

# エンジン制御ソフトウェアの開発効率・製品価値向上への挑戦

IHI

2022年05月25日

株式会社 IHI

航空・宇宙・防衛事業領域 技術開発センター 制御技術部 システム技術グループ  
主査 坂井 俊哉

# 目次

1. 会社紹介
2. IHIでのモデル活用の取り組み
3. IHI（航空機用エンジン）でのソフトウェア開発について
4. MBDプロセス再構築プロジェクト
5. まとめ

本講演では、**MBD立ち上げ支援活動**  
(Deep Engagement サポートプロジェクト) を活用  
したMBD設計プロセスの**改善プロジェクト**  
**の活動内容・効果**について報告する。

今後、**MBDプロセスの導入**、**改善**を検討  
されている方々の一助になれば幸いです。



# 1. 会社概要

# 1. 会社概要

創業  
1853 (嘉永6)

従業員数(連結)  
29,149名

海外事業所  
14カ所

資本金  
1,071 億円

工場  
6工場

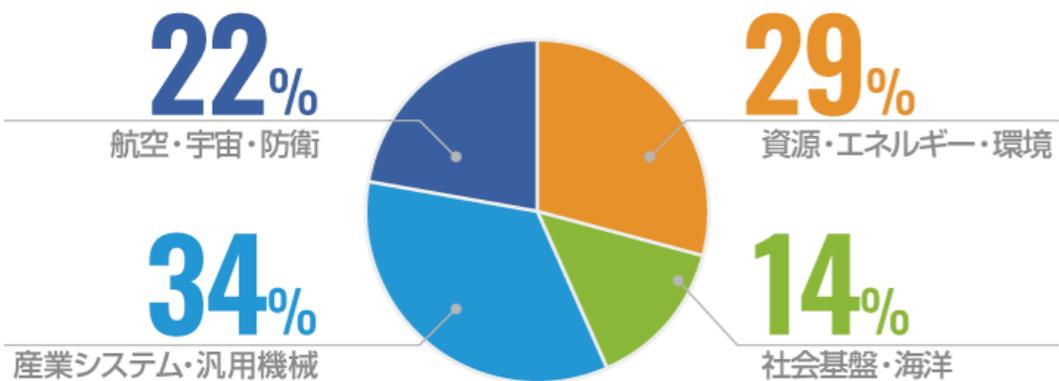
国内関係会社  
63社

売上収益  
11,129 億円  
(2020年度)

支社  
8カ所

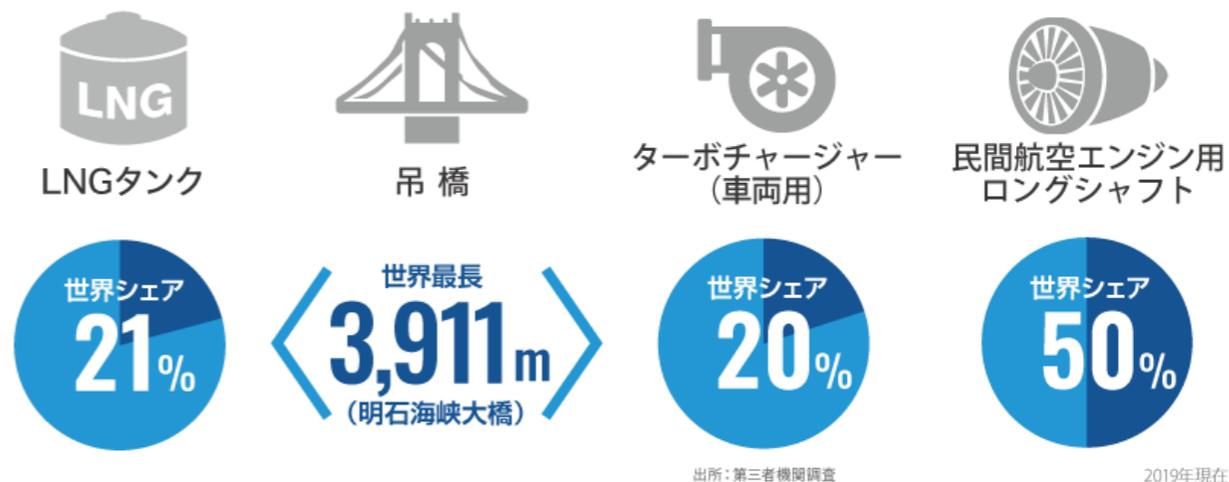
海外関係会社  
143社  
[子会社:121社 関係会社:22社]

