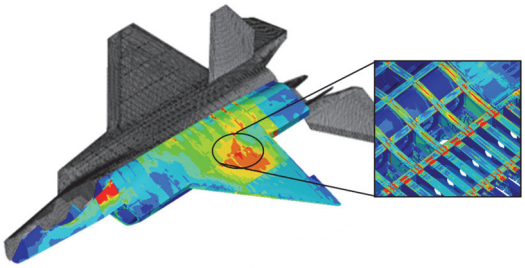
高精度 FEM モデルを適用した航空機構造解析作業の自動化

Automation of Structural Analysis for Aircraft by Using High Fidelity FEM Model



岡 功介[*1]
Kosuke Oka

村木 俊宣[*2]
Toshinobu Muraki

次世代の航空機開発に向けて，開発スケジュール厳守を達成すべく機体構造の不適合を設計段階で未然に防止するための構造解析高精度化が求められており，その要望に応えるためには大規模な FEM モデルを使用した構造解析が必要となる。一方，大規模な FEM モデルを構築するためには多大な人手と時間を必要とするため，FEM モデルの自動作成技術が必須である。

そこで当社では社内研究及び防衛装備庁が取り組み，当社が受注した“機体構造軽量化技術の研究”(1),(2)の供試体設計作業の中で，汎用の解析ツールをベースとした構造解析自動化ツールの開発を進めてきた。本稿では FEM ベースの構造解析を想定し開発した自動化ツールについて報告する。同自動化ツールの適用により，従来手法に比べ高効率化の効果（作業工数が50%以上削減）が得られる目途を得た。

1. はじめに

従来の航空機の構造設計では，試験結果等に基づき設定した設計チャートを用いた，いわゆる手計算ベースの構造解析と部分的な FEM による詳細な構造解析が組み合わせて実施されてきた。近年の解析ソフトウェア及びハードウェアの進歩により，詳細な FEM 解析をより広範囲に適用した高精度な解析結果がリーズナブルな計算コストで得られるようになってきたが，大規模な FEM モデルの構築には多大な人手と時間を要するという課題がある。このような背景を踏まえ，本稿では FEM による構造解析作業を高効率に実施するために開発した自動化ツールについて報告する。

2. FEM 解析を用いた航空機構造解析作業

2.1 航空機構造設計における FEM モデル

航空機の構造設計における FEM モデルの概要を図1に示す。従来の航空機の構造設計では，図1の従来手法に示すように機体の各部材が受け持つ内部荷重を算出することを目的としたラフな全機 FEM モデルを用いる。全機 FEM モデルから算出された内部荷重を基に各部材の板厚を決めるサイジング作業を実施する。このとき強度評価のために，試験データ等に基づく設計チャートを使用した手計算を実施する。また全機 FEM モデルでは評価できない応力集中部等については，別途詳細な FEM モデル（本稿では以降，部分 FEM モデルと呼称）を準備し強度評価を行ってきた。部分 FEM モデルによる評価は，強度上の要注意箇所を評価対象とし解析時間等を考慮し限られた範囲のみ詳細にモデル化することで対応してきた。

一方で，近年の解析技術等のソフトウェア面での進歩及びハードウェア能力の向上により解析コストが低減したため，図1の新手法に示すような詳細な全機 FEM モデルを用いた直接強度評

*1 防衛・宇宙ドメイン 航空機・飛昇体事業部 航空機技術部
*2 防衛・宇宙ドメイン 航空機・飛昇体事業部 航空機技術部 主席技師

価が設計作業においても迅速に実施できるようになってきた。より詳細なFEMモデルを用いることのメリットとして，解析精度の向上が挙げられる。これまでは部分 FEM モデルを別途用意し評価していた部位について，詳細な全機 FEM モデルを用いることで広範囲に一括で強度評価できるようになる。一方で，大規模化する FEM モデルの作成，評価に多大な人手と時間がかかるという課題が生じている。また基本設計から細部設計にかけた設計段階で新手法を適用した事例はこれまで殆ど経験の無い試みであり，設計段階では全部品を網羅的に評価するとともに，常時更新され続ける 3D CAD データと同期して FEM モデルを構築・維持していくことが求められるため，解析作業の迅速化が必須条件となる。

