

# MBSE (Model Based Systems Engineering) を用いた航空機のデジタル統合設計に関する研究開発



数値解析技術研究ユニット

○橋本敦、サンシカ・アンドレア、大道勇哉、金森正史

## 背景

- 1960年代から電子機器、自動車、航空宇宙機の複雑化が顕著に進展。設計手法の進化により、電子機器、自動車の開発期間は一定もしくは減少傾向。一方で、**航空宇宙機の開発期間は増加傾向に歯止めがかからない(図1)**。
- 航空宇宙機は大規模なメカ・エレキ・ソフト複合システムであり、その設計は、複数性能の実現性確認が多く、機能と製品構造の対応関係が複雑となるため、**高度な摺り合せ設計が要求される**。システム開発保証プロセス (SAE ARP 4754) で求められているトレーサビリティを確保しなければならない上、電動化、ネットワーク化等、従来システムを大きく変える新しい技術にも対応する必要がある。

⇒**Model-Based Systems Engineering (MBSE) の導入が解決策**

## MBSE

- MBSEとは、モデルを形式化された手法で適用することであり、概念検討から始まり、開発及びその後のライフサイクルにおいて、システム要求、設計、V&V活動を支援する。メリットとしては、文書ではなくSysMLを用いたシステムモデル(構造・振る舞い・要求・パラメータ制約)で厳密に定義できること(図2)、1つのモデルを共有することで効率良く維持管理できること等が挙げられる。

