

# 航空機認証のDXに関する研究開発

2024年12月3日(火)

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 航空技術部門  
航空機DX技術実証 (XANADU) プリプロジェクトチーム

荻巣敏充

1. Kプロ認証DXの活動骨子
2. Kプロ事業で構築するプロセスの全体像
3. CbAの関連用語・キーワード
4. CbAに関する世界の動向
5. 航空機の設計・製造・認証等のデジタル技術を用いた開発製造プロセスの高度化技術の開発・実証  
②認証DXに関する研究開発（Kプロ認証DX）
  - 5-1 Kプロ認証DX 構造CbAの取組
  - 5-2 Kプロ認証DX 飛行性CbAの取組
  - 5-3 Kプロ認証DX 耐雷CbAの取組
6. まとめ

# 1. Kプロ認証DXの活動骨子



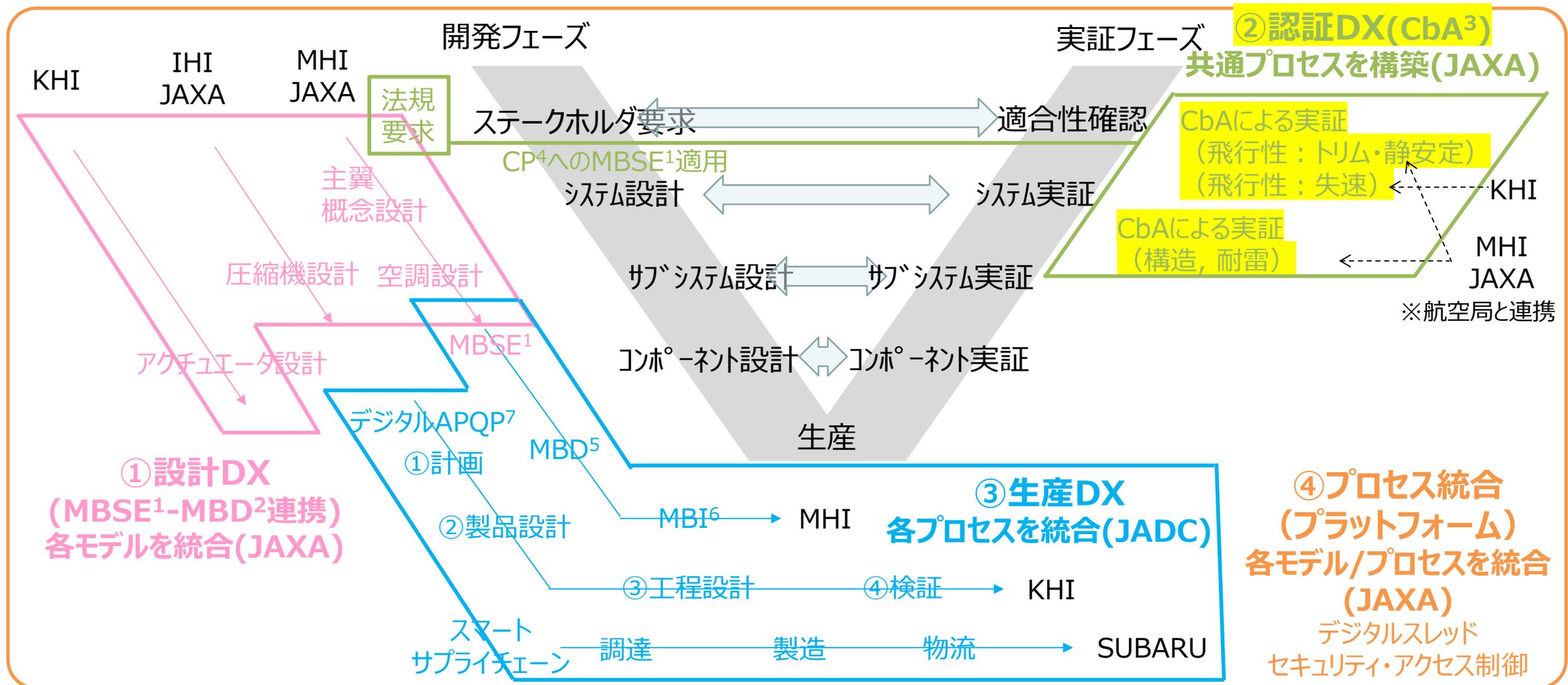
## Kプロ事業では設計DX、認証DX、生産DX、プロセス統合（DXプラットフォーム）に取り組む

フェーズ	概要	担当機関
設計DX	Model-Based Systems Engineering (MBSE)とModel-Based Development (MBD)の連携に基づくプロセス、及びリファレンスモデルを構築	JAXA IHI KHI MHI
認証DX	国際的な信頼性保証フレームワークとの連携を図りつつ、認証試験を解析で代替するCertification by Analysis (CbA)のプロセスを構築し、実用性の高いガイドラインを作成する	JAXA KHI MHI
生産DX	デジタル技術を活用したAdvanced Product Quality Planning (APQP)、Model-Based Definition (MBD)とModel-Based Instructions (MBI) の連携、スマートサプライチェーンのプロセス構築	JADC KHI SUBARU MHI
プロセス統合（DXプラットフォーム）	複数組織間でのデータ連携手法、先進デジタルスレッド技術を確立することにより、設計・認証・生産フェーズの各プロセスをシームレスにつなぎ統合するための手法を開発。国際共同開発において適用可能なプラットフォームを構築	JAXA

# 2. Kプロ事業で構築するプロセスの全体像



設計/認証/生産の各フェーズのプロセスを統合し、MBSEで要求を全体にフローダウンする仕組みを構築。



<sup>1</sup>MBSE: Model-Based Systems Engineering, <sup>2</sup>MBD: Model-Based Development, <sup>3</sup>CbA: Certification by Analysis, <sup>4</sup>CP: Certification Plan, <sup>5</sup>MBD: Model-Based Definition, <sup>6</sup>MBI: Model-Based Instructions, <sup>7</sup>APQP: Advanced Product Quality Planning

# 3. CbAの関連略語・キーワード



- CbA: Certification by Analysis, 実証試験の解析による代替、解析による耐空性証明
- MBSE: Model Based Systems Engineering, モデルを使ったSE
- SE: Systems Engineering, 複数の専門領域にまたがる多様な価値を考慮しつつ全体最適を実現するためのアプローチ
- MBD: Model Based Development/Design, モデルを使った開発/設計 (例 CFD、FEMによる設計)
- V&V: Verification & Validation (CbAにおける意味は以下)
  - Verification, 検証。解析が論理的及び数学的に正しく実行されていることを確認
  - Validation, 妥当性確認。解析結果と試験結果とを比較し、要求に対して許容範囲にあることを確認
- JCAB: Japan Civil Aviation Bureau, 国土交通省航空局
- ASME: American Society of Mechanical Engineers, アメリカ機械学会
- UQ: Uncertainty Quantification, 不確かさの定量化
- VVUQ: Verification and Validation, Uncertainty Quantification
- CAF: Credibility Assurance Framework, 解析の確からしさを保証する枠組み
- MSJ: Mitsubishi SpaceJet, 三菱スペースジェット
- BBA: Building Block Approach, 単純形状の下層から複雑構造の上層に向け解析検証を積み上げる手法
- FEM: Finite Element Method, 有限要素法
- QoI: Quantities of Interest, 解析で予測する物理量
- CP: Certification Plan, 適合性証明計画
- M&S: Modeling and Simulation
- PIRT: Phenomenon Identification Ranking Table, 解析で扱う現象毎にインパクトや解析の成熟度を評価する表
- OEM: Original Equipment Manufacturer, 航空機(装備品サプライヤーと対比して完成機)を作るメーカー

## 4. CbAに関する世界の動向(構造 : CAF)



- 国際的には、ASME VVUQ のCAF (Credibility Assurance Framework) プロセスを適用し、CbAの実現を目指す議論が活発になっている。

### 内容

- ・ 航空機構造の開発・認証における、M&Sの信頼性を決定するプロセス
- ・ 信頼性を実証のエビデンス特定, 計画, 開発するための体系的なアプローチ
- ・ Validation階層 (ビルディング・ブロック・ピラミッド) の構築
- ・ CAF適用の利点: 認証プロセスでM&S適用を拡大し, 試験を削減

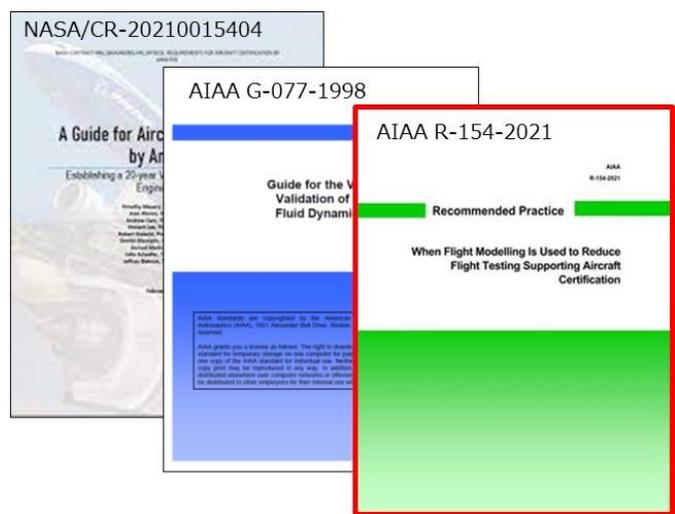
# 4. CbAに関する世界の動向(飛行性 : RP)



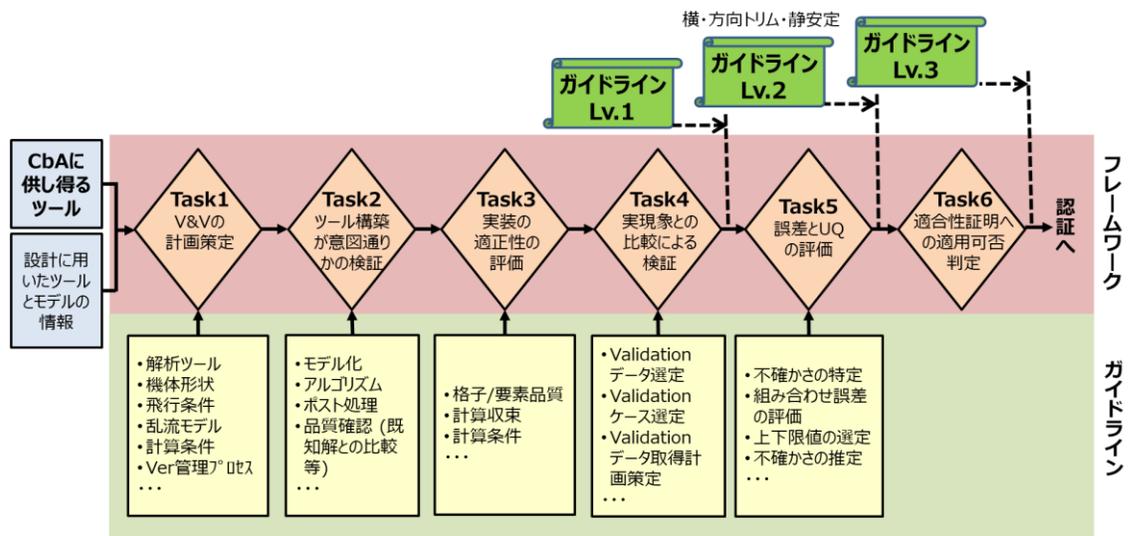
- 国際的には、近年の解析ツール(数値シミュレーション)の精度向上, 計算機性能向上, 航空機開発期間・コスト削減ニーズの高まり等により, **AIAA R-154-2021 Recommended Practice(RP)**を参考に飛行性CbAを実現するための議論が活発になっている

## 内容

- 航空機の飛行特性認証における, M&S及びV&Vの信頼性を決定するプロセス
- 実証のために必要なTASKを整理し、各TASKに必要な解析と試験を定義し、解析にUQを反映
- 一定のばらつきの範囲内で解析と試験の一致を確認することで、解析による飛行試験の一部代替を実現する



Recommended Practice



Taskとガイドラインレベル

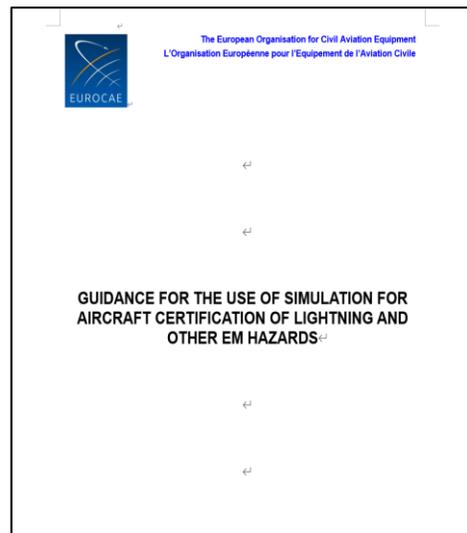
## 4. CbAに関する世界の動向(耐雷 : SAE)



- 国際的には、電磁界解析による実機試験の置き換えが主要OEM及び各国航空局担当者が参加する国際標準規格会議（SAE ARP7093 Guidance for The Use of Simulation for Aircraft Certification of Lightning）などで議論が進められている

### 内容

- 耐雷設計における出戻りを最小化、適合性証明試験ケースの削減、派生型機における改修の影響評価作業の最小化が期待できる。
- 試験に適用されてきたマージンの考え方と、併記する解析におけるマージンの考え方が議論されている。



ガイドライン



## ➤ 構造CbA

- 参加企業：MHI、JAXA
- 内容：主翼静強度に関するの規定適合性証明に活用可能な解析技術の構築  
不確かさに関する定量化手法の構築
- 成果：模擬審査を通じたCbAを適用した認証プロセスのためのガイドライン

## ➤ 飛行性CbA

- 参加企業：① MHI、JAXA ②KHI
- 内容：トリムや静安定に関する規定適合性証明に活用可能な、CFD解析及びシミュレーション技術の構築(①)  
固定翼航空機の失速速度証明に関するシミュレーション技術の検証(②)  
不確かさに関する定量化手法の構築(①,②)
- 成果：模擬審査(①)を通じたCbAを適用した認証プロセスのためのガイドライン(①,②)

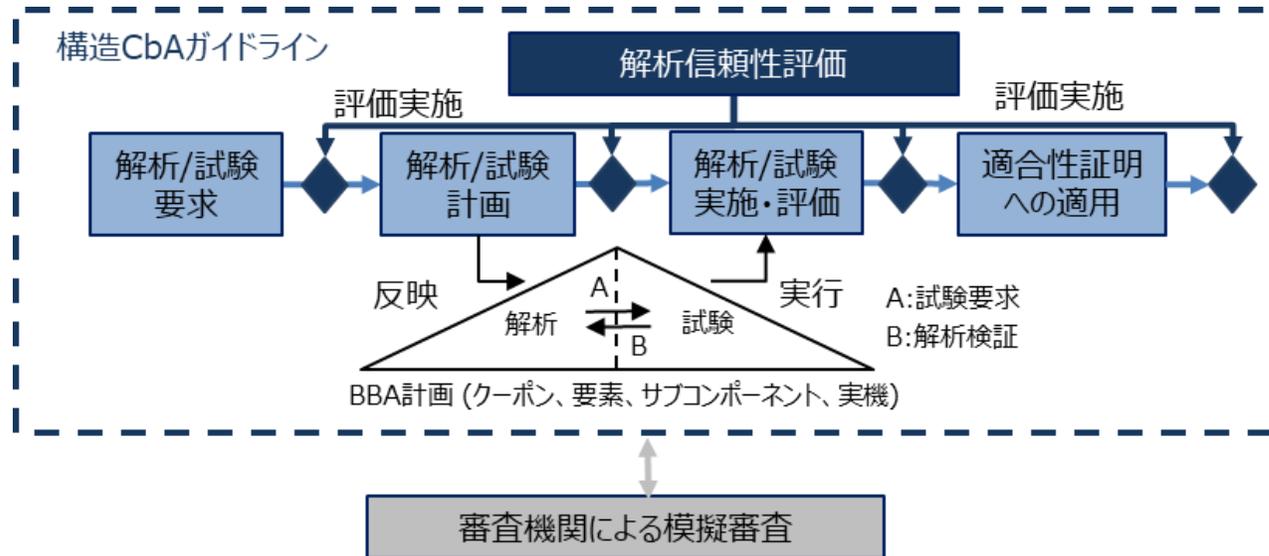
## ➤ 耐雷CbA

- 参加企業：MHI、JAXA
- 内容：耐雷に関する規定適合性証明に活用可能な電磁界解析技術の構築  
不確かさに関する定量化手法の構築
- 成果：CbAを適用した認証プロセスのためのガイドライン



## CAFの概念を導入した、将来の民間航空機開発時の構造CbA適用に向けた研究

- 研究目的：
  - A) M&S技術の成熟度向上
  - B) 信頼性保証プロセスの確立
  - C) 構造CbAに関する実践的な**ガイドラインの作成**
- 対象：三菱スペースジェット(MSJ)の主翼構造の静強度評価
- 期間：2023年～2027年



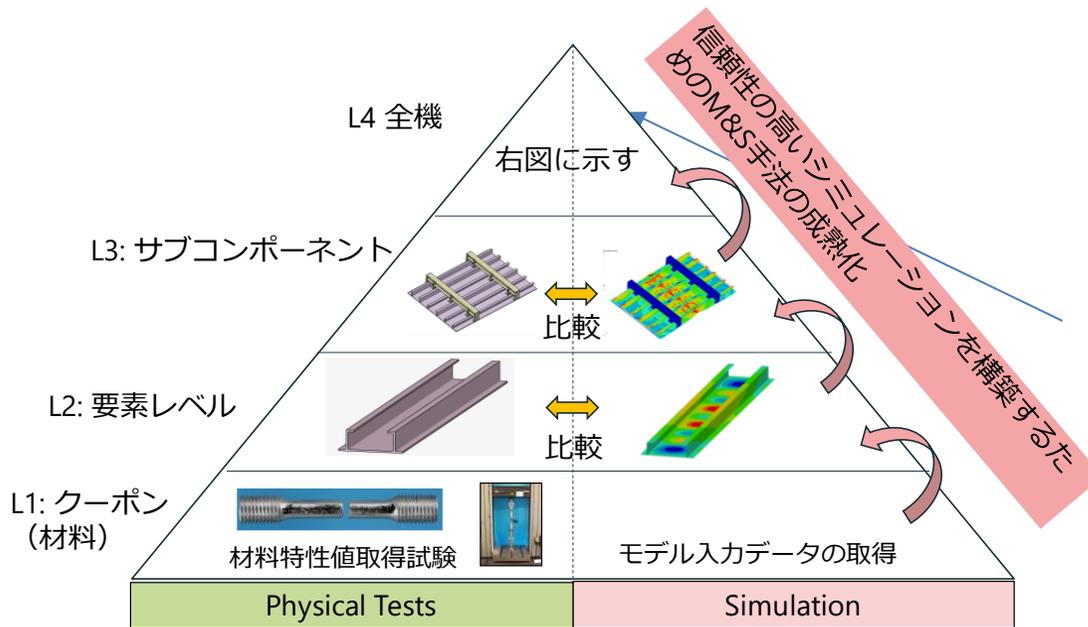
### 構造CbA活動イメージ

# 5-1. Kプロ認証DX 構造CbAの取組

※：MHI殿資料より抜粋



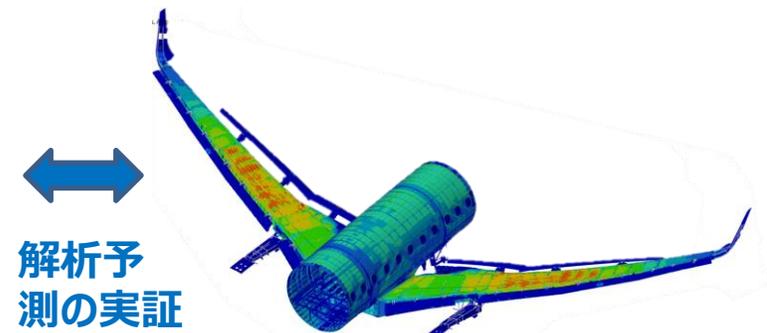
- MSJ実機構造の有限要素解析モデルの非線形解析シミュレーションで主翼構造の強度評価
- 4階層のValidation階層を設定
  1. クーポン試験 : 材料物性値の取得 (モデル入力データ)
  2. 要素レベル試験 : M&S手法の構築 (スキン座屈などの物理現象を正確に評価)
  3. サブコンポーネント試験 : 要素試験で確立したM&S手法の検証
  4. 全機地上試験 : M&S手法の予測精度を検証し, M&S能力を実証



Validation階層イメージ



MSJ全機静強度試験



主翼上曲げシミュレーション例

## 構造CbA適用に向けたUQ評価手法の構築

- これまでに単なるバラつきとして処理されていた要因の不確かさの定量化
- 特性影響要因の洗い出しが重要なポイント

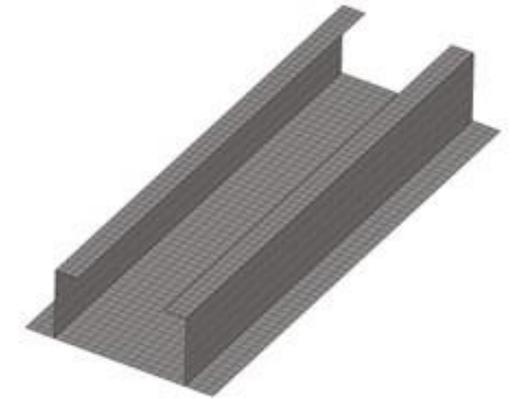
### 例：要素試験における不確かさの考え方

- 1) 右表に示すような要素レベルUQ要因を洗い出す
- 2) クーポン試験データを基にUQ要因を含んだ結果のばらつき (供試体サイズのばらつき(板厚/高さ/幅)や試験セットアップによるばらつき含む)を得る
- 3) 要素試験の解析モデルの入力値として2)赤線のデータを使用し解析を実施
- 4) 解析値として右図SimulationのS曲線を得る
- 5) 試験結果(test)をプロットしてSimulationと比較
- 6) エリアメトリック法により不確かさを面積 (水色部分) で評価する

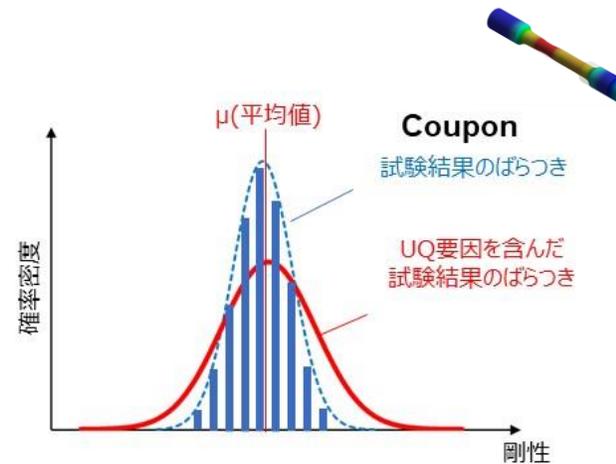
#### 1) 要素レベルUQ要因

要素試験	UQ要因軽減策
材料物性	バラつき管理
寸法のばらつき	寸法実測
モデル不完全性	モデル高精度化
その他	

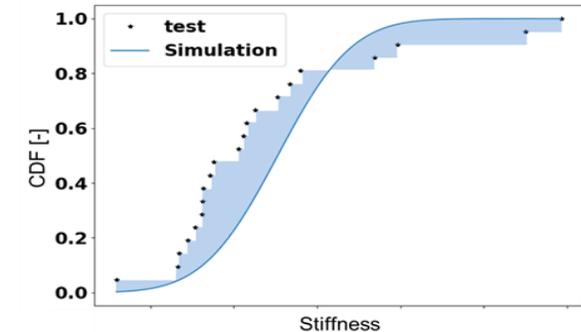
#### 3) 要素試験解析モデル



#### 2) UQ要因含む結果のばらつき例



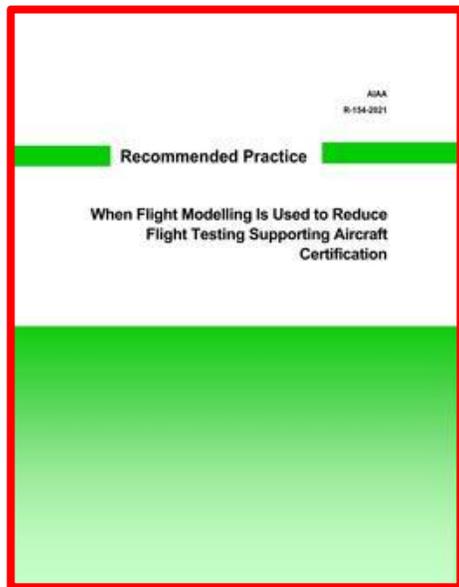
#### 4) Simulation、5)実験値及び6)面積



エリアメトリックによる評価

## 背景と目的

- 航空機の開発や型式証明には多くの試験が必要。しかし、近年の航空機の高度化に伴い、認証業務、認証取得のための試験も複雑化しており、開発期間や開発コストの面が課題。そのため、認証業務を効率化する手法の開発が必要。
- 飛行性CbAでは、その実現可能性の観点から、航空機の認証取得における飛行試験を代替する数値シミュレーションの成熟度が最も高い縦及び横・方向のトリム・静安定をテーマとする。
- CFD等を活用した解析ツールの成熟度を向上させつつ、国際ワーキンググループにて作成・公開されているAIAA Recommended Practiceに沿って縦及び横・方向のトリム・静安定のCbAプロセスを検討・構築・実践し、解析の信頼性確保のフレームワークを含むCbAで参照可能な**ガイドラインを作成する**。

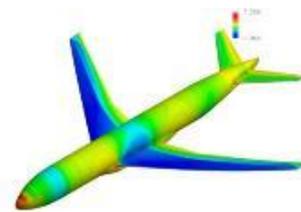
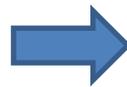


AIAA R-154-2021

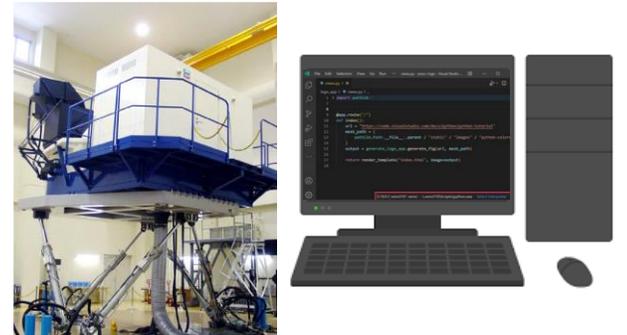


Source : mhi.com

飛行試験



CFD

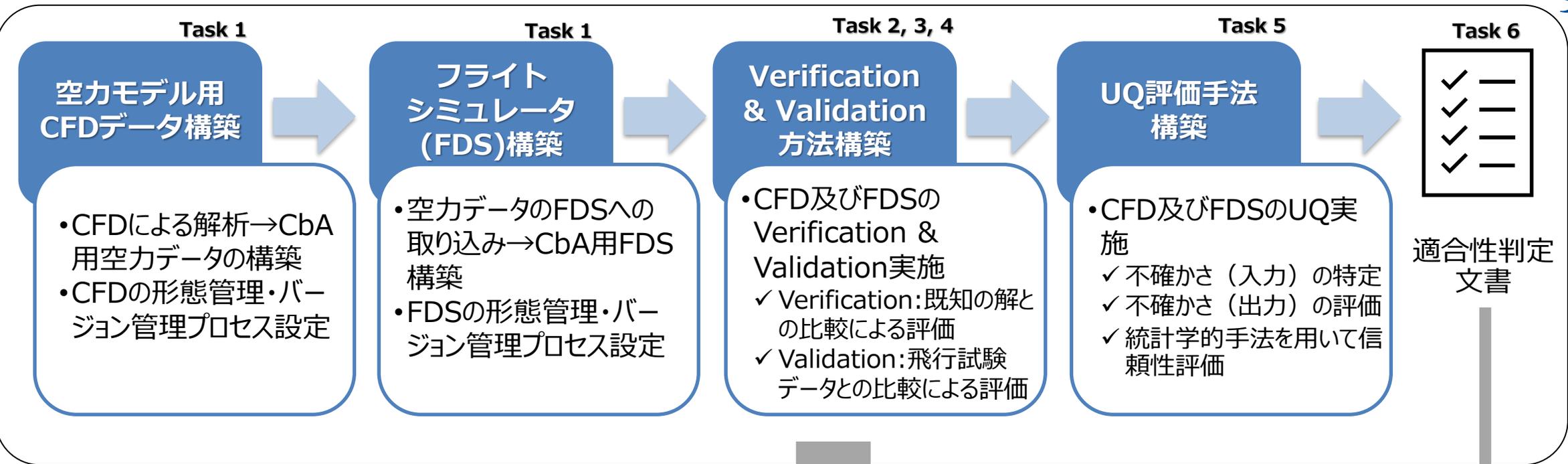


フライトシミュレータ

# 5-2. Kプロ認証DX 飛行性CbAの取組



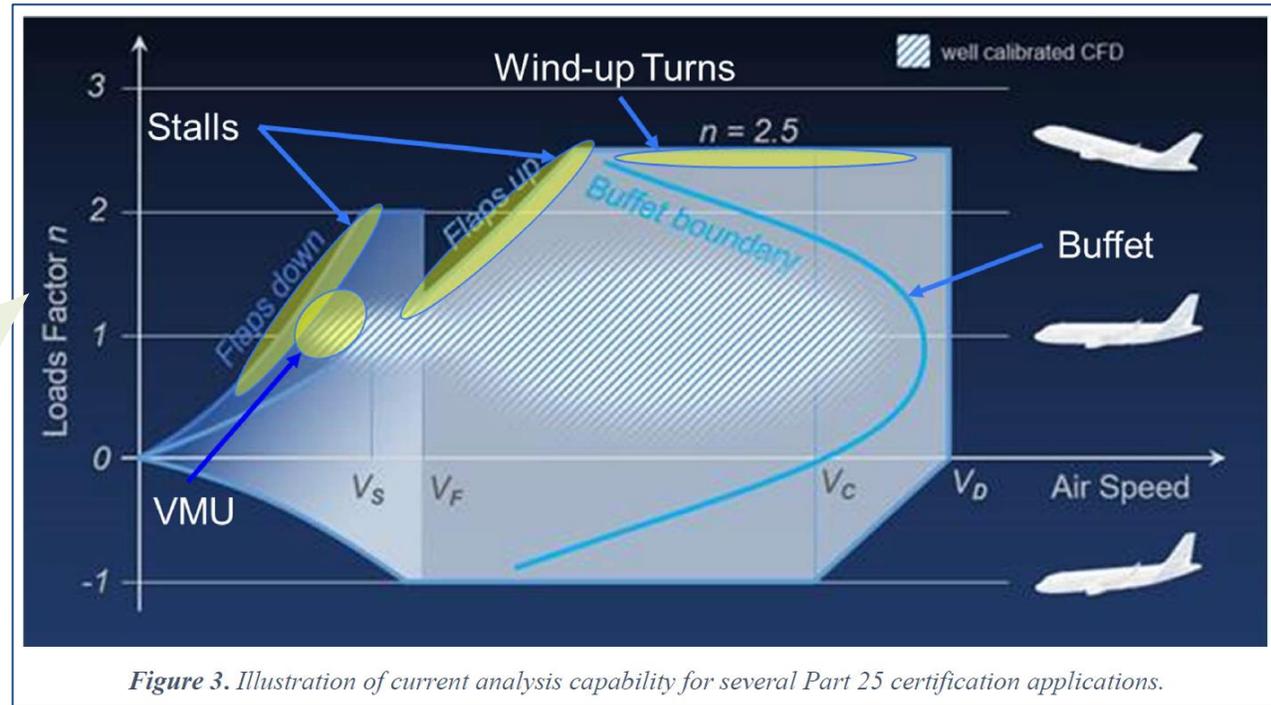
## 実施内容





## 背景と目的

- 認証試験の一部を解析で代替する「解析を援用した認証」(Certification by Analysis: CbA) の議論が活発化しており、飛行性認証に関しては、各国の航空機メーカー、研究機関、および認証当局による国際ワーキンググループを中心に議論が進められている。
- 飛行性CbAの中でも「失速速度の決定」をテーマとし、実機開発への適用を可能とする解析の信頼性保証のガイドラインを、模擬的なプロセスの試行を通して構築する。



失速速度に関する試験は初期の飛行試験フェーズで実施され、多くの試験回数を必要とする上に、機体の急激な挙動や振動など、リスクを伴う試験であり、CbA適用によりコスト、スケジュール、リスクの軽減が期待される。

フライトエンベロープにおける数値シミュレーションの適用可能領域と飛行性認証項目の模式図



## 試験計画

### 弾性体模型の風洞試験

機体振動特性、バフェットによるコクピット振動の取得

CFD-CSD連成解析検証

失速速度検証

### 剛体模型の風洞試験

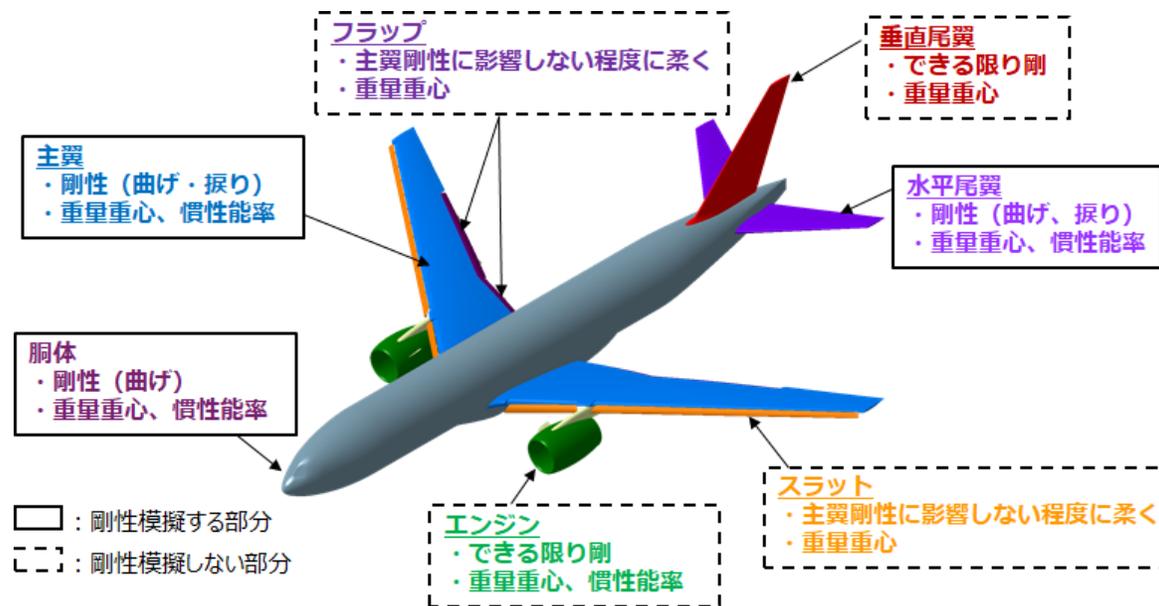
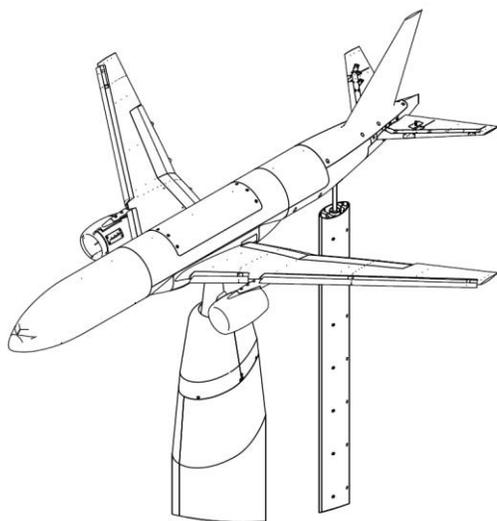
空気力、表面圧力、速度分布の取得

CFD解析検証

### 弾性体模型の弾性特性取得試験

慣性、剛性、振動特性の取得

CSD解析検証





### 背景

- 電気及び電子系統の防禦(間接雷耐雷)の証明は重要な証明項目
- 従来手法は実機を用いた全機耐雷試験等、開発費・開発期間に与える影響が大きい。
- 電磁界解析による実機試験の置き換えが主要OEM及び各国航空局担当者が参加する国際標準規格会議などで議論が進められている。  
(SAE ARP7093 Guidance for The Use of Simulation for Aircraft Certification of Lightning)

### 目的

- MSJをリファレンス機体として上記ガイダンスのプロセスに従いつつ、耐雷CbAの解析手法を開発する。
- CbA証明の際に必要な技術的課題を把握する。
- 得られた知見をガイドラインにまとめる。





## 要素試験と解析事例

### 比較的単純化した構造物と電線モデル

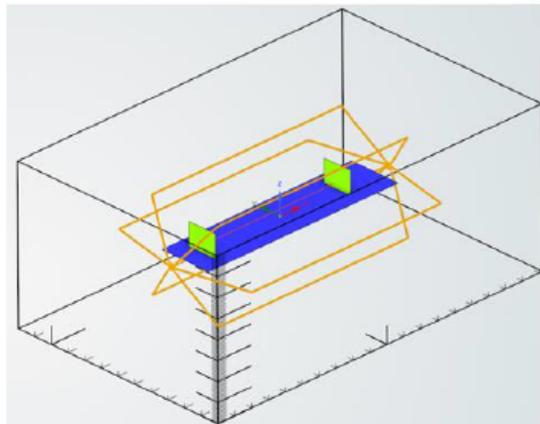
雷電流波形との相互作用を確認・理解する。

- 機体のスキンを模擬したアルミ板上に電線を艤装状態を模擬した形で配置。
- 電線に隣接する電線束の影響や、計測電線の様々な特性による影響を確認。

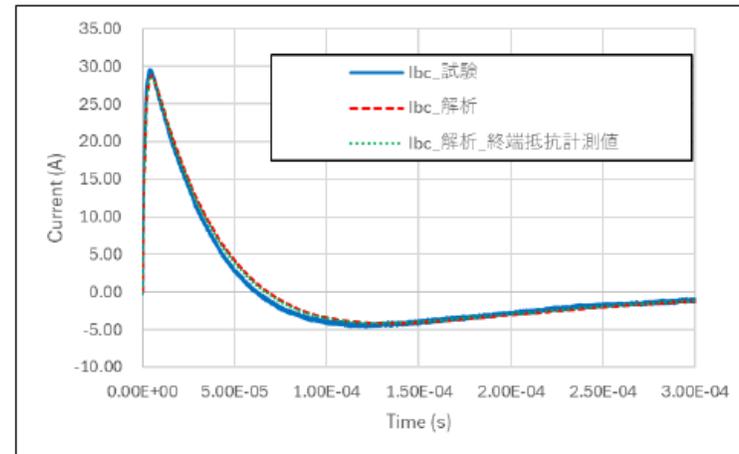
ベースとなる1本の電線に発生する電流について解析と試験を比較した結果の例を示す。

### その他要素試験

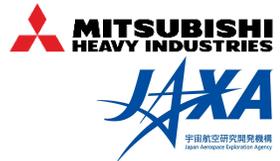
- 機体の構造や装備品を固定するファスナの抵抗測定
- 電線のシールド線と芯線の関係を示す伝達インピーダンスの測定



機体を単純化した試験供試体と解析モデル



試験結果と解析結果の比較



## 部分モデル解析

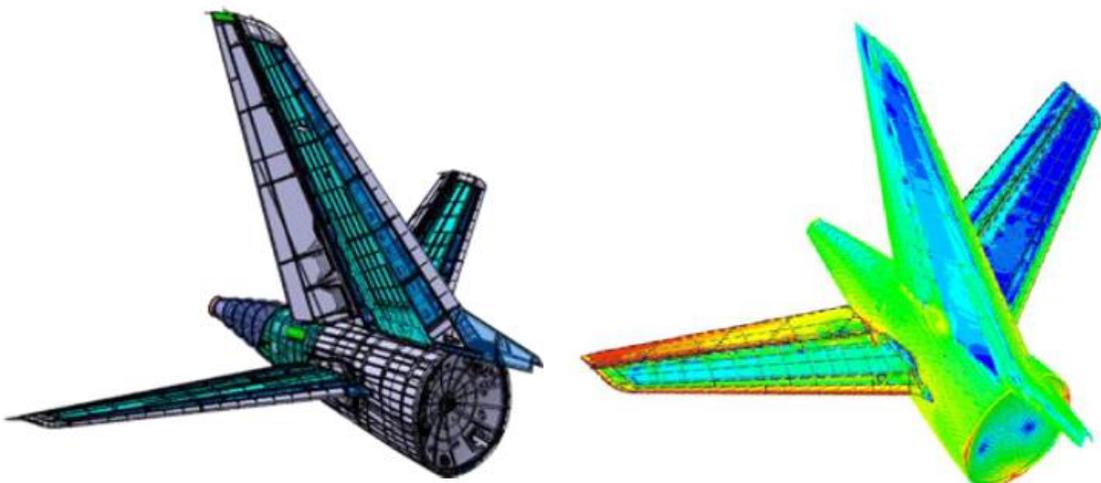
### 部分モデル解析の検討対象部位

特徴を勘案して以下の3つの部位を検討する。

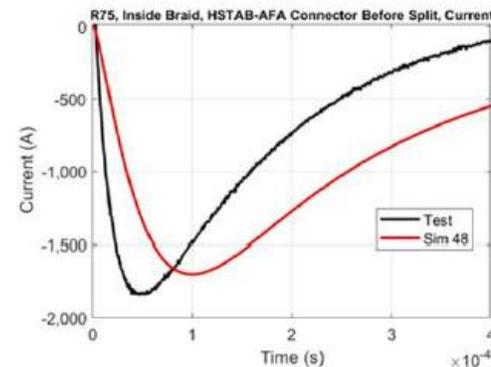
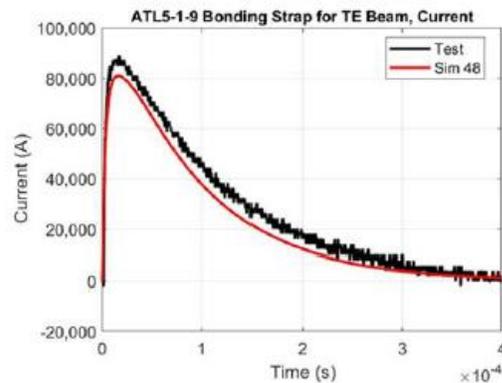
- 尾翼及び後胴部分：電線構成が比較的単純かつ複合材構造を持つ
- 主翼とベリーフェアリングを含む胴体：金属構造のうち電流経路が複雑である
- コックピット：電線ルートが複雑かつバンドル数が多い



尾翼のCATIAモデルとこれに対する初期の解析例を示す。



CATIAモデルと電磁解析モデル



試験と解析結果が合致している部分と合致していない部分の例



## 【認証DXに関する研究開発概要】

**Certification by Analysis(CbA)に不可欠なVerification & Validation(V&V)技術を世界で初めて実証する。**

⇒ 国際標準に沿った誤差要因の定量化手法、不確かさの定量化(UQ: Uncertainty Quantification)手法を構築し、解析技術を高度化する。これらを反映した**ガイドラインを作成**し、最終的にMSJをリファレンス機体とした**模擬審査によって有効性を確認する。**

### 各CbA実施項目

- **構造CbA** : クーポン/要素試験/サブコンポーネント試験/実機静強度試験、UQ評価方法の構築、ガイドライン作成
- **飛行性CbA** : CFDデータ検証/NIPC\*で妥当性確認、飛行シミュレータでシミュレーション、UQ評価方法の構築、ガイドライン作成
- **耐雷CbA** : ツール検証、感度解析、要素/部分モデルの評価、ガイドライン作成
- **CPに係るMBSE適用** : 要求とCPのモデル化、ガイドライン作成
- **CbAの模擬審査実施** : CbA活動状況の共有、模擬審査

## 謝辞

この成果は、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）委託業務（JPNP23012）の結果得られたものです。



**ご清聴いただき、ありがとうございました。**