## 事業領域別売上構成比率(2020年度連結)



2021年3月期

## 世界をリードする製品(一例)



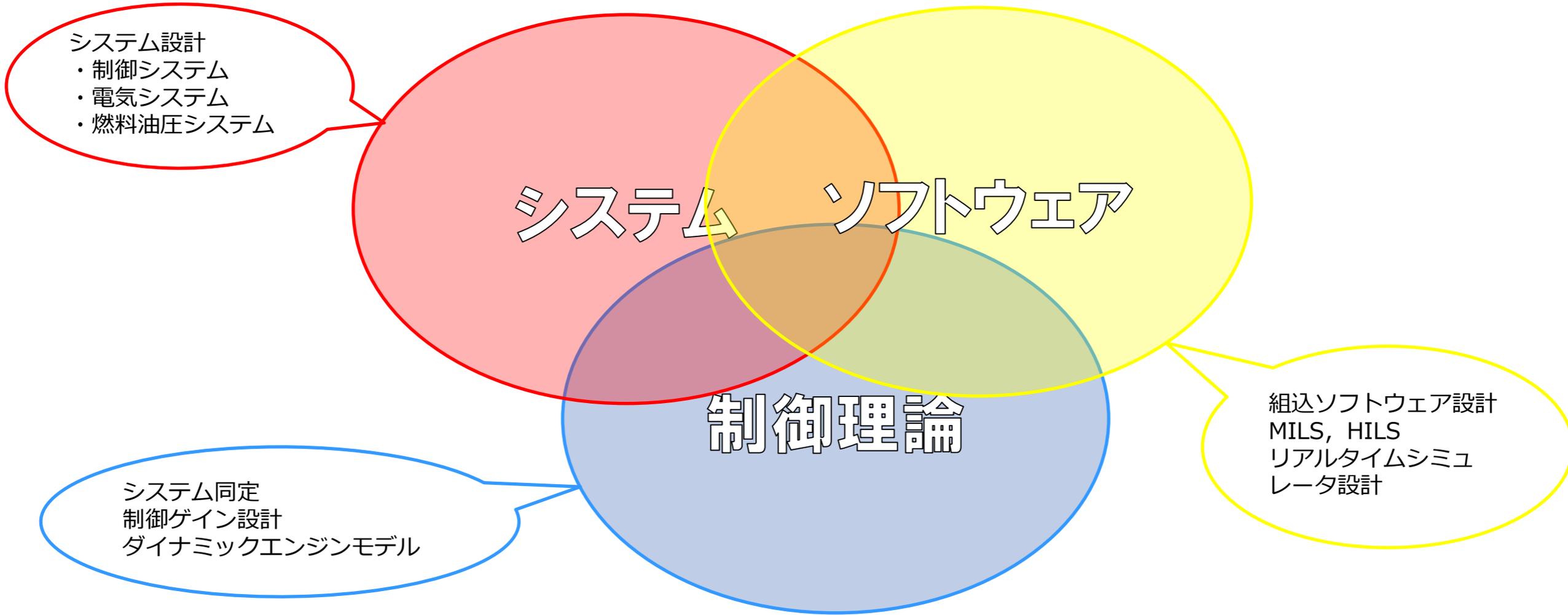
出所: 第三者機関調査

2019年現在

# 1. 会社概要

所属：航空・宇宙・防衛事業領域 技術開発センター 制御技術部 システム技術グループ

業務：航空機エンジン **制御技術に関わる業務**を担当



## 2. IHIでのモデル活用の取り組み

# 2. IHIでのモデル活用の取り組み

MBD技術コンソーシアム (MBAC) ⇒コアメンバとして活動

- モデル流通WG, モデル作成規約WG (MATLAB EXPO Japan 2021で紹介)
- MBSE推進WG, Simulinkモデル企業間流通WG, MBD社内普及WG (2022FY活動中)

航空機エンジン制御MBD  
 ➤ 制御ロジック設計, MILS



車両用電動過給機  
 モータ制御MBD  
 ➤ 制御ロジック設計, MILS



航空機エンジン制御MBD

- エンジン制御SWの設計・実装・検証
- DO-178C, DO-331準拠のためのワークフロー
- 本講演で紹介

複数の電動機種向け  
 モータ制御MBD

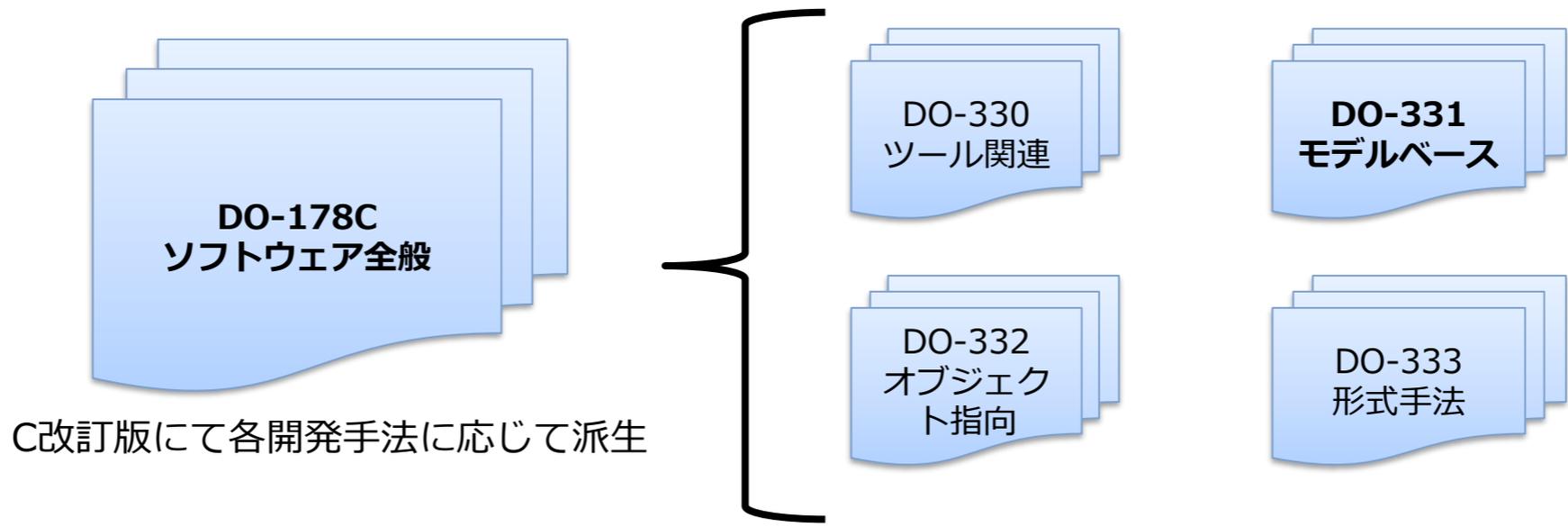
- モータ制御SWの設計・実装・検証
- パワーエレクトロニクス：再利用可能なモータ制御ソフトウェアプラットフォームの構築  
**(本日16時より講演 (弊社技術開発本部))**

