

有限要素解析とテスト

Eddy Dascotte, Dynamic Design Solutions, N.V., Leuven, Belgium

本稿は有限要素解析 (FEA) とテスト (EMA) のリンクの動機と期待される利益について紹介したものです。実験モデルの結果にもっとよく一致するように解析モデルを最適化するために、フレームワークや効率的な手続きが利用できるモード解析の分野において、その代表的な適用例が示します。本稿では、その技術の将来的展望のみならず、不確実性の管理を含むシナリオとともにツールの概要が解説されます。

長年にわたって、有限要素解析者とテスト・エンジニアの間には大きなギャップが存在しました。あらゆるレベルにおけるエンジニアリング・マネジャーは、製品の設計と解析に対して解析的アプローチと実験的アプローチを組み合わせるプロセスの利点をずっと以前から認識していましたが、多くの場合、それらの実行は実際的かつ文化的な理由のために禁じられていました。解析者とテスト・エンジニアはそれぞれ自分自身の語彙を使用し、異なる場所で働き、異なるタイプのハードウェアや互換性のないソフトウェアおよびファイル・フォーマットをしばしば使用されます。しかし、近年の多くの技術的・組織的な変化がこれらの障害を回避することを可能にしました。

- 現在、強力で手頃な価格の PC、ワークステーションは、あらゆる種類のテスト・システムのみならず、産業界の有限要素解析を実行するためにも十分なパワーを提供できる。
- あるシステムから別のシステムにデータ・ファイルを簡単に移動できるように、コンピュータはネットワーク (LAN、WAN またはインターネット) によって接続できる。
- 解析者およびテスト・エンジニアは、FEA とテストのリンキングのトピックを扱う、より多くのコース、文献および会議にアクセスできる。
- 新しい技術センターは、テストラボとシミュレーション・ツールへの容易なアクセスによって、一つ屋根の下で異なる背景を持った人々を集めることができる。

さらに、今では残存する多様な障壁をも除去することを支援するいくつかの専用の統合フレームワークが存在します。それらは、商用または社内開発された FEA およびテスト・システムと共にデータ・トランスレータを使用して、インポートされた解析データとテスト・データを含むことができるデータベースを核として設計されている。ニーズおよび目的によって、アドオン解析ツールは、意思決定と、エンジニアリング・チーム全体が利益を得ることができる知識ベースの共同プロセスにおいて、これらの混合データの資源を利用することができます。(図 1) 以下にいくつかの例を挙げます。

- FEA 結果は実験のセットアップの最適化に使用できる。(プリテスト解析、仮想試験)
- テスト結果は、誤差局在化、相関分析およびモデル・アップデーティングのツールを使用して、有限要素モデルを検証したり、校正したり、細分化したりするための参照データとして使用される。
- 未知の物理特性または把握しにくい物理特性 (例えば、減衰) を同定することができるかも知れないし、その有限要素モデルにおける不確実性をもっとよく評価できるかも知れない。
- 部分的に FE モデルとテスト・モデルを含む混合モデルは、モデル・サイズとパフォーマンスの間の良いバランスを維持している間は、応答全体にわたって寄与する不可欠な要素を含む完全なモデルを構築するために開発することができる。

統合と解析ソフトウェアは、それ自身が障害になりません。ことが最も重要です。CAD または FEA と違って、これらのツールは毎日のように使用されないかもしれない。したがって、標準に従った単純で論理的なユーザー・インターフェイスによって簡単に学べるべきです。任意の既存の CAE 環境にそれらを統合できるように、ユーザー・インターフェイス、グラフィックス、解析およびレポート・ツールをカスタマイズすることができ、拡張できることが必要です。

組み合わせられたテスト・データと解析データをもっとよく利用することにより、技術スタッフや管理者は、設計の最適化、音響解析、疲労解析などのために必要のあるシミュレーションにおいて、より多くの信頼を獲得し、将来のモデリングに対する専門知識を獲得し、再使用可能な知識を構築し、工学的判断のような本質的な技術を速やかに得ることができます。

テストの必要性

我われの競争社会では、エンジニアはより多くの受け入れ基準を満たす必要のある、ますます複雑な製品を設計へ挑戦しなければならないことに直面しています。それらはより強く、より軽く、より静かで、より安全で、製造と保守のコストがより低くなければなりません。開発期間を守りコスト競争に打ち勝つために、産業界はコンピュータ化されたシミュレーション・ツールを依存します。有限要素解析 (FEA) はさまざまな種類の負荷の下での製品の挙動をシミュレートし改善するための強力な技術です。FEA の手法は、過去数十年にわたって設計、メッシュ生成、解析およびポスト処理が高度に統合され自動化されるまでに成熟してきました。この予測的なアプローチは、シミュレーション・モデル、それを解析するソフトウェア、および結果を解釈し、解析者の工学的判断の質に依存します。

より高品質化の要求に対応していくために、シミュレーション・モデルと手続きが妥当なものでなければなりません。それを行うさまざまな方法の中で、直観的に実験は依然として好ましい方法です。一連の試作を含む試行錯誤による設計および解析のアプローチは、時間を消費しすぎるし高価にもなります。したがって、試作に伴う反復の数を減らすことが必要です。これは、試作の試験に関するより多くの情報を引き出すことと、より先進的なシミュレーションを行うことにより達成することができます。

結局のところ、解析者がますます野心的になり、製品のライフサイクル全体をシミュレートしたいと考えたと仮定しても、最初から正しく設計できて試験を完全に除去できるほど我われは有能であるはずがありません。新しい材料を使用して (複合材料 vs. 金属材料)、組み立てられた製品全体 (vs. コンポーネント) をモデル化するときに遭遇する問題は増加し、その複雑さの上に、なおかつ生産と環境上の負荷の影響を含めることは非常に困難です。

デジタルの試作にうまく移行させ、それによって物理的な試作の数を減らすには、実行結果の予測が確信度という尺度で与えられ、それが実験データに対して有効なものでなければなりません。そのためには、物理的および数値的不確実性の数量化が必要です。この目標に到着するには、より現実的な方法で根本的かつ適切な物理学を表すことができるシミュレーション・モデルのある別の形式に結びつく、基本の変更が要求されます。現在の FEA が入力パラメータの名目的な値に基づいているのに対して、これらの新しいモデルは、元来確率的です。統計的な後処理をすることができ、知識や洞察に変えることができる膨大な量のデータを提供するために、より多くの試験が必要であり、それは容易なことではありません。^[1]

不確実性の存在

数値シミュレーションの結果における不確実性は、2つの主なクラス:物理的な不確実性および数値的な不確実性に現れます。

物理的な不確実性、またはバラツキによって目に見えるようになる4つの主要レベルが存在します。すなわち、

- 境界条件および初期条件:衝突速度、衝突角度、乗り物の質量、障壁の特性など
- 材料特性:降伏応力、ひずみ率パラメータ、密度、局部的欠陥など
- 幾何学特性:形状、厚さ、製造および組立許容誤差など
- 負荷:地震、突風、海波、爆風、衝撃、衝突など

これらの特性の多くが温度、周波数あるいは負荷のレベルに応じて本質的に変わるかもしれないので、不確実性はさらに増加します。これらのバラツキの形式に関する情報は、測定によって得ることができます。少数の統計的サンプルに起因するかも知れない(しばしば大きい)バラツキから、自然的なバラツキと固有のバラツキを区別するために、サンプル数が十分に多いことを評価する必要があります。

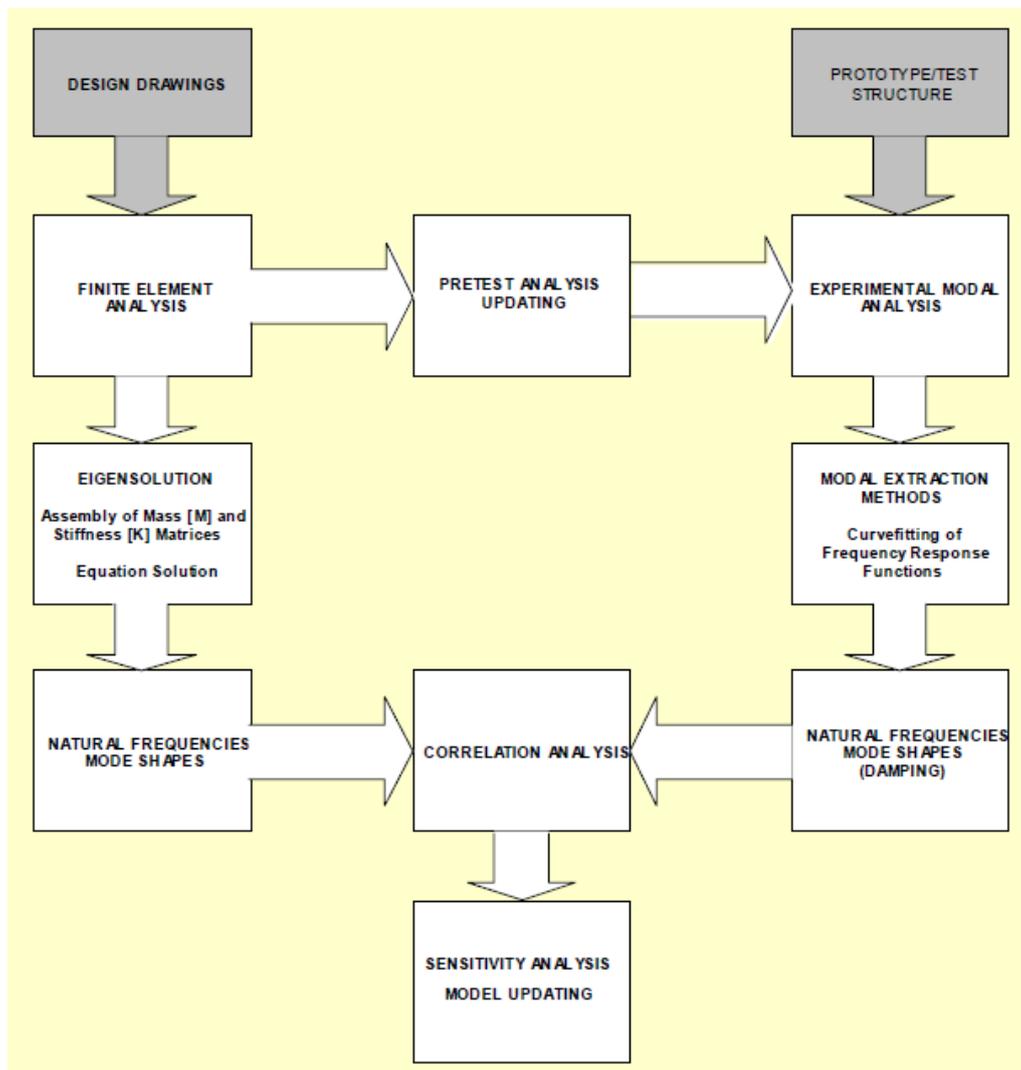


図1 モード解析におけるテストと解析のリンクの一般的な手続き

確率分布関数とそれらに関連する特性は、テスト・データの統計解析から得ることができます。例えば、等方性材料の弾性係数は、中間値および標準偏差によって特徴づけられる正規(ガウス)分布を使って記述します。

次の数値的な不確実性は同定します。

- 概念上のモデリングの不確実性: 関連する物理的なプロセスにおけるデータの不足、システム知識の不足
- 数学的なモデリングの不確実性: 数学モデルの妥当性
- 離散化の誤差の不確実性: 要素タイプの選択、メッシュ密度、幾何学的詳細のレベル
- 数値解の不確実性: 丸め誤差、収束判定の許容誤差、統合化のステップ
- 人間の誤り: プログラミング・エラー、ソフトウェアの間違った利用、データまたは単位の誤り

これらの種類のバラツキは、関連する物理学にかかわらず存在するかも知れないし、存在しないかも知れません。数値的な不確実性の証拠の例として、同じ有限要素モデルを使用して、2つの有限要素コードによって得られるかも知れない、異なる結果が挙げられます。ソルバーや計算プラットフォーム、あるいは要素の定式化を変えることによって、顕著な違いを生じる可能性があります。

不確実性がテストにおいても存在することは明らかです。物理的な不確実性の可能な原因は、以下のものと関係があります。

- テストの定義: 固定具、据付手順、加振方法、トランスデューサの位置、センサーの重さ、動的負荷
- 計測器: 校正、ひずみ、配線によるノイズ
- データ集録: デジタル信号処理、測定およびフィルターの誤差

実験モード解析のような技術もまた、モード・パラメータ推定に使用される数学モデルにおいて数値的な不確実性の対象となります。

不確実性およびバラツキの存在を認識することは、シミュレーション・モデルを有効にすることにもっと多くの時間を費やす十分な理由となります。しかしながら、単一のテストを使用したモデルの有効性の確認は、スナップ・モーションの結果にしか結びつかない場合があります。これが入力パラメータのおおざっぱな校正に対して役立つ間は、入力パラメータおよび参照テスト・データのバラツキが考慮されなければ、より広範なモーションに関する情報は考慮されないということを理解しなければなりません。シミュレーションの目的、および利用可能な参照テスト・データの量と種類によって、異なる状況に遭遇する可能性があります。

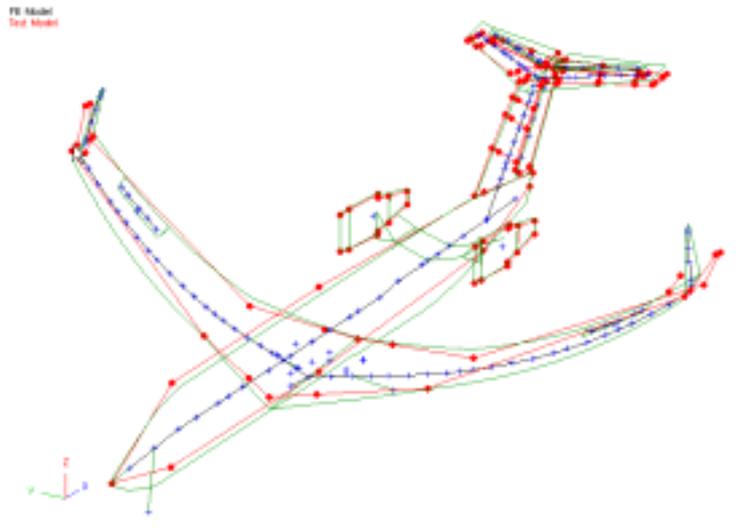


図2 振動試験のデータを用いて翼の曲げモードの相関を求めるために使用された航空機の棒状モデル。胴体と翼(青)をモデル化するために、ビーム要素が使用されている。センサー位置は赤色で印が付けられている。緑色の線は、有限要素節点にセンサー・データを結合するために使用される非構造的なプロット要素です。

- 不確実性および感度レベルによって定義された階層に基づくパラメータの選択(接合部、材料など)。これは等価な幾何学的パラメータ・アップデーティング、材料の同定、メッシュの細分化、あるいは荷重の同定のような異なる種類の活動が必要になる可能性がある。
- メッシュはそれ自身、アップデーティング・パラメータを決定する次のようないくつかの例が挙げられる:翼の動揺(フラッタ)解析のための棒状モデル(図 2);アセンブリ(合成)において、または単に計算上の効率のために、減じられたり組み入れられたりする必要のあるコンポーネント・モデル、動解析および静解析の両方に対して使用される細分化されたモデル(応力、最適化)、音響解析に使用されるモデルなど。
- 同じ構造物の繰り返し行われた試験から、または多くのサンプルのテストから得られた出力応答のバラツキは、検証されアップデートされた確率論的なシミュレーション・モデルに結びつく入力パラメータのランダムな特性の推定値を識別したり調節したりするために使用することができる。

前節から、適切なモデルの検証とアップデーティングの戦略を開発することは、多くの場合複雑な問題であり、特定のニーズに適応されなければならないプロセスとして見られるべきことは明らかです。これには、柔軟でプログラムが可能な環境におけるツールのライブラリへのアクセスが必要になります。

確定的モデル・アップデーティング

構造物の動力学アプリケーションのための、大部分の相関およびアップデーティングの技術は、線形の項に限られた Taylor 級数展開で表現することができる、測定応答と構造パラメータ間の関数的な関係に基づいています。^[2]この関係は次のように書くことができます。

$$\{R_e\} = \{R_a\} + [S](\{P_u\} - \{P_o\}) \quad (1)$$

または

$$\{\Delta R\} = [S]\{\Delta P\} \quad (2)$$

ここで、

- