SIEMENS
Ingenuity for life

シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェア

航空機構造の認証に向けた解析とシミュレーション

耐空証明の道のりを簡素化するためにデジタル・ツールができること

エグゼクティブ・サマリー

航空機構造全体の認証プロセスは、非常に複雑です。構造認証の申請にあたっては、航空機の構造上の強度がシステム全体の設計目標を満たしていることを、複数の側面から証明しなければなりません。

シミュレーションや解析ツールを活用している企業は、認証条件への適合性をより迅速かつ効果的に確認でき、ツールの導入で後れを取っている企業と比べて、総コストを大幅に削減しています。

航空機構造設計で考慮すべきこと

構造認証を受けるには、連邦航空局 (FAA) が定めた型式ごとの構造要件をあらゆる面で満たさなければなりません。エンジニアは、設計中の航空機がどのような条件と環境のもとで動作するかを考慮してすべての要件に適合させる必要があり、製造される機体が設計どおりの性能を発揮して構造的な欠陥がないことを、解析または試験を通じて実証しなければなりません。

構想設計の段階で始まる要件と基準

基礎解析は、初期の構想設計段階から始まります。 航空機全体を支える構造は、その航空機の使命により異なります。飛行速度と高度、最大積載量、最大輸送人員、または最大積載量、最大積載時の航行最大距離など、これらの基本的な設計条件は、航空機メーカーが早期に決定しなければならない型式とサイズに影響します。

通常、航空機の型式とサイズが決まってから空力形状を設計します。空力形状は、航空機の使命に必要とされる基本的な翼型、翼平面形、胴体の体積および形状、尾翼の形状およびサイズを含みます。

荷重と静的強度

構造を具現化していく次の大きなステップは、新しい航空機の構造を空気力学的な観点から定義することです。航空機の対気速度をさまざまに変化させながら、航空機にかかる空力荷重を飛行包絡線の各地点で評価する包括解析を実行します。

図 1 は、プロペラ機の飛行包絡線の例です。荷重係数 (n) は、設計対象の航空機に適用される対気速度に基づいて計算します。各種速度は以下のとおりです。

- Vs = 失速速度
- Va = 設計運動速度 (操舵を最大にしたときの最大速度)
- Vc = 設計巡航速度
- Vd = 設計急降下速度

これらの速度を荷重解析への入力データとして用い、最大荷重、最大荷重時の機体条件と構成を評価します。

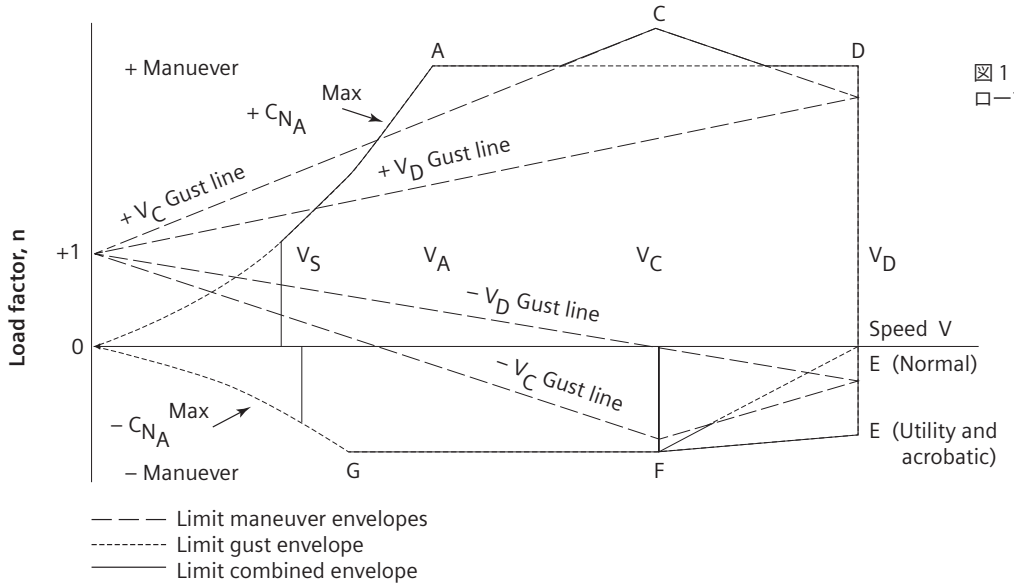

図 1：航空機のフライトエンベロープの例

エンジニアは、解析を行って、機体の各パーツが（上下左右の方向に）せん断、回転、湾曲してしまう最大の力（ワーストケース）を見極めなければなりません。機体重量と重心を変えながら、高速時と低速時で荷重がどう変わるかを調査します。飛行包絡線の各地点でギアの上げ下げ、フラップの上げ下ろし、そのほか装備のあらゆる組み合わせに基づいて、荷重を評価する必要があります。