# 2. IHIでのモデル活用の取り組み

## 民間航空機向けソフトウェア認証

- ✓ 民間航空機に搭載されるソフトウェアは、**各国の認証**が必要である。
- ✓ デファクトスタンダードとして、RTCA<sup>(1)</sup>が発行している**DO-178**がある。
- ✓ 飛行安全の観点からソフトウェア開発プロセスの要求事項をまとめ、安全信頼性を備えたソフトウェアを生産するための**ガイダンス**である。
- ✓ 航空機装備品**新規参入の大きな障壁**となっている。

注1 : Radio Technical Commission for Aeronautics



### 3. IHI(航空機用エンジン)でのソフトウェア開発について

### 3. IHIでのソフトウェア開発について

#### ソフトウェア開発の現状 (1)

##### 1990年代後半～

オートコード・ツール<sup>(2)</sup>を導入



ハンドコード

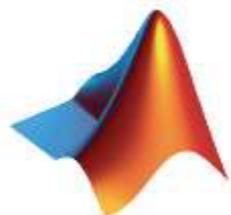


オートコード

注2：Mathworks社製品ではない。

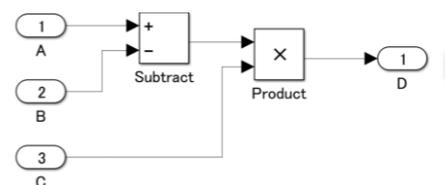
##### 2000年～

MATLAB<sup>®</sup>, Simulink<sup>®</sup>を導入 Simulinkと連携したオートコード・ツール<sup>(3)</sup>を導入

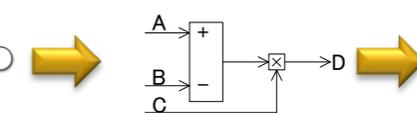


MATLAB, Simulinkによる

制御ロジック設計, MILSを開始



Simulink



オートコード・  
ツール



ソースコード

注3：使用しているプログラミング言語の制約で、「Embedded Coder」は使用していない。

- ✓ エンジン制御のアプリケーションソフトウェアは、**全てSimulinkでロジックを作成し**、オートコード・ツールを使用してのコーディングを実施している。  
(ハンドコードは、BSPのみ)
- ✓ コーディングおよびオートコード用モデル作成<sup>(4)</sup>による**バグの混入は「0」**である。
- ✓ 制御設計者とソフトウェア設計者の**垣根が曖昧**になってきている。

注4：2013年以前はツールが連携していなかったため、Simulinkモデルから手作業でオートコード用モデルを作成していた。

### 3. IHIでのソフトウェア開発について

IHI

#### ソフトウェア開発の現状 (1)

- ・機能分割が手間である。
- ・MILSを実施するのに、変数の型は関係ない。
- ・ソフトウェア観点の検証が大きな負荷になっている。

制御設計者



ソフトウェア設計者

- ・ソフトウェア構造などを意識しないので、巨大なモデルになっている。
- ・検証が難しい。
- ・変数の型を意識していない。

垣根をなくしたMBDプロセスの再構築を実施



制御・ソフトウェア設計者

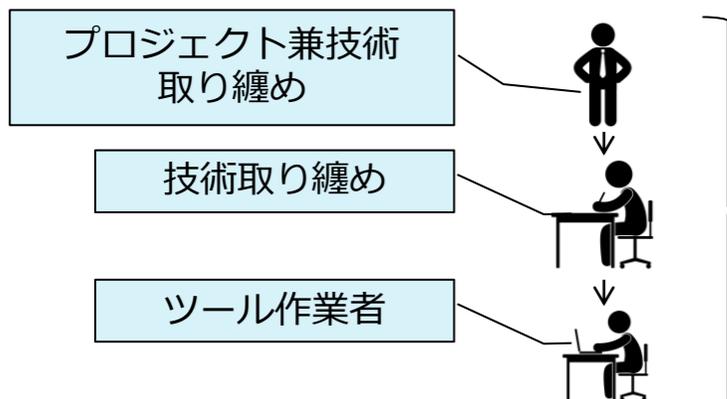
## 4. MBDプロセス再構築プロジェクト

# 4. MBDプロセス再構築プロジェクト

IHI

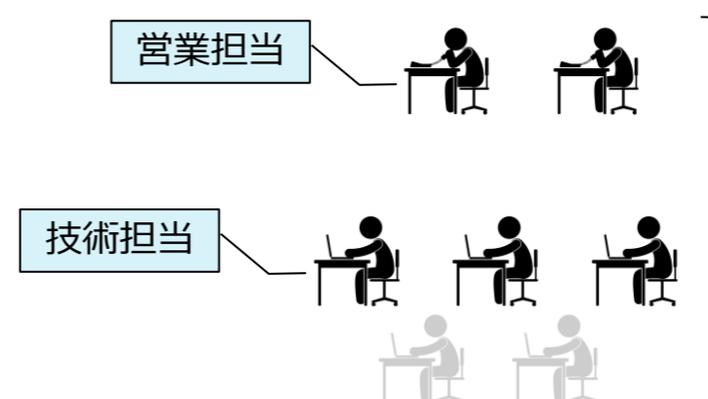
## プロジェクト体制

### IHI : 3名体制



- ✓ 常時2名体制
- ✓ ツール作業者は固定
- ✓ 他業務負荷に応じて、技術取り纏めが不在の期間もあった。

### MathWorks様 : 5名体制



- ✓ 選任のサポート体制
- ✓ 状況により専門の技術担当が臨時対応いただくこともあった。

## 実施スケジュール (実績)

- ・ 事前調整を含め、**約10ヶ月間**支援いただきMBDプロセスの再構築を実施した。

項目	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月
目標・試作機能の検討と設定	■							
要求仕様の整理・可視化・詳細化	■	▽						
アーキテクチャモデルの作成			■	▽				
詳細設計モデルの作成				■	▽			
モデルの単体検証・統合検証					■	▽		
コード生成・検証						■	▽	
試行結果の評価と開発プロセス整備							■	▽

▽ : MathWorks様との打ち合わせ

## 4. MBDプロセス再構築プロジェクト

### MathWorks様の支援概要

1. 選任サポート体制の構築
  - 営業2名, 技術3名の選任サポートチームで支援。
2. 評価ツールの貸与
  - MBDプロセス構築に必要なツールを期間中貸与。
3. 月1回以上のミーティング (計16回)
  - 月1回の定例進捗確認・定例外での技術支援ミーティング
  - 質疑アクションリスト (約51個の質疑)
4. 多種多様な技術資料の提示
  - 進捗, 不明点に応じた多種多様な技術資料を提示
    - ✓ 13種類提示 (アーキテクチャ設計, B2B検証手順等)
5. モデル作成等の技術支援
  - 作成が難しい事項に関して, 参考となるモデルを作成・提示



## 4. MBDプロセス再構築プロジェクト

### MathWorks様の支援概要

以下に示すツールを貸与いただきプロセス構築を実施した。

利用フェーズ	ツール	DO-330 TQL
共通	MATLAB®	-
	Simulink®	-
状態遷移モデル作成	Stateflow®	-
要求仕様トレーサビリティ	Requirements ToolBox™	5
レポート生成	MATLAB® Report Generator™	-
	Simulink® Report Generator™	5
モデリングガイドライン準拠確認	Simulink® Check™	5
モデル設計エラーの検出とテストケース生成	Simulink® Design Verifier™	5
シミュレーションと期待値比較	Simulink® Test™	5
カバレッジ解析	Simulink® Coverage™	5
コーディングルール準拠確認	Polyspace® Bug Finder™	5
ランタイムエラー解析	Polyspace® Code Prover™	4
コード生成	Embedded Coder®	-
	MATLAB® Coder™	-
	Simulink® Coder™	-
モデルがコード生成可能であることの確認	Simulink® Code Inspector™	5

# 4. MBDプロセス再構築プロジェクト

## 実施内容全体概要

### 要求仕様の整理

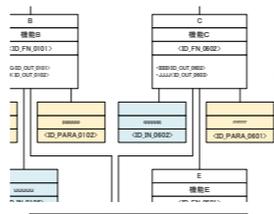
### 要求仕様の可視化と詳細化

### アーキテクチャモデルの作成

- 1. 1. 3. 4 ABCDの構成要素
- A) ABCはXXXが出来ること。<ID\_SW\_001>
- B) FFFFがYYYYすること。<ID\_SW\_002>
- C) JKKKKK, DDDDD,CCCCCがTTTTを実現す

ソフトウェア要求仕様書

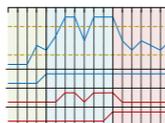
要求整理結果 (表形式)



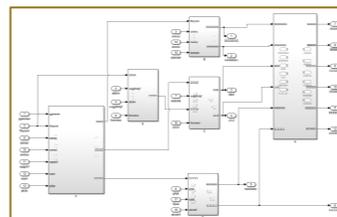
制御構成図

ID	タイプ	LabelName
<ID_IN_0001>	Simulink.Signal	in_scautimize
<ID_IN_0002>	Simulink.Signal	in_schavail
<ID_IN_0003>	Simulink.Signal	in_sigynavail
<ID_IN_0101>	Simulink.Signal	in_sig
<ID_IN_0201>	Simulink.Signal	in_sig
<ID_IN_0301>	Simulink.Signal	in_sig

インターフェース定義表



タイミングチャート



Simulinkモデル (スケルトンモデル)

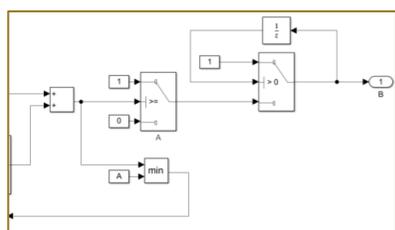
Index	ID	Summary	Type	Implemented	Verified
1	1.AAAAA (ID_SW_001)	AAAAA (ID_SW_001)	機能要件	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	2.BBBBB (ID_SW_002)	BBBBB (ID_SW_002)	機能要件	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	3.CCCCC (ID_SW_003)	CCCCC (ID_SW_003)	機能要件	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

トレーサビリティ確認結果

### 詳細設計モデルの作成

### モデルの検証

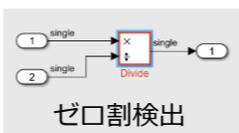
### コード生成・検証



Simulinkモデル (詳細モデル)  
システム設計レポート

実行の概要		
パス	失敗	警告
306	0	26

モデリング規約準拠確認レポート



ゼロ割検出

設計エラー確認レポート

テスト仕様レポート  
テスト結果レポート

カバレッジ解析レポート

```

/* Chart: '<S1>/Chart' */
switch (rib_Sum) {
case 0:
break;
case 1:
/* Outputs for Functio
    
```

Cコード  
コード生成レポート

コーディング規約準拠確認レポート  
ランタイムエラー確認レポート

概要	結果	保持時間 (秒)
結果: 2022 Jan 20 13:39:42	2	138.845
新規テストケース: 1	2	138.845
反復: 1	120.565	
反復: 2	18.039	

テスト仕様レポート  
テスト結果レポート

項目	達成	NCDC	テストメント	機能	開発者確認
7	100%	100%	100%	100%	100%
8	100%	100%	100%	100%	100%
9	100%	100%	100%	100%	100%

カバレッジ解析レポート

# 4. MBDプロセス再構築プロジェクト

## 要求仕様の可視化と詳細化

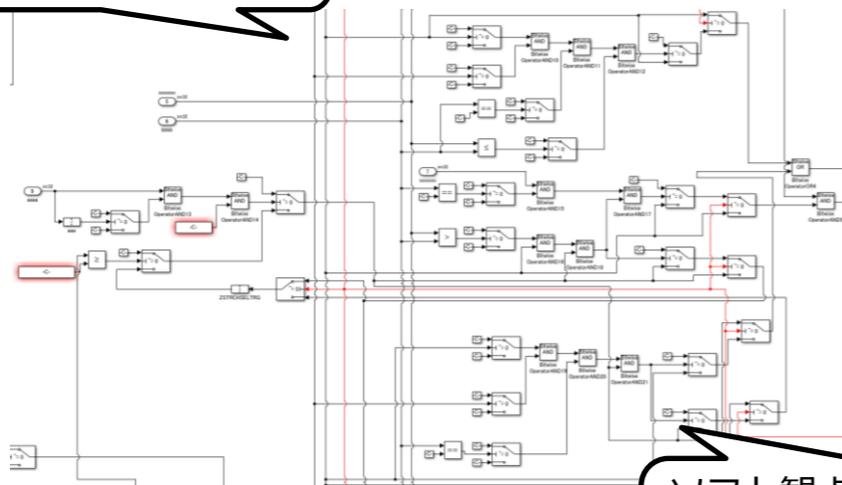
### 従来の設計方法

ドキュメントベースの要求仕様書



各ロジック設計担当が、直接にSimulinkモデルを作成

ロジックとして、  
機能的には正しく動作する。



Simulinkモデル

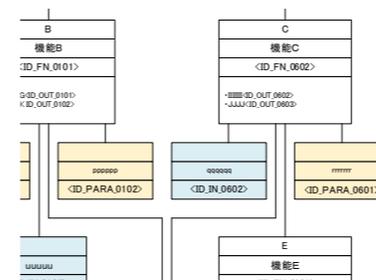
ソフト観点では  
・機能分割が曖昧  
・カバレッジの達成が困難

### 再構築後の設計方法

ドキュメントベースの要求仕様書



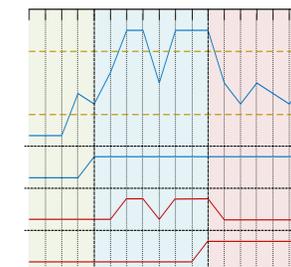
モデル作成前にソフト的観点も含めて、機能分割を実施する。



制御構成図

ID	タイプ	LabelName
<ID_IN_0001>	Simulink.Signal	in_ecuinitialize
<ID_IN_0002>	Simulink.Signal	in_xchavail
<ID_IN_0003>	Simulink.Signal	in_sigsynavail
<ID_IN_0101>	Simulink.Signal	in_sig
<ID_IN_0201>	Simulink.Signal	in_zsig
<ID_IN_0301>	Simulink.Signal	in_sigx