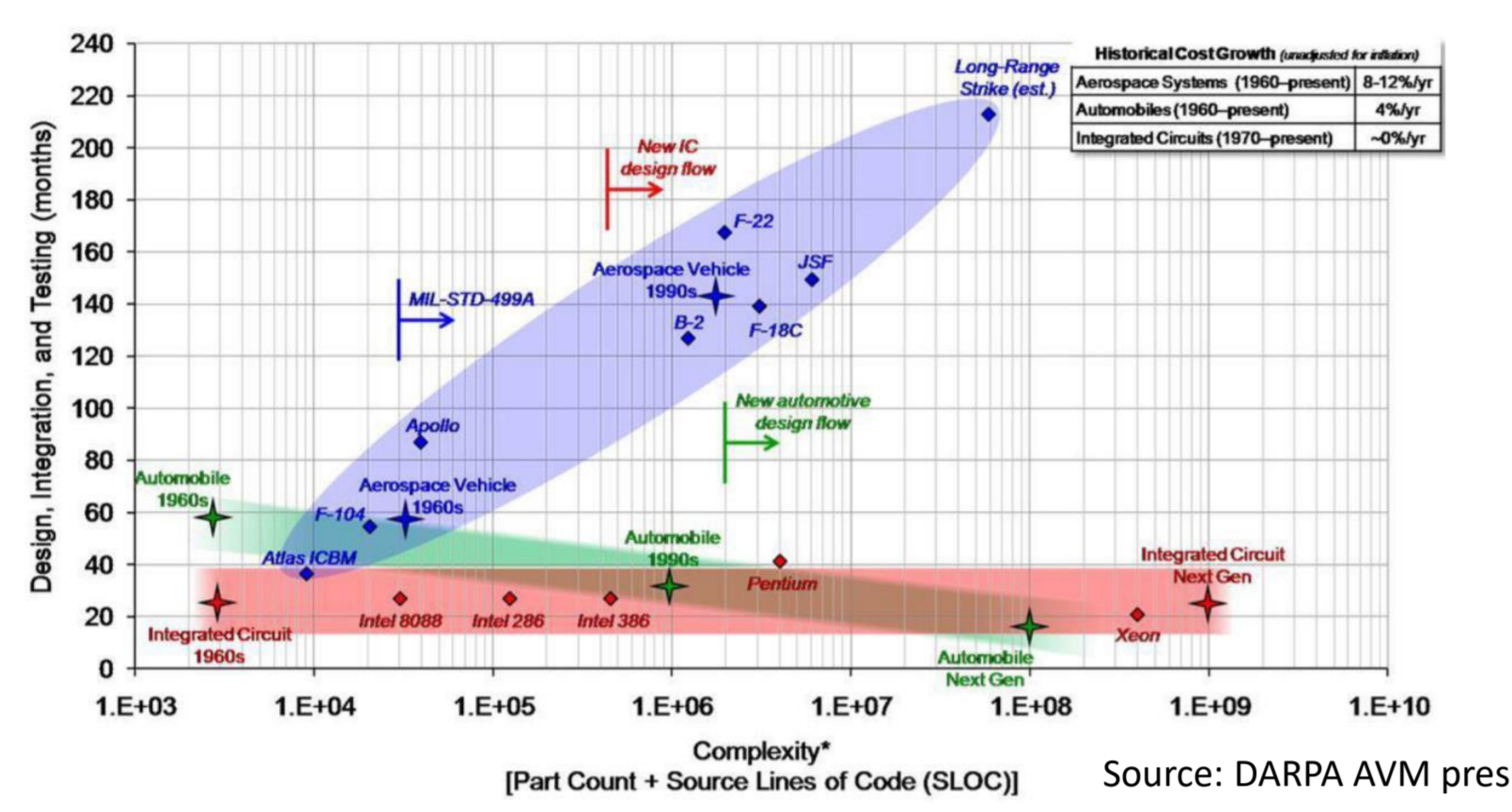


図1: 製品の複雑度と開発期間の関係

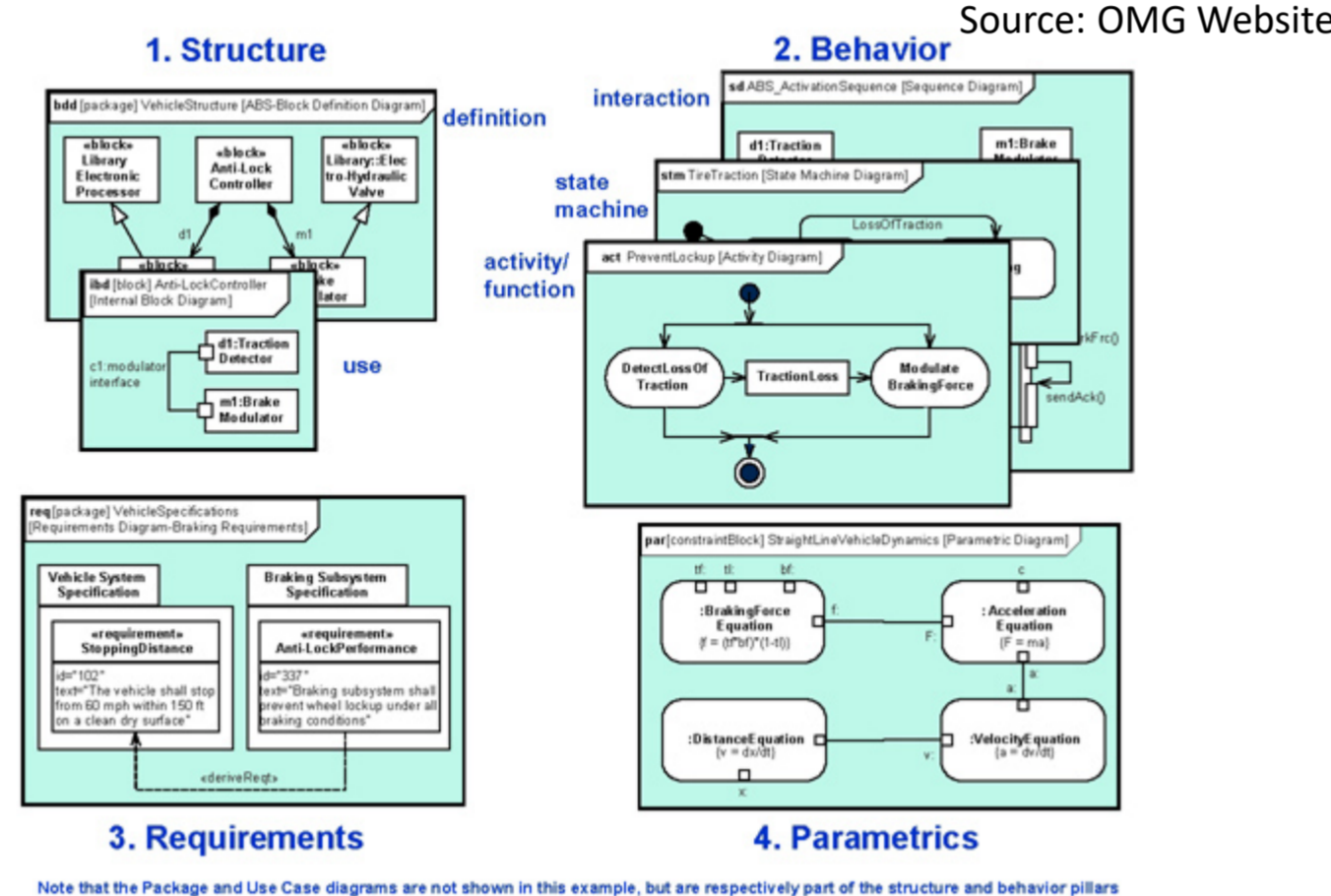


図2: システムモデル (SysML) で表現される4つの柱

## 本研究が目指すMBSEを用いたデジタル統合設計技術

- システムモデルとシミュレーションを連携させることで、システムの要求・機能・特性の妥当性評価を効率的、高精度に実施し、システムの最適化を可能にする。**航空機システムの全容と本質を定義したシステムモデルと、3D-CAEに基づく1D-CAEモデルを採用し、両者を連携する点に新規性がある(図3)**。また、**早期に検証・妥当性確認 (Early V&V) を実施することで、手戻りを防止する(図4)**。今後、トライアルケースを設定し、技術の構築及び実証を進めていく予定である。