これらの背景を受け，以降では大規模化する FEM モデルを想定した解析作業の流れ及び課題について述べる。

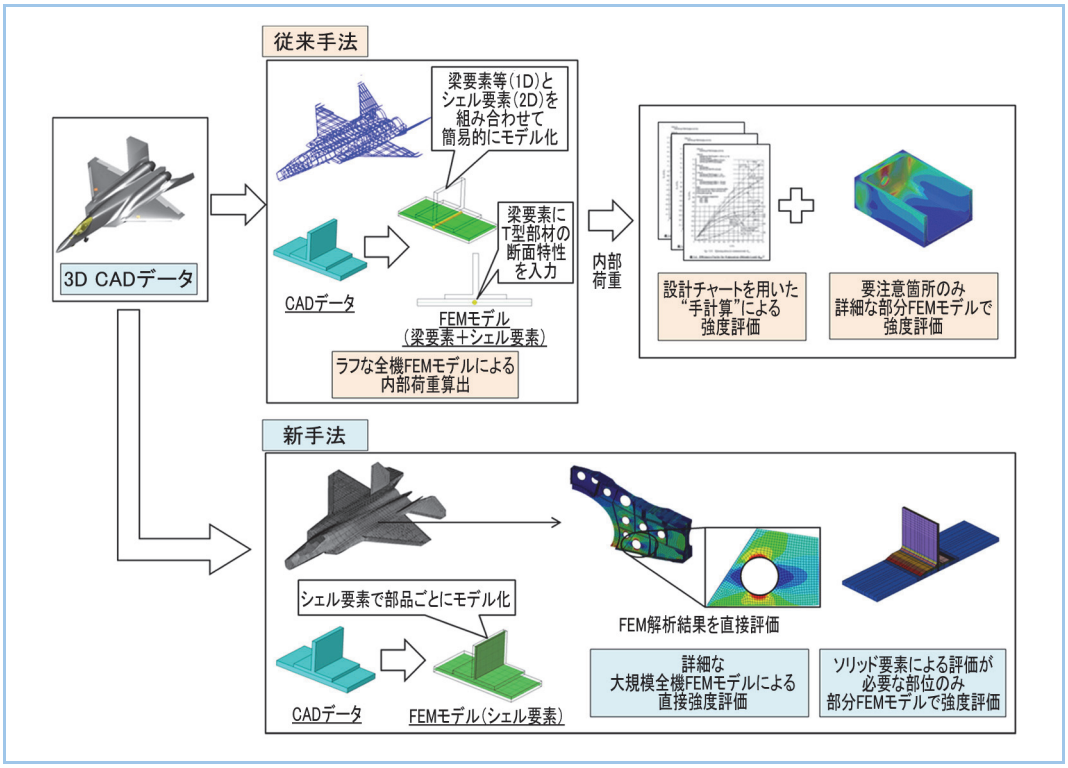


図1 航空機の構造設計と FEM モデル

2.2 航空機構造の FEM 解析作業の流れと課題

航空機構造を対象とした FEM 解析作業の流れ(新手法)を図2に示す。

まず 3D CAD データから部品単品の FEM モデル作成を行う。CAD データから図3に示すような中立面シェル要素のメッシュを作成した後，CAD 形状を考慮した板厚情報や材料特性のプロパティの作成を行う。このとき，部品毎に CAD の板厚を計測する作業や各種材料特性を調べる時間が必要となり，モデル作成作業に多くの人手と時間を要する一因となる。

次に図2中のアセンブリ作業では，実際の航空機の組み立てと同じ様に，出来上がった単品の FEM モデルを組み上げて構造全体の FEM モデルを構築していく。このとき，ファスナ結合部ではファスナ1本1本をモデル化することで高精度な強度評価を実現しているが，大量のファスナモデル(例えば大型旅客機全体で 100 万本以上)の作成作業は多大な工数を要し，FEM モデル作成作業のボトルネックとなりうる。

アセンブリ作業が完了した全機 FEM モデルに対して，荷重や拘束等の境界条件を設定した後，解析を実行する。解析実行完了後，ポスト処理として各種強度評価を実施し，結果をレポートにまとめるまでが一連の流れとなる。このとき，モデルが大規模になることで強度評価が必要な部品点数も多くなるため，強度評価実施及びレポート作成を自動化することで最終的なアウトプットを出す時間を短縮する必要がある。

またシェル要素を用いる全機 FEM モデルでは評価が難しい強度検討(例えば複合材接着構造の強度評価)においては，ソリッド要素を用いた部分 FEM モデルを作成し強度評価を実施する。部分 FEM モデルの作成作業では，特に複合材構造を対象とする場合，金属構造の場合に比べ，材料方向の定義等の作業に多くの手間を要するため，モデル作成作業の効率化が必要である。

以上のような課題を踏まえ，開発した自動化ツールについて以降に述べる。

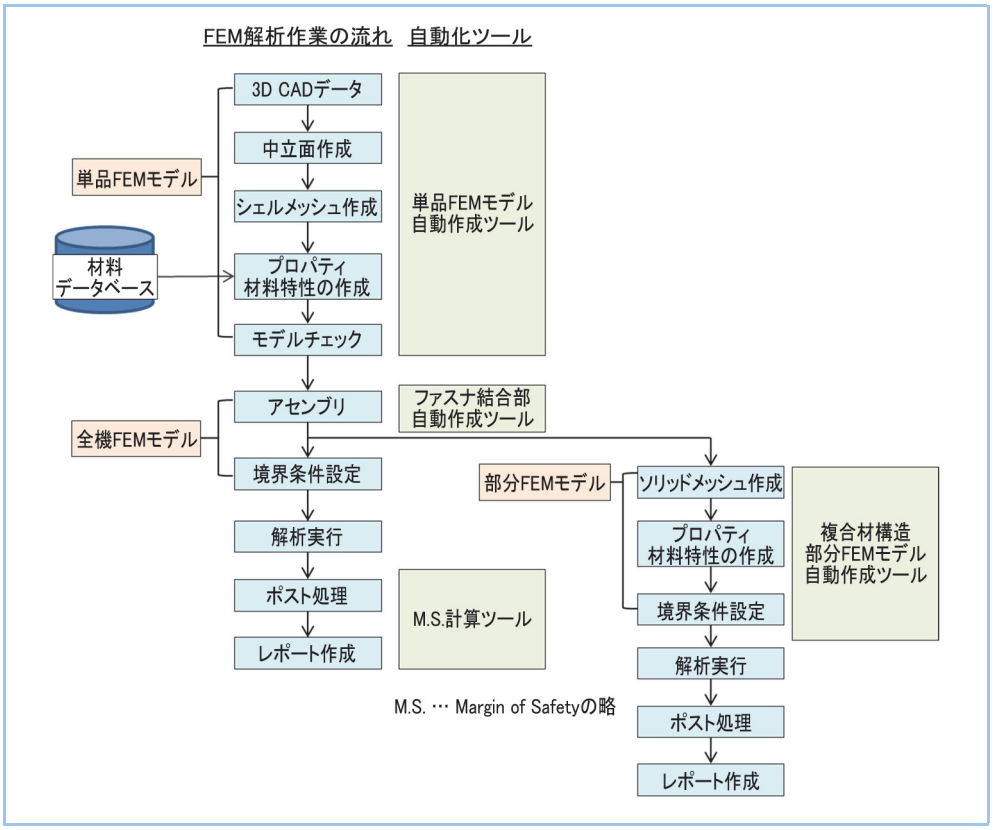


図2 FEM 解析作業の流れ(新手法)