飛行包絡線のすべての地点と、条件のあらゆる組み合わせのなかで荷重が最大になる組み合わせが、設計荷重としても設計条件としても重要です。評価と調査の対象となる地点と装備の組み合わせは、文字通り、何百通りにのぼります。

例として、翼がスパン方向に曲がるときのクリティカルな設計条件を考えてみましょう。一直線に翼の先端を引っ張り上げ、翼が機体と接するところで固定させます。翼内燃料がほどんどなく、所定最大突風荷重が機体にかかると客室の重量が大きくなります。この際翼は持ち上げられ、突風により機体は押し下げられるので、翼の曲がりが最大になります。

ここから、実際の物理構造を用いた解析に移行し、その航空機が稼働する可能性のあるすべての動作点で十分な静的強度を発揮することを確認します。クリティカルな荷重を「設計限界」荷重といいます。

一般的にFAAは、物理構造の静的試験を要件として定めており、設計限界荷重の1.5倍以上の荷重（究極荷重）をかける必要があります。構造物が曲がっても、1つのひびも永久変形の形跡もなく、破壊されません。これは、限界条件に達したときの材料属性がどうなるかを示唆しています。こうした解析を進めている間にも、航空機の物理構造には細かな設計変更が加えられていきます。この段階では、規律のある確実な構成管理が不可欠なのです。

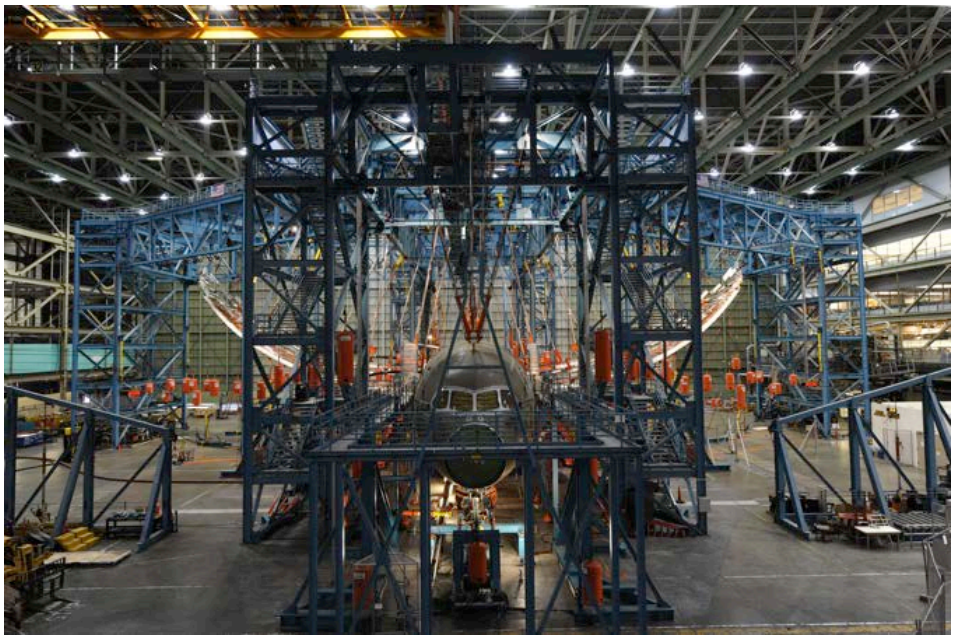

図 2：ボーイング 787 型機の静止状態での翼の曲げ試験 (2010 年 3 月発行 Wired Magazine online より)

疲労と空力弾性に関する考慮事項

静的強度と同様に重要なのが、航空機の全体的な信頼性と安全性です。これは、構造面だけを考慮していれば済むというものではありません。エンジニアは、物理的強度と疲労強度 (繰り返し曲げられたときの長期的な影響) を満たす機体構造を設計しなければなりません。航空機はフライト中に空気力学荷重の変化を受けると曲がる構造になっているため、構造安定性は動的条件下で評価します。一連の調査は、疲労 / フラッター実証と呼ばれ、静的試験と同程度の強度解析 / 試験が課せられます。

航空機の疲労解析

紙クリップを壊れるまで曲げたり伸ばしたりした経験があれば、それこそが疲労解析です。紙クリップを折り曲げるとやがて永久変形が起こり、局所的に金属が硬化して、「プラスチック」以下になってしまいます。疲労故障は、紙クリップの曲げ伸ばしを繰り返すことで、ひびが入るか割れてしまう状態です。

航空機の飛行中は通常、翼が長時間にわたって上下に曲がるため、この紙クリップと同じ状況と言えます。正しく設計されていれば、設計限界と究極限界までの曲げ圧力を翼に何度もかけたときの応力 / ひずみ曲線は、傾きが線形になります(図3)。翼は可とう構造のため、元の形状に戻り、永久変形は起こりません。

応力 / ひずみ曲線の傾きが線形だとしても、非常に多くのサイクルを経ると、どの材料でも疲労故障が発生します。曲げ伸ばしを繰り返したことの長期的な影響を見るためにエンジニアが使っている指標をS-N図 (図4) と言います。

エンジニアは、想定上の安全係数に基づく実証データを用いて、開発中の航空機が運行中に経験するサイクル数を概算し、その値が機体のさまざまなパーツの疲労故障限界に近い値にならないように設計しなければなりません。

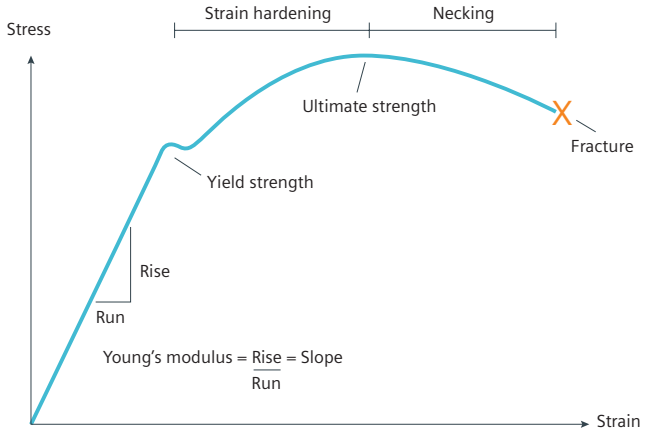

図3: 低炭素スチールの応力 / ひずみ曲線の例。応力は、この材料に加わる力です（この例では張力)。ひずみは、材料の伸び（伸長）です。降伏強度より大きな応力がかかると、材料が永久変形、硬化し、最終的には破損します。応力が降伏強度未満であれば、その材料は元の長さ / 形状に戻ります。翼の実際の物理構造は、個々の材料曲線に似た応力 / ひずみの複合曲線を示します。

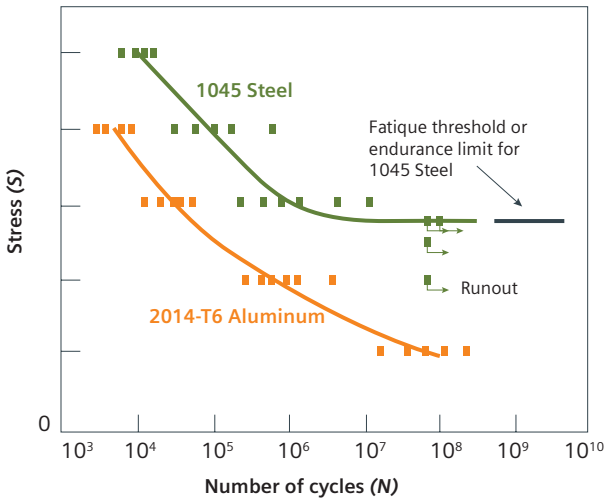

図4: アルミとスチールのS-N図材料曲線の傾きが水平で、多くのサイクルが水平のところに収まっているのであれば、寿命限界には達していません。その材料は十分な「伸縮性」があり、サイクル数がいくつであっても疲労することはありません。

フラッター評価
可とう性構造や動きのある状態で使用される構造の場合、動きや曲げによる動的な空力弾性の影響も考慮しなければなりません。

すべての物理的な物体には、振動を起こす自然な調和振動数があります。簡単な例として定規を取り上げます。定規の片端の 1 ～ 2 インチをテーブルの端に置き、残りを空中に浮かせてみましょう。固定されていない側の端は上下に曲がり、飛び込み板のように跳ねます。その振動による初期周波数は、その素材と形状に対する自然調和です。摩擦により振動が緩和され、自然と振動が収まります。自然調和周波数と同じ外部振動が起こると、その振動がなくなるまで、定規は振動を続けます。

突風や乱気流など外気の変化は、定規の固定していない側に振動が送られたのと同じです。つまり、翼がしなり、振動が起こる現象は、この定規と同じ現象です。

特に振動（構造のたわみ）が大きくなればなるほど、調和モードがフラッターを招くことがないように、振動周波数をさまざまに変化させて、この機体の動きを評価する必要があります。振動が発散してフラッターを招き、機体がばらばらになってしまっては大惨事です。

シミュレーション、解析、試験の役割と重要性
物理試験はどのような場合においても必要です。しかし、仮想シミュレーション解析でも十分な結果を得ることが可能で、法令 遵守のための試験の必要性を軽減すことができます。シミュレーションの本来の価値は、物理試験のための被試験物を 何度も作る時間、コスト、工数をかけずにシステムのふるまいを予想できることです。

