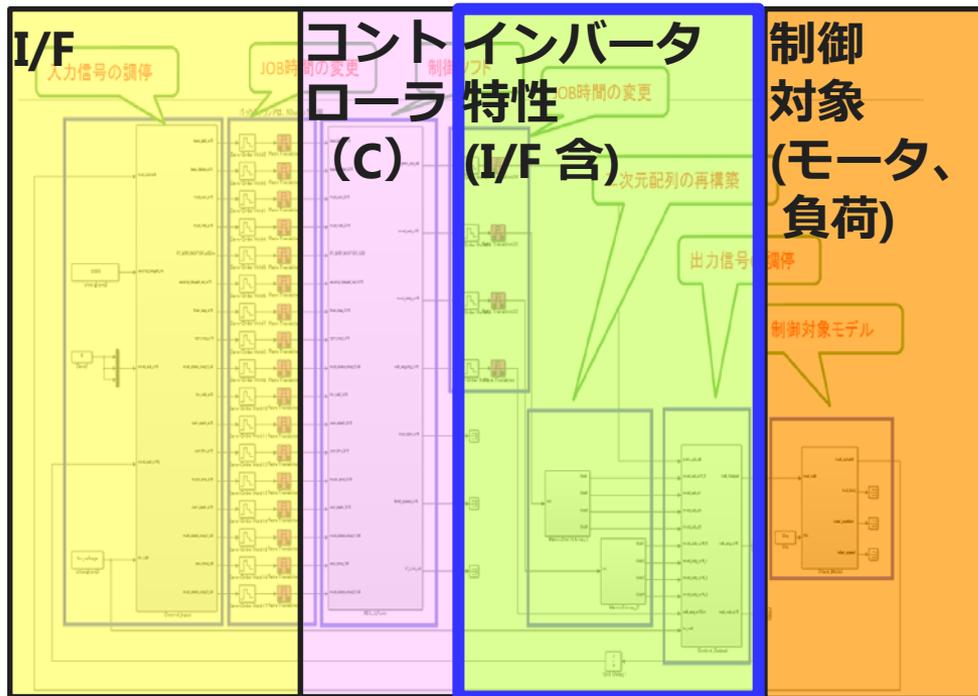
# 3. 事例紹介 ～Step2～

## プラントモデルの精度Up①（インバータモデル）

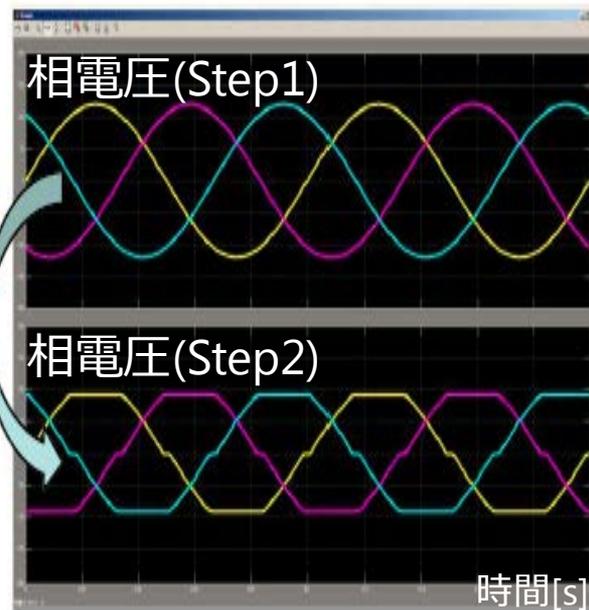
- ・インバータ特性をコントローラとモータモデルの間に挿入

人

技術



実機に近い  
出力へ変更



# 3. 事例紹介 ~Step2~

## プラントモデルの精度Up② (モータモデル)

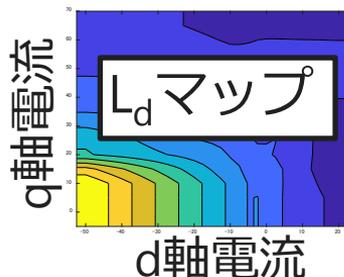
人

技術

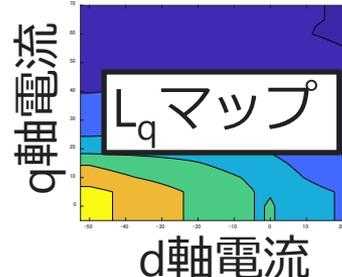
永久磁石同期モータの電圧モデル一般式に対し、実機特性を反映

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & r + pL_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \psi \omega_1 \end{bmatrix}$$

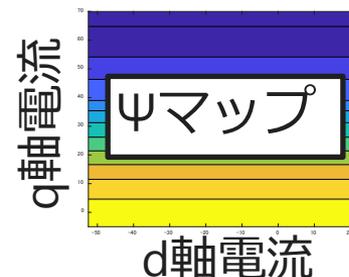
磁気飽和の影響を反映



磁気飽和の影響を反映



Ld算出用に補正



# 3. 事例紹介 ~Step2~

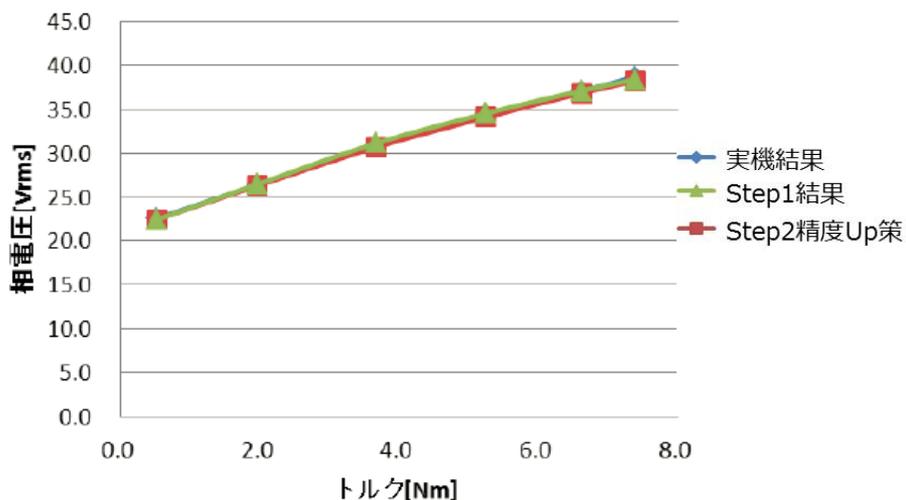
## プラントモデルの精度Up結果

人

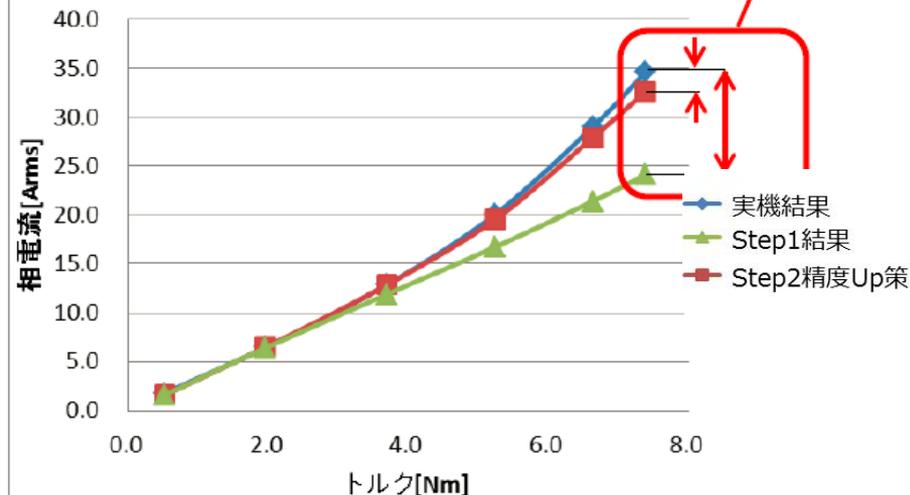
技術

誤差30.4%→5.8%

### T(トルク)-V(相電圧)特性



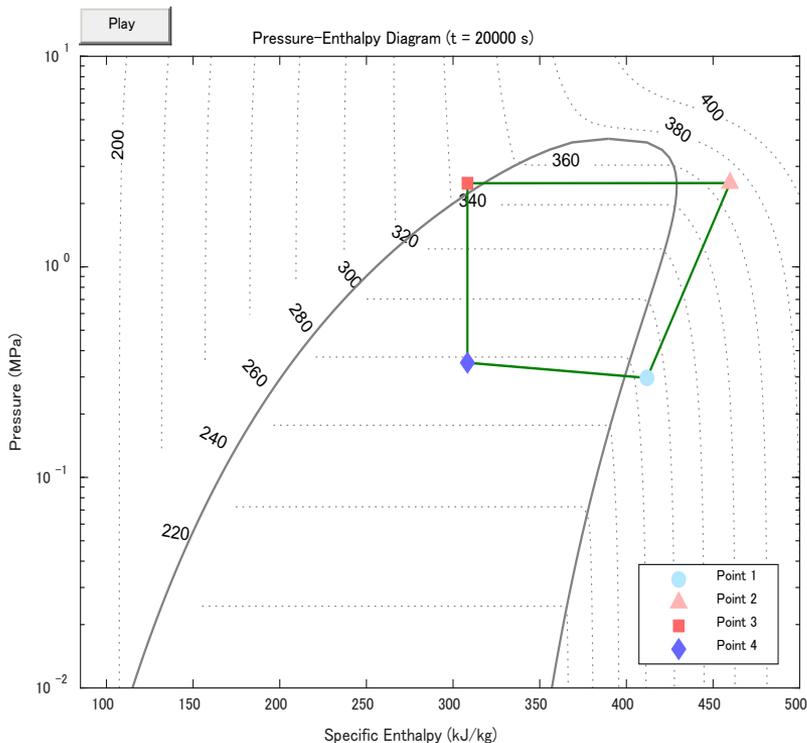
### T(トルク)-I(相電流)特性



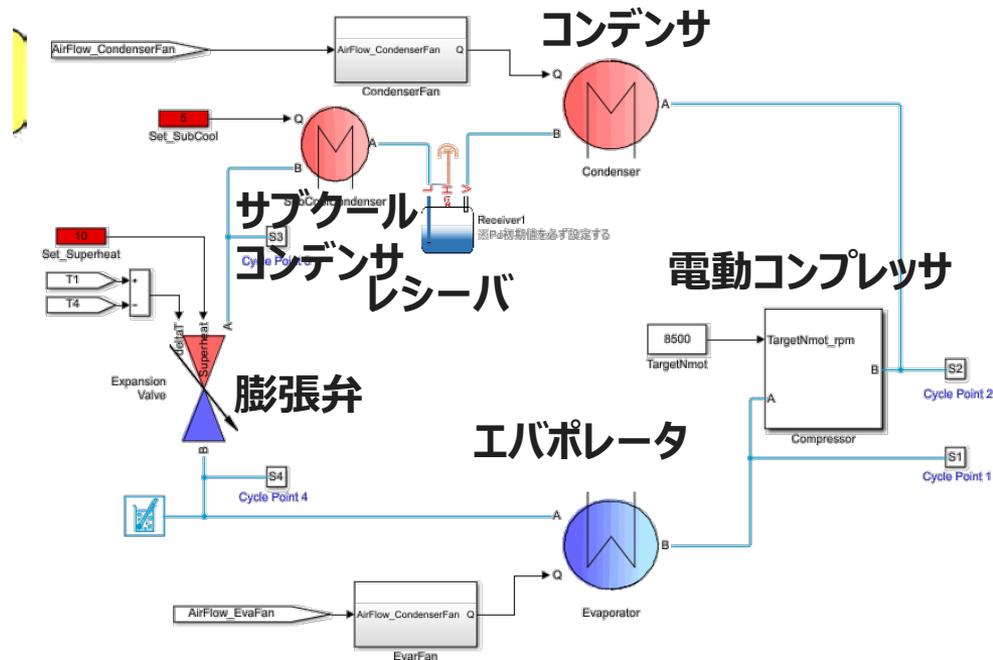


# 3. 事例紹介 ~Step3~

## 冷凍サイクル全体レベルの機能・性能を検証中



### Simscape™の二相流体モデル



# 3. 事例紹介

## まとめ

- ・ 制御構想書、制御仕様書を一新し、本活動のベース資料ができた
- ・ 従来の設計資産を活用したCベースのMILSが構築でき5.8%内の精度で実現できた
- ・ HILSを導入し、ソフトウェア検証工数の低減が図れた
- ・ HILSによる検証自動化により、検証者のスキルレベルに依存しないテスト品質が確保できた
- ・ 性能予測シミュレーションMILS環境のさらなる精度Upを目指し、動特性を考慮したコンプレッサモデル構築を推進中

# 最後に

## ◆業務を通して感じたこと

- 使用する人がメリットを感じないと使ってくれない
  - ex. • 実機以上のリアルタイム性があり、ストレスなく動く
    - 直感的に操作でき、すぐに活用できる