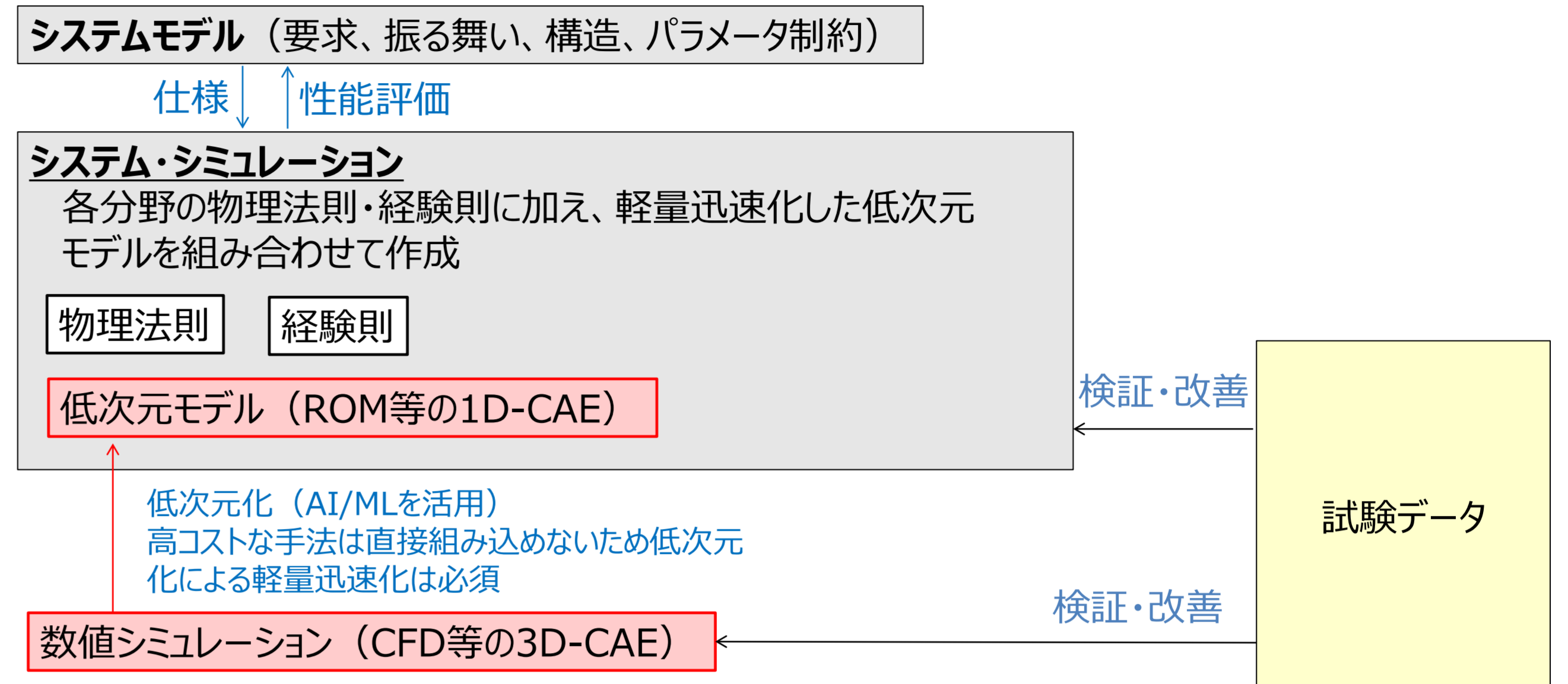


図3: デジタル統合設計技術の構成

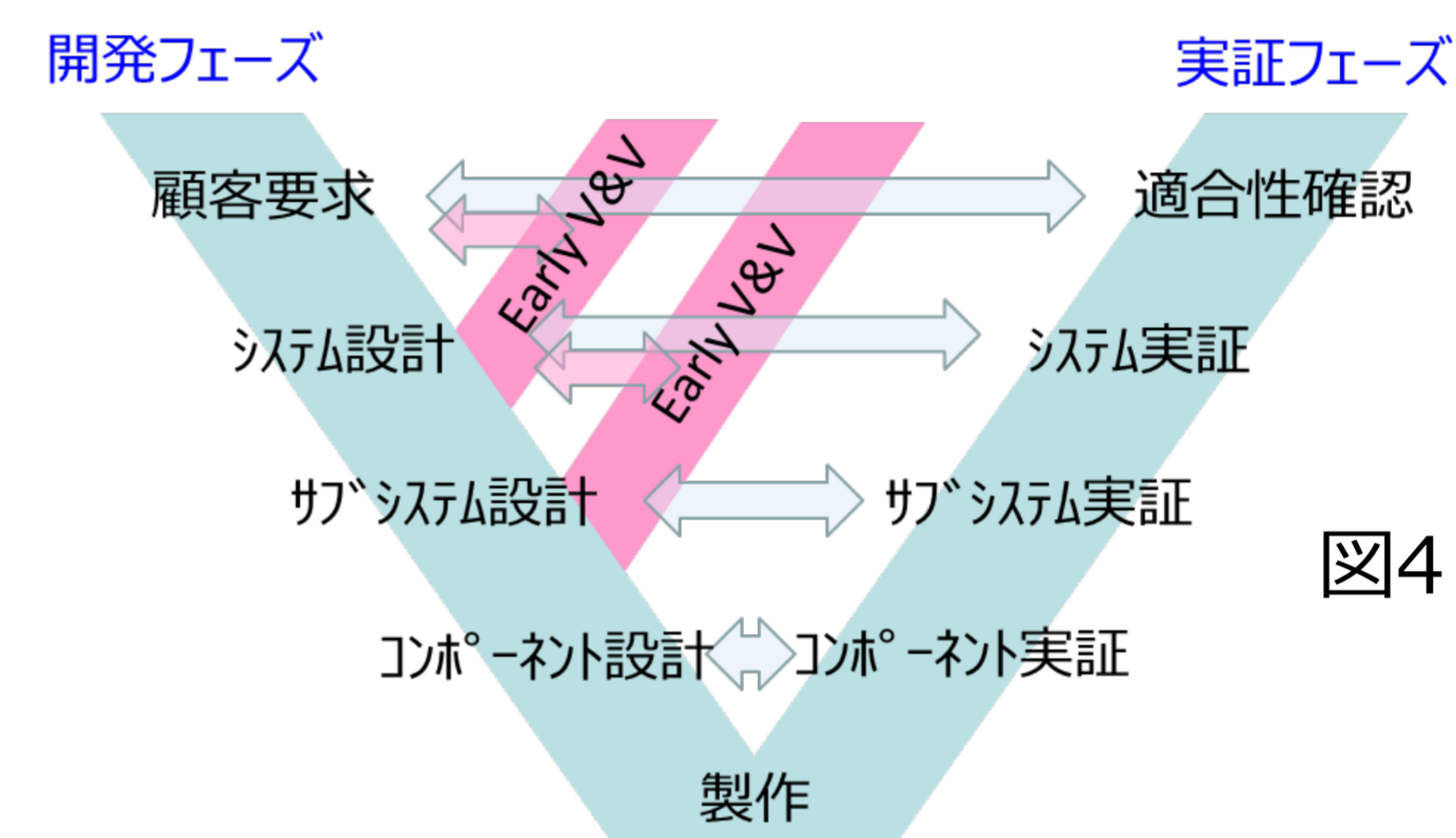


図4: MBSEを用いたVプロセス開発

## 軽量・迅速シミュレーション技術の紹介

システム・シミュレーションにも使用可能な計算負荷の小さいシミュレーション技術、及びそれを実現するための人工知能/機械学習技術の開発を紹介する。

### ①高速バフェット解析技術 (全体安定性解析)

高速・高迎角状態で飛行した際に、「高速バフェット」(翼面上の衝撃波が振動し、機体が振動する現象)が生じる。これにより飛行可能な領域が制限されるため、バフェットが発生する条件 (=バフェット・オンセット) を設計時に正確に予測する必要がある。高速バフェットを低コストかつ高精度に予測する手法として、全体安定性解析が注目されている。これまでの、複雑形状への適用が困難であったが、JAXAが開発した高速流体ソルバFaSTARをベースに全体安定性解析コード(FaSTAR-GSA)を新たに開発し、複雑形状への対応が可能になった。また、Matrix-free法(大規模行列を陽に形成しない手法)を用いることでメモリ使用量を削減することに成功し、大規模格子への対応も可能であり、世界最高性能である。