航空構造物のサイジングには、耐空証明の手続きに使用する何千もの構造解析データを演算処理する必要があります。応力解析に正しいデータを使用できず、正しいエンジニアリング手法がとられず、適切に作業分担や応力解析レポート生成がなされなければ、認定取得までのプロセスが長く困難になります。航空機の構造解析にとっての難関は、プロセスの自動化と標準化です。また、構想設計から最終製品化までのプロセスすべてにわたって、具体的なデータ、モデル、プロセス、メソッドの可視化とトレーサビリティーを確保することにも難しさがあります。

グローバルなシミュレーション・プロセスには、多くのチームの緊密な連携が欠かせません。プロセスの自動化は設計とシミュレーションの反復効率を加速・向上させます。

製品ライフサイクル全体でシミュレーションを活用するエンド・ツー・エンドの航空機構造エンジニアリングにより、製造企業は革新的な製品を納期通りに、そして予測どおりのパ フォーマンスで提供できるようになりました。

航空機の所有者 / 運航者の観点からみると、これは、耐空証明を取得するプロセスの一環である解析作業を、いかに素早く正確に完了できるかにも影響します。また、モデル準備時間の短縮、設計と解析の反復作業の削減、複数の設計領域間のトレードオフの評価、スケジュール通りの合理的な開発、設計品質の向上を可能にします。プロセス標準化によって、プロセスの一貫性を高め、可用性と準備状態を損なうエラーのリスクを減少させることで、この問題に対処できます。

業界全体が、高度な試験手法を加えた包括的なシミュレーション・プロセス、言い換えれば、CADのジオメトリー定義からCAE環境までをグローバルに連携させた合理的なシミュレーション・プロセスを提供するデータ管理ツールを必要としています。

準備完了認定に必要な多くの解析とレポートの機能を透明性の高い1つの環境に統合したデジタル認定プラットフォームがあれば、トレーサビリティーとナレッジの引継ぎを最適化できます。このプラットフォームに求められる機能は以下のとおりです。

- アセンブリの有限要素に関連した応力のミュレーションで使用するため、荷重とジオメトリーのデータを自動で統合
- 安全マージンを計算する統合型機能
- 製品寿命管理システム経由でシステム要件に関するレポートをシームレスに出力

まとめ

航空機構造全体のシミュレーション・ソリューションにより、一貫性のあるグローバルなプロセス管理を維持したまま、トレーサビリティーに優れたデータとシミュレーション結果を手にすることができます。詳細な有限要素モデル（FEM）アプローチに加え、エンド・ユーザーが解析エンジニアリング・メソッドのライブラリーを参照しながら、航空機のコンポーネントをサイジングできます。シミュレーションから得たデータと結果に基づいて、応力シミュレーションのレポートを出力できるため、エンド・ユーザーは一貫性のある統合的なグローバル・プロセスの恩恵を享受し、結果として、高い精度、時間とコストの削減、製品ライフサイクル全般の可用性の向上を実現します。

シミュレーション・チェーン全体を網羅した統合的なシミュレーション環境は、耐空証明に求められる航空機構造解析を自動化、標準化するという課題を克服します。この包括的なデジタル・ツインは、コンシューマー要件、データ、ナレッジ、プロセスの取り込みからトレーサビリティーの確保 までを網羅したものです。

シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェア

本社
Granite Park One
5800 Granite Parkway
Suite 600
Plano, TX 75024
USA
+1 972 987 3000

アメリカ
Granite Park One
5800 Granite Parkway
Suite 600
Plano, TX 75024
USA
+1 314 264 8499

ヨーロッパ
Stephenson House
Sir William Siemens Square
Frimley, Camberley
Surrey, GU16 8QD
+44 (0) 1276 413200

アジア/太平洋
Unit 901-902, 9/F
Tower B, Manulife Financial Centre
223-231 Wai Yip Street, Kwun Tong
Kowloon, Hong Kong
+852 2230 333300

日本
〒151-8583 東京都渋谷区代々木 2-2-1
小田急サザンタワー
TEL: 03-5354-6700 (代)

siemens.com/software

© Siemens 2019. 関連するシーメンスの商標はこちらに記載されています。
その他の商標はそれぞれの所有者に帰属します。

78732-81326-C4-JA 12/19 LOC

シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェアについて

エンジニアリング、製造、そしてエレクトロニクス設計を未来につなげるデジタル・エンタープライズを実現するのが、シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェアが進めているトランスフォーメーションです。

弊社のソリューションは、あらゆる規模の企業の皆さまが新たな知見と機会を開拓し、より 高いレベルのオートメーションを実現するデジタル・ツインを作成・活用できるよう支援します。シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェアの製品とサービスについての詳細は、siemens.com/software をご覧ください。 または、LinkedIn、Twitter、Facebook、Instagram をフォローして情報をご確認ください。

シーメンスデジタルインダスト リーズソフトウェア – Where today meets tomorrow.