インターフェース定義表



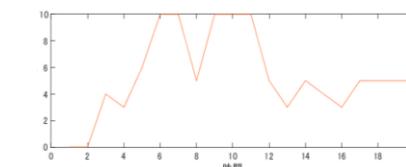
タイミングチャート

成果物は、モデル設計時に流用可能



スケルトンモデル

モデルIF定義



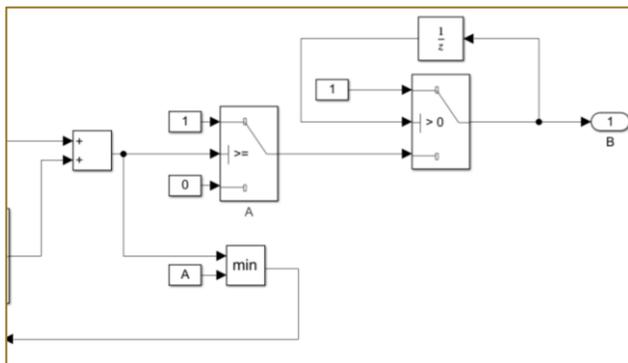
テストケース・期待値



# 4. MBDプロセス再構築プロジェクト

## モデルの検証

### 従来の設計方法



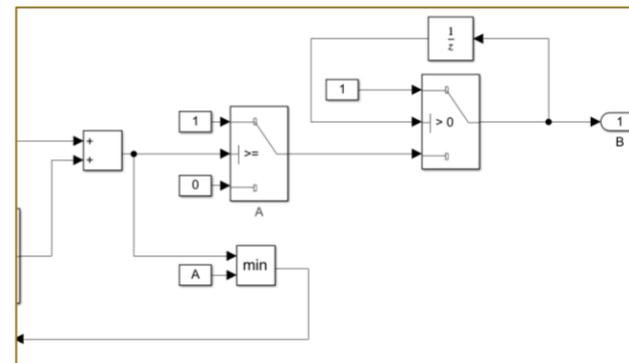
Simulinkモデル

マニュアルでのチェック, 検証を実施。

- モデルレビュー
- カバレッジ計測
- 要求-テストトレース

- 作業負荷が高い
- 見過ごされて, 後工程で発見されると, やり直しが大変。

### 再構築後の設計方法

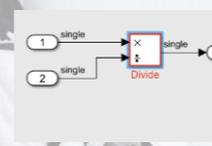


Simulinkモデル

ツールによる自動検証

実行の概要

パス 306  
失敗 0  
警告 26



規約準拠確認

静的解析

テスト仕様・結果レポート

カバレッジ解析

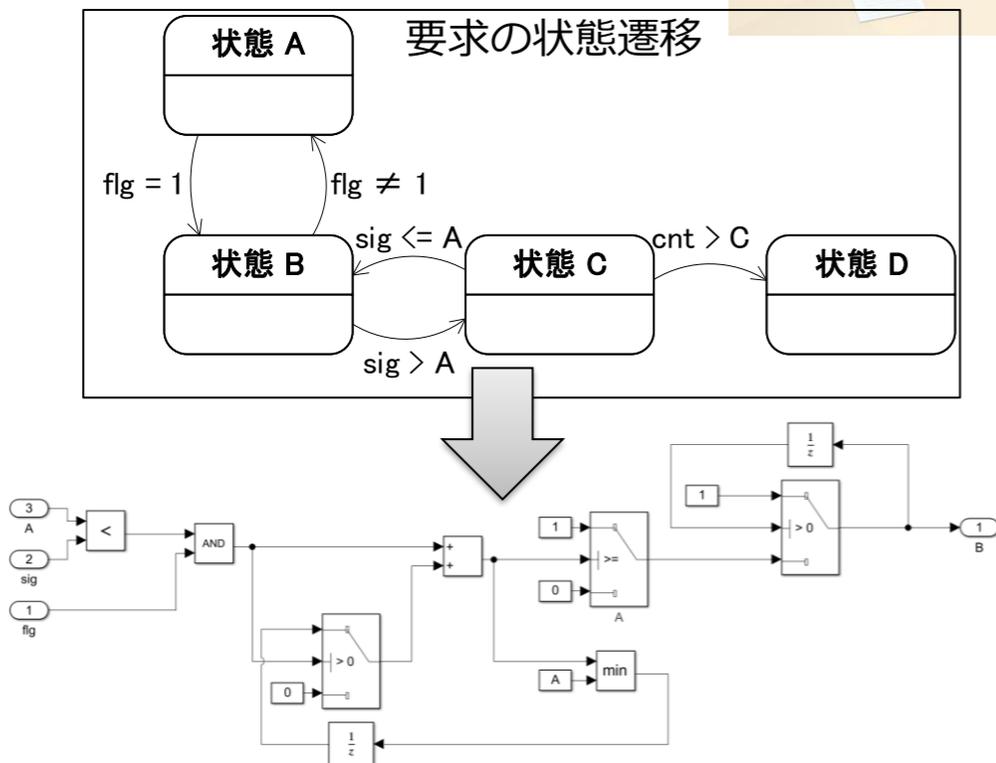
- 作業負荷が大幅に低減された。
- 人的ミスが防止できる。
- カバレッジ未達のテストケースアドバイスもあるため, カバレッジ計測実施のハードルが下げられる。

# 4. MBDプロセス再構築プロジェクト

## その他の得られたこと

### 従来の設計方法

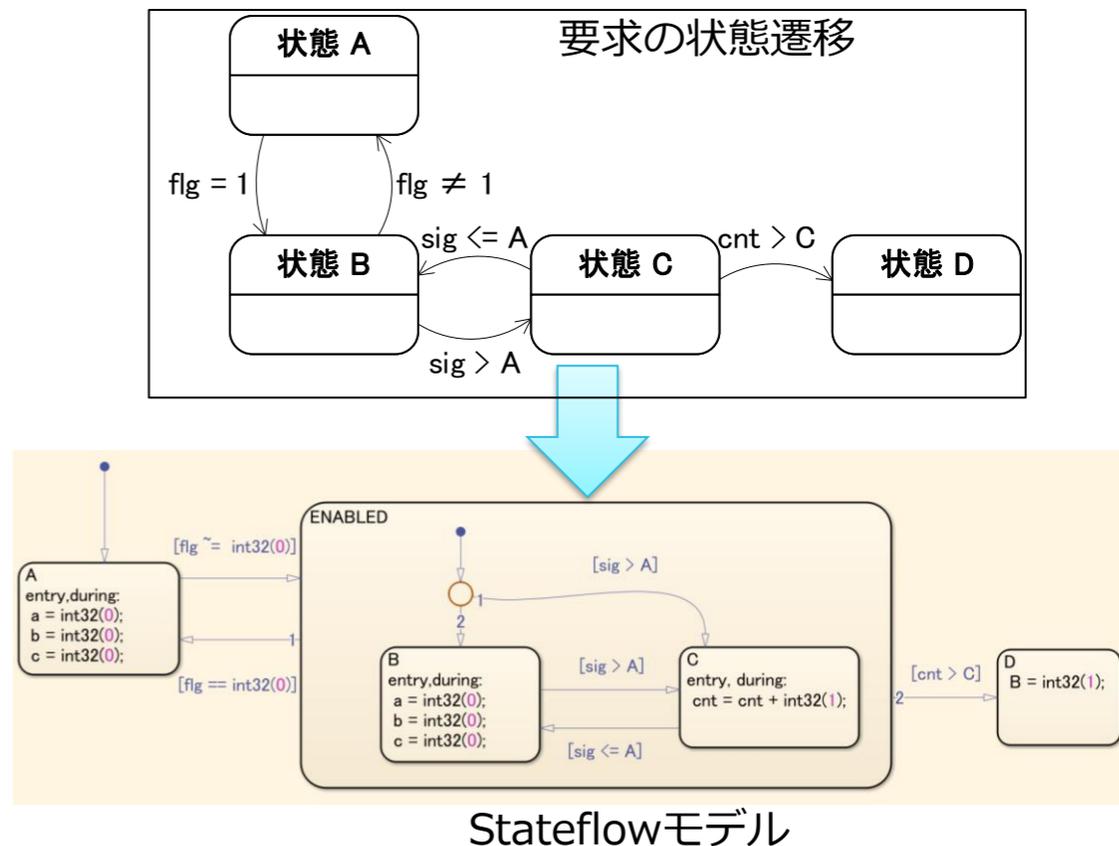
- 困りごと（Stateflowが使えていなかった）
  - 要求仕様は**状態遷移図**で提示され、**Simulinkモデルに変換**していたので、トレース、検証を困難にしていた。
  - モデルの**演算内容を解読するのが困難**であった。



作成されたSimulinkモデル (1)

### 再構築後の設計方法

- 以下のメリットにより、Stateflowを活用する方針とした。
  - **可読性が上り**，レビューに最適である。
  - 状態遷移表を作成すれば、**テストシナリオが容易**に作成できる。
  - **メンテナンス性が向上**。



Stateflowモデル

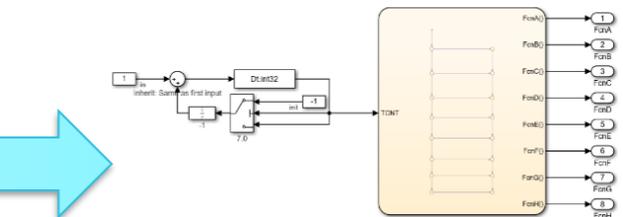
## 4. MBDプロセス再構築プロジェクト

### その他の得られたこと

- 従来の設計方法で**ハンドコードしていた機能のモデル化に成功**した。
  - ✓ 出力されるコードが、ハンドコードの方が**可読性、効率良かった**ため、モデル化していたが、コード生成していない箇所があった。（良いモデル作成方法が分からなかった。）
  - ✓ モデルからハンドコードしていたので、**バグが含まれることが多かった。**

本プロジェクトのスコープとして捉えていなかったが、**進捗会で相談**

 ソースコードを提示。  
検討を依頼。



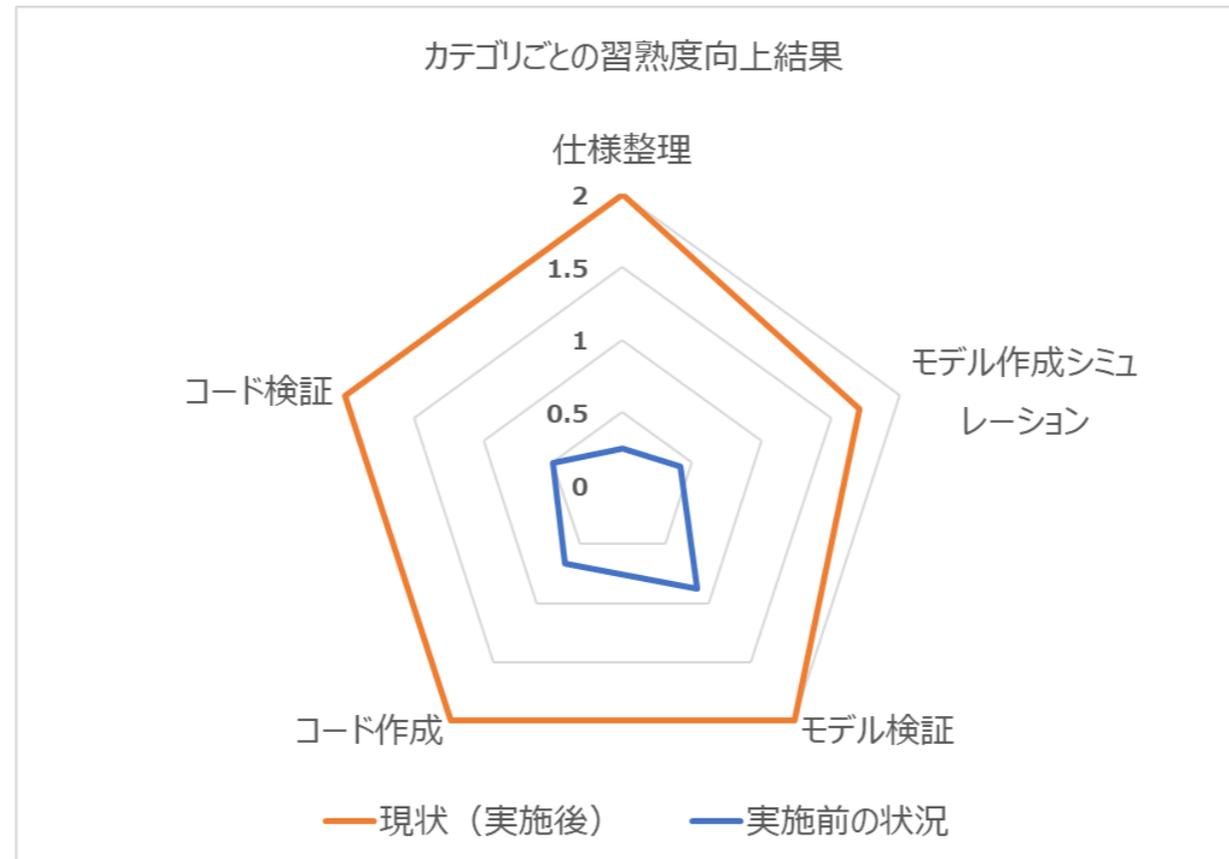
意図した機能・意図したソースコード生成可能な**モデルを提示**いただいた。

MathWorks様で検討

## 4. MBDプロセス再構築プロジェクト

### 各プロセスの習熟度効果確認

- 従来の設計方法から、**大きく改善できる**見込みを得られた。
  - ✓ 各プロセスにおいて、手動により作業していた項目をツールを利用することで**効率的に実施出来る**見込みを得られた。
  - ✓ 個人の力量に頼っていた部分もツールを利用することで、レベルの底上げが可能となり、**品質の向上**に繋がると考えている。



## 4. MBDプロセス再構築プロジェクト

### プロジェクトの振り返り

#### 良かった点

1. 約1年間ツールの貸与を受け、習熟度の向上、必要性の理解が深まった。  
⇒ツールのメリット、デメリット、採用可否が整理できた。
2. システム要求から図、表、モデルを使ったソフト仕様への機能分解方法が明確できた。
3. 社内開発プロセスの更なる改善課題が整理できた。
4. 従来できていなかったことが、できるようになった。  
⇒ツールによるモデル解析、カバレッジ計測、Stateflowの活用、ハンドコード部のモデル化

#### 苦勞した点

1. 約1年間、専属で人員を確保すること。

## 4. MBDプロセス再構築プロジェクト

### 課題と今後について

#### 1. システム仕様・設計の曖昧さの削減

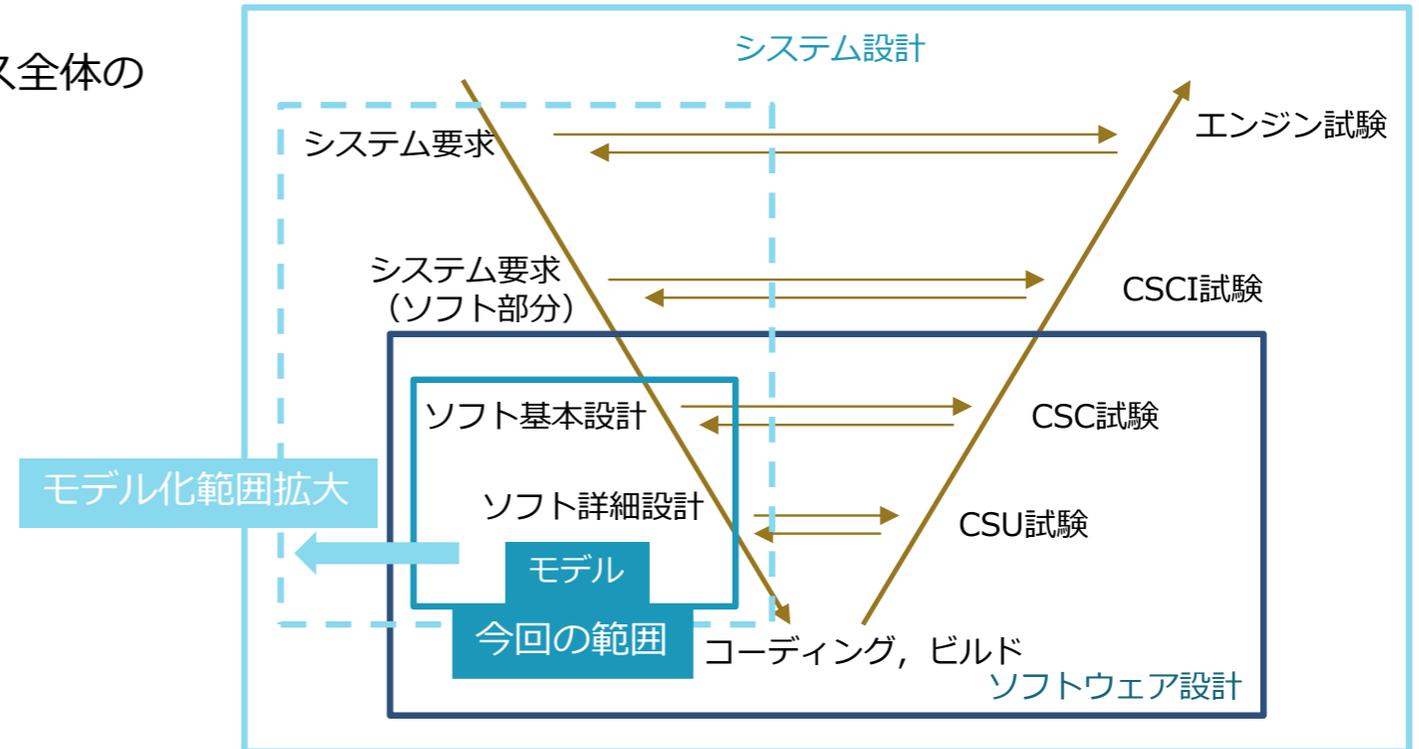
- ✓システム設計のモデルベース化  
⇒モデル化範囲を拡大して、製品開発プロセス全体の効率化を検討する。

#### 2. ソフトウェア開発工数の削減

- ✓モデリング規約準拠確認の効率化  
⇒社内モデリング規約確認の自動化
- ✓モデルレビュー資料作成の効率化  
⇒モデルレビュー資料作成の自動化
- ✓検証プロセスの効率化  
⇒カバレッジ計測実行等の自動化

#### 3. オートコード・ツールの選定

- ✓現利用オートコード・ツール, Embedded Coder, 他オートコード・ツールについて, 性能面 (メモリサイズ, 実行時間など) による評価を進めて選定する。



## 5. まとめ

## 5. まとめ

1. 航空機用エンジン制御ソフトウェアの更なる品質・開発効率改善のために、MathWorks様ご支援の基に、MBDプロセス改善プロジェクトを実施した。
2. 従来利用できていなかった各種ツールを使用することで、従来の設計方法から、大きく改善できる見込みを得られ、今後の改善課題を明確にすることが出来た。

**最後に、約1年間の長期にわたり活動を支援いただきました  
MathWorks 袁様、大越様、柳原様、道後様、犁様  
に厚く御礼を申し上げます。**

ご清聴ありがとうございました

**IHI**

**Realize your dreams**