旅客機の標準モデルであるNASA-CRM形状に対して解析を実施し、JAXAの遷音速風洞試験と比較したところ、高速バフェットのオンセットを迎角の誤差±0.2度で予測可能であることを確認した。FaSTAR-GSAの3次元不安定モードと周波数も実験結果とよく一致している(図5,6)。非定常解析(URANS)と比較して10分の1の時間で計算可能であり、実用性は高い。



図5: 3次元不安定モードの比較

図6: 3次元不安定モードの構造

### ②データ解析技術による知識抽出

実験や数値解析等で得られるデータから有益な情報を抽出するためのデータ解析技術を開発している。JAXAが開発した固有直交分解(POD)・動的モード分解(DMD)コードFBasisに、Truncated Total Least-Squares (T-TLS) DMDを新たに導入し、元データにノイズが含まれていても、明瞭にモード抽出することが可能になった。

図7は、バフェット現象による主翼上面の圧力変動を非定常PSPデータで計測した結果に対し、モード抽出を実施した結果である。実験データにノイズが含まれていても、本手法を用いることで、バフェット現象に特有の圧力変動パターンを明瞭に捉えることができています。また、抽出した結果から低次元モデルを作成することも可能である。

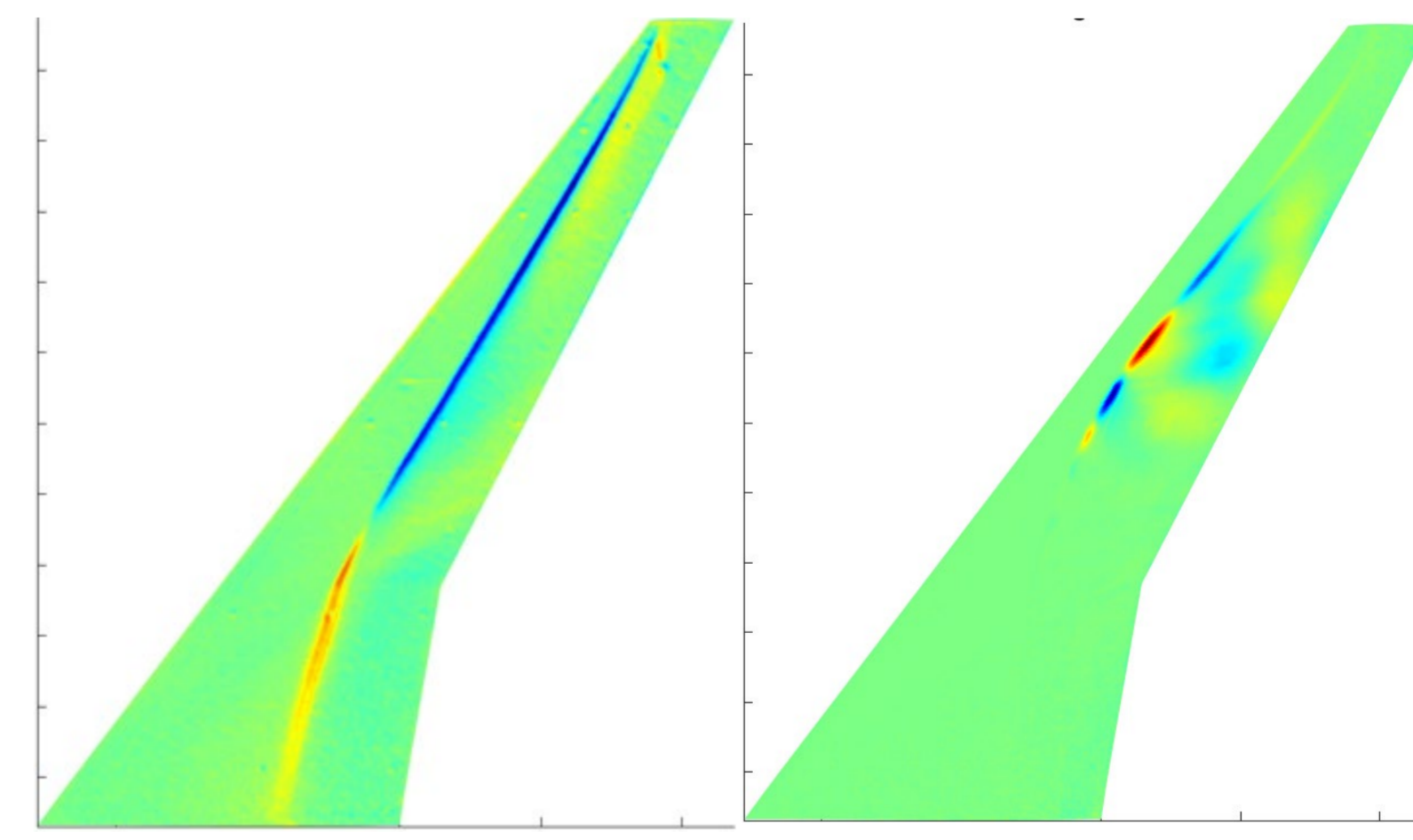


図7: NASA-CRM主翼上の感圧塗料計測データから主要な変動モードをT-TLS DMDにより抽出した結果

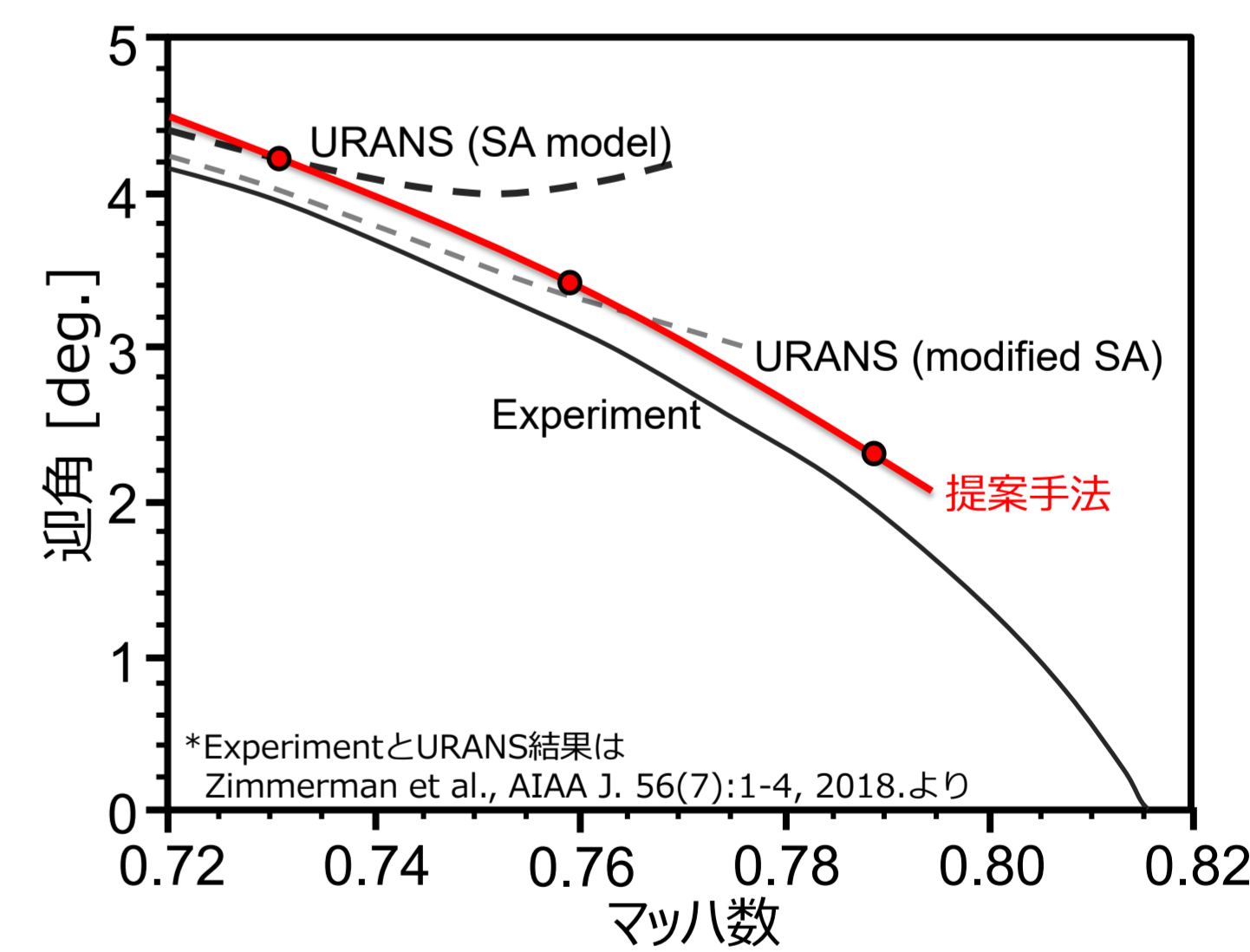


図8: 機械学習モデルによるバフェット発生迎角の予測結果 (NACA0012, Re=1e7)

### ③機械学習技術による高速バフェット予測

機械学習を用いて、計算コストの小さな定常RANSの流れ場データからバフェットオンセットを予測する技術の開発を進めている。開発中の手法は低計算コストでバフェット発生を予測できるだけでなく、従来のURANS解析等では予測の難しい高いマッハ数条件にも適用可能であることが分かっている(図8)