    - 精度と使い勝手の良さはトレードオフの関係。  
どちらか一方の活動に傾きすぎると使われなくなっていく
- 将来の方向性について定期的に共有・議論しないと  
周りが離れていき、各々が違う方向を向き活動が停滞する
- 開発スタイル(実機or机上ベース)の違いにより解決手段の選択が異なる  
⇒継続的な啓蒙活動が今後も必要
- 顧客目線で車・システムとしてどうあるべきか考えながら仕事するには、  
量産と先行要素の仕事が半々がちょうどいい

# 最後に

- ・ ツールメーカーへお願いしたい事
  - ・ 設計自由度を段階的に変えられる設定
    - 入門者向け設定 - 必要最小限のパラメータ設定
    - 中級者向け設定 - よく使う機能のみパラメータ表示
    - 超上級者向け設定 - 自由にカスタマイズ可能なフル設定
  - ・ 使用するツールの数を減らしたい
    - 効率化を狙ってツールを導入したが、複雑化するツールを使えるようになるまでに時間がかかる

## 使用している製品

MATLAB®

MATLAB® Coder™

Control System Toolbox™

Signal Processing Toolbox™

System Identification Toolbox™

Simulink®

Stateflow®

Simulink® Coder™

Fixed-Point Designer™

Simscape™

Simscape™ Electrical™

Embedded Coder®

Simulink® Design Verifier™

Simulink® Verification and Validation™