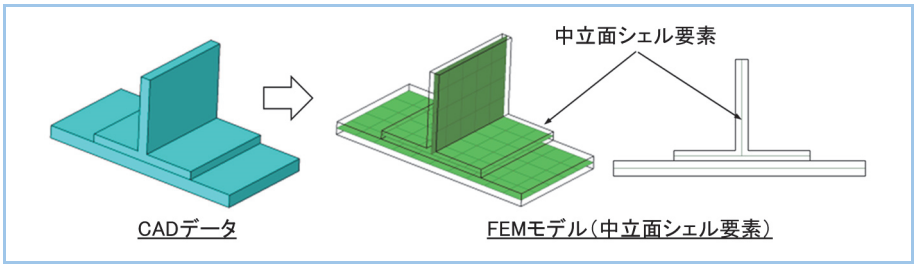


図3 中立面シェル要素

3. 構造解析作業の自動化

前述した大規模 FEM 解析を用いた構造解析作業の高効率化を実現するために，FEM 解析のプリポストソフトウェアである Altair HyperWorks(アルテアエンジニアリング(株))をベースとし開発した自動化ツールのうちのいくつかを紹介する。

3.1 自動化ツールの開発

図2において解析作業の流れとともに示した各自動化ツールについて順に説明する。

(1) 単品 FEM モデル自動作成ツール

本ツールは，部品単品の FEM モデルを効率よく作成するためのツールであり，3D CAD データから中立面の作成，修正を実施し，図3に示したような中立面シェル要素を作成する機能を有する。中立面シェル要素作成後，CAD 形状を考慮した板厚情報や材料特性のプロパティ

の作成を行うが，本ツールでは 3D CAD データから板厚情報を自動で抽出し，プロパティの作成を自動で実行することで，板厚変化の多い部品のモデルも効率よく作成することができる。また材料特性に関しても，あらかじめ準備した材料データベースから該当する材料を選択することで FEM モデルに自動で材料特性が入力される。さらに本ツールは，複合材構造が対象となる場合，積層構成の入力も事前に定義されたパターンから選択することで自動化できる機能を有する。

以上の機能により，効率的に単品 FEM モデルを作成することができる。

(2) ファスナ結合部自動作成ツール

ファスナ結合部自動作成ツールでは，CAD 上で定義されたファスナ位置を示すファスナポイントを元にファスナモデルを自動作成する。図4に示すように本ツールではファスナポイントの位置から結合すべき部材を自動で探索し，複数の部材をまとめて結合することができる。

航空機の構造解析ではファスナ結合部を剛体要素やばね要素，梁要素等を用いてモデル化する場合がある。ばね要素を用いる場合，ばね定数はファスナで結合する母材の板厚や剛性の情報を基に算出する。それらの情報を FEM モデルから自動的に抽出し，ばね定数を計算する機能を実装させた。また梁要素でモデル化する場合に必要となるファスナの材料やサイズの情報を別途作成したデータベースから自動で抽出する機能も開発した。以上の機能により，効率よく大量のファスナ結合部のモデル化を実行することができ，全機 FEM モデルのアセンブリ作業を効率よく実行できる。

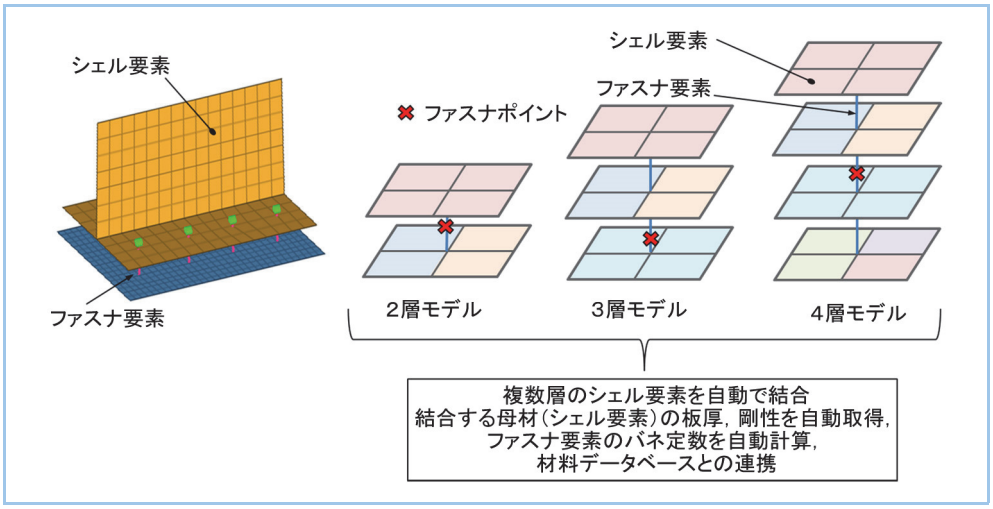


図4 ファスナ結合部自動作成ツール

(3) M.S.計算ツール

航空機構造の強度評価では、一般に M.S. (Margin of Safety:材料強度を各部材に作用する応力で割った値から1を引いた値)が使用される。本ツールでは，(2)のツールで作成したファスナ結合部モデルのファスナ1本ずつについて強度評価を自動で行うことができる。ファスナ自体の強度に加え，結合する母材の強度評価も自動で行う。このとき，母材の強度等の材料情報は材料データベースと連携することで自動的に取得し，強度評価の自動化を実現した。また上記強度評価結果のレポートを所定のフォーマットで自動作成する機能を有し，強度評価のアウトプット作成を効率よく実行できる。

(4) 複合材構造の部分 FEM モデル自動作成ツール

本ツールは，複合材構造の部分 FEM モデル作成を効率化するための自動化ツールである。シェル要素では評価が難しい接着強度等の検討のために，部分 FEM モデルではソリッド要素で構造をモデル化する。本ツールでは，図5に示すように，形状のパラメータを指定することでソリッド要素によるモデル作成を自動で実行する機能や複合材構造特有の材料方向の定

義を自動化することで効率的なモデル作成を実現した。また，ソリッド要素で作成した部分 FEM モデルをシェル要素で作成した全機 FEM モデルに埋め込み，解析を実施する場合があるが，全機 FEM モデルと部分 FEM モデルをつなぐ作業の自動化を実施することで，スムーズに部分 FEM モデルを用いた解析を実行できる。同ツールにより，部分 FEM モデルの作成作業を効率よく実行できる。

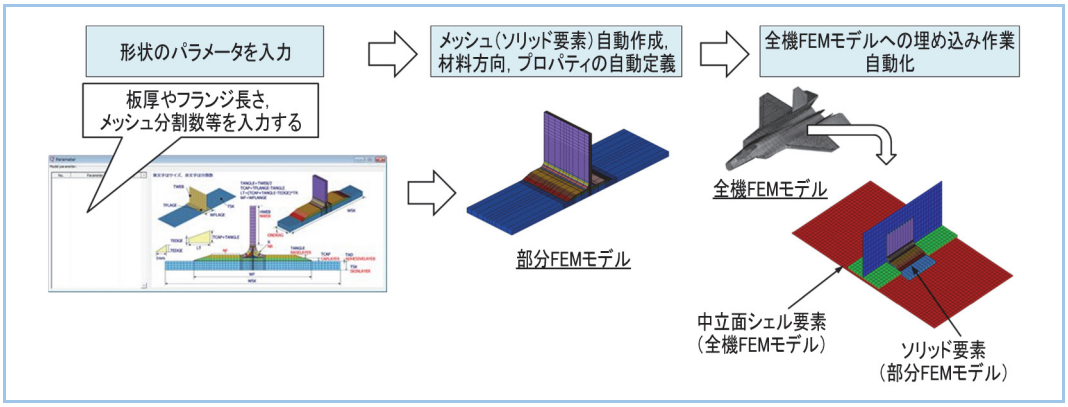


図5 複合材構造の部分 FEM モデル自動作成ツール

3.2 自動化の効果

3.1 項で述べた自動化ツールは，(1)，(2)までを社内の研究開発内で作成した後に図6に示す防衛装備庁の“機体構造軽量化技術の研究”[(1),(2)]に採用され、防衛装備庁の研究活動内で更に(3)，(4)の自動化ツールを追加作成したものである。また，同研究において各自動化ツールの解析作業効率化への効果検証が実施された。本検証では，同一の航空機構造に対して，従来手法(手計算＋詳細 FEM)と新手法(高精度 FEM による直接評価＋自動化ツール)のそれぞれを適用し，FEM モデルの作成から強度評価までの一連の作業に要した作業工数の比較が実施され，従来手法に比べ，自動化ツールを適用した新手法では作業工数の 50%以上の削減を実現し，航空機の構造設計における本稿の自動化ツールの効果の目途が得られた。また，本稿の自動化ツールは航空機構造に限らず，車両や船舶等の薄板複雑構造物の構造解析作業の効率化へ広く適用可能であると考える。

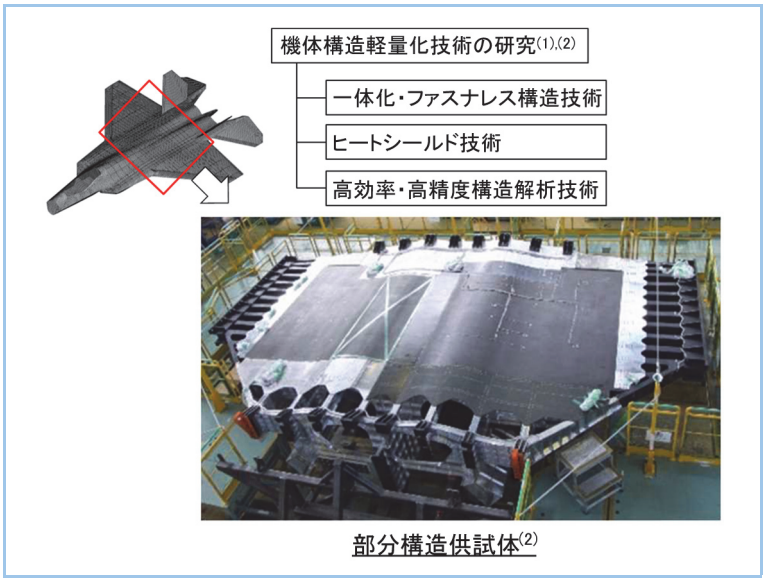


図6 機体構造軽量化技術の研究[(1),(2)]

4. まとめ

本稿では，構造不適合の未然防止を目的とした大規模 FEM モデル構築のために実施した FEM モデル自動作成ツールの開発について述べた。開発した自動化ツールの適用により，従来に比べ大規模な FEM モデルを使用した場合でも高効率に強度検討を実施することができる目途を得た。今後は，設計段階で日々更新される 3D CAD データと大規模 FEM モデルと同期を図り常に一致性を担保する形態管理ツールの開発等に取り組んでいく。

参考文献

(1) 防衛装備庁，技術シンポジウム 2018 発表要旨“航空装備研究所における戦闘機の胴体関連技術”，(2018)
http://www.mod.go.jp/atla/research/ats2018/img/ats2018_summary.pdf
(2) 防衛装備庁，外部評価報告書“機体構造軽量化技術の研究”，(2016)
http://www.mod.go.jp/atla/research/gaibuhyouka/pdf/AircraftStructure_28.pdf