### ④方程式探索技術によるデータ駆動型モデリング技術を用いた乱流解析の改善

乱流現象、特に剥離を伴う乱流の再現は現在でも重要な課題である。図9に示すように、乱流モデル方程式を用いたRANS解析は解析時間が短いが、剥離現象を扱うことが困難である。そのため、剥離流れの場合、乱流の渦を直接的に解像するDESやLES、DNSといった高忠実度解析が必要になり、数週間から数ヶ月の解析時間が必要になる。しかし、これでは設計プロセスに導入するのは困難である。

そこでJAXAでは、剥離流れを再現可能なRANS解析実現を目標に、高忠実度解析データをモデル化に活かす方法論、特にデータが満たす乱流モデル方程式を自動的に導出する**方程式探索技術**に着目し、研究開発を実施している。航空機形態の高迎角流れを対象に、この技術を用いて乱流モデル方程式を改良した結果、従来のモデルと同等の解析時間で、大剥離発生時の空力特性が実験値と良い一致を示すことが確認できている(図10)。

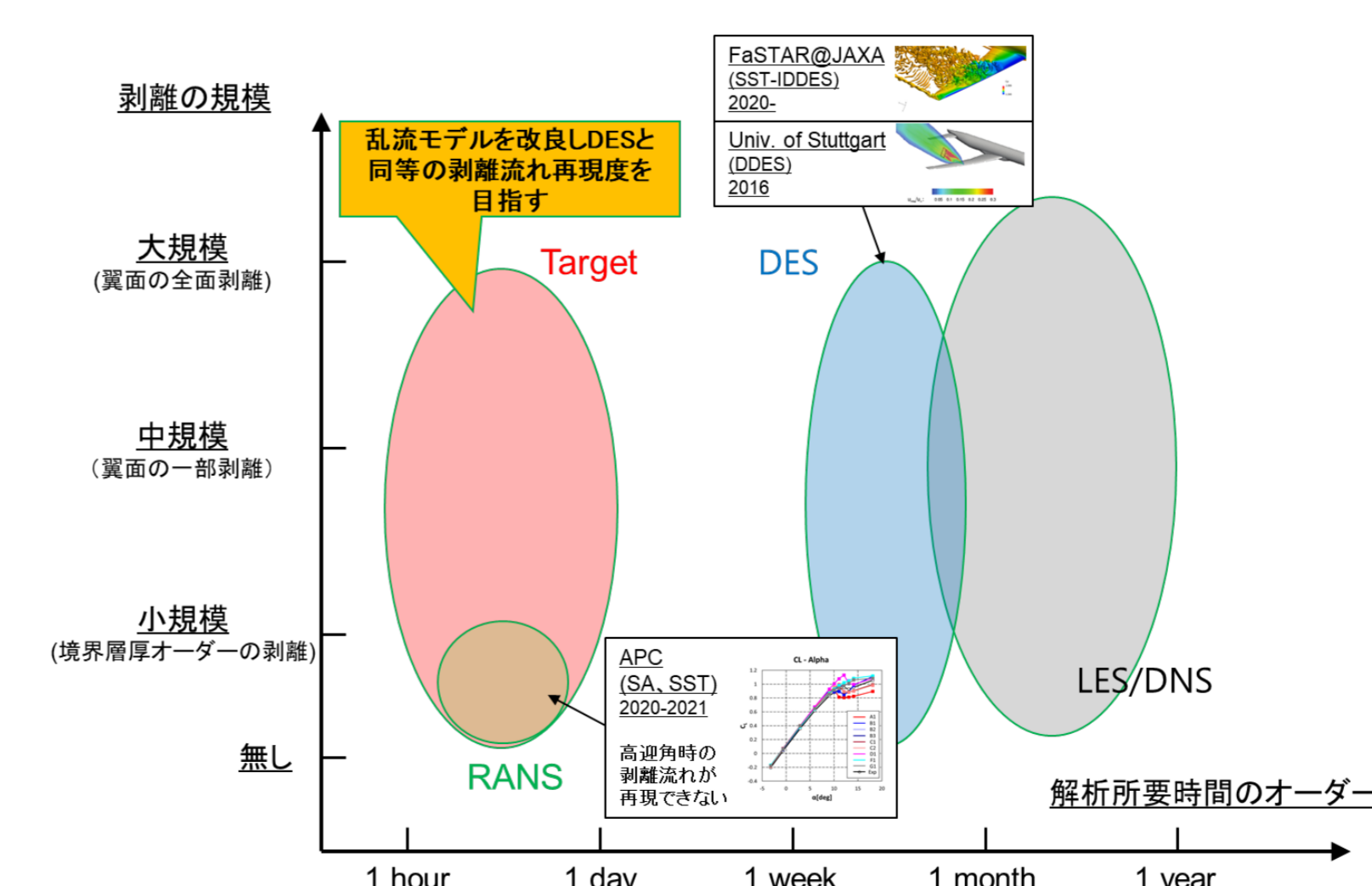


図9: 方程式探索のターゲット

※RANS: Reynolds Averaged Navier Stokes  
DES: Detached Eddy Simulation  
LES: Large Eddy Simulation  
DNS: Direct Numerical Simulation

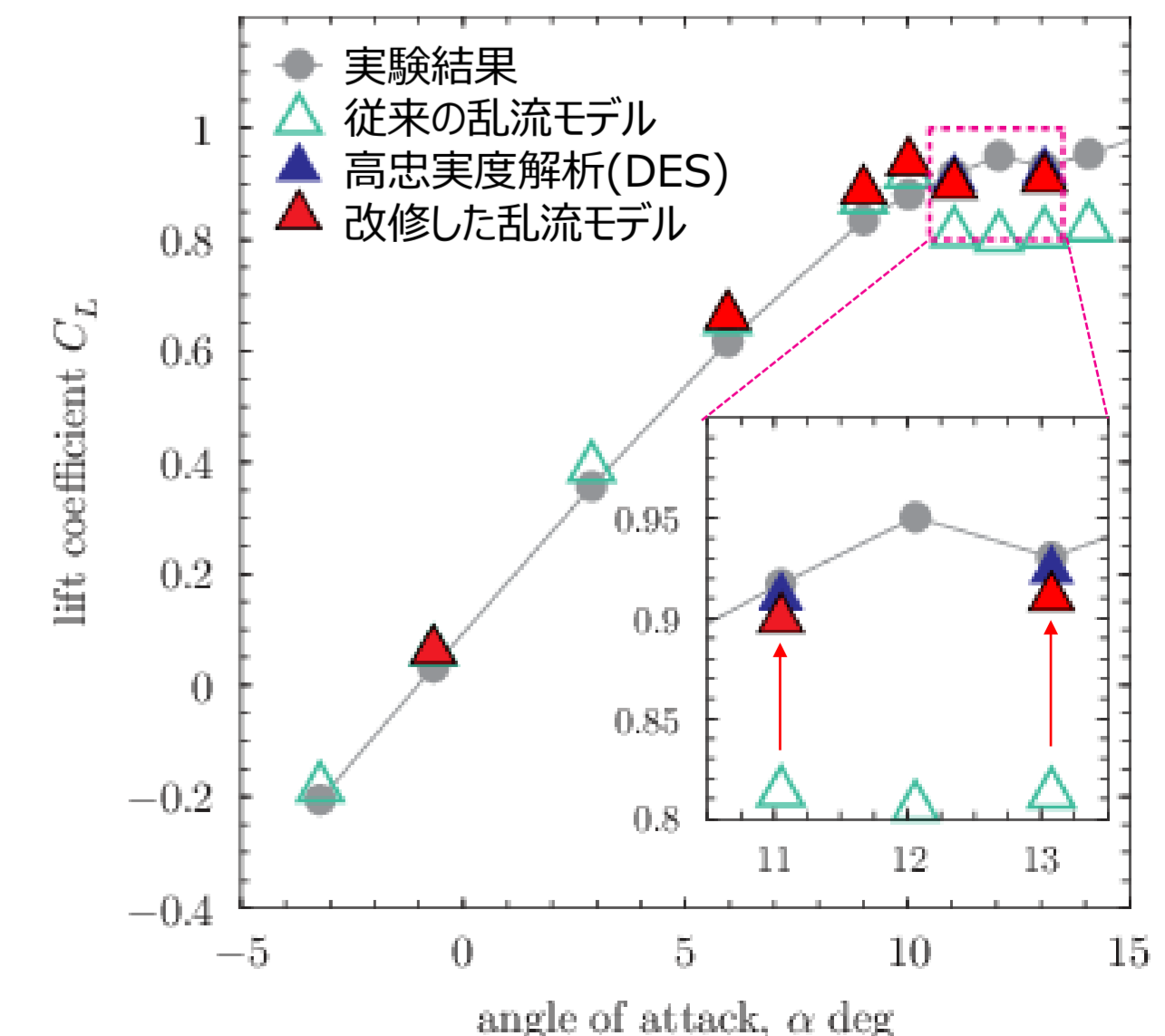


図10: NASA-CRMの空力係数従来モデル△を改修したもの▲が実験結果●に近い結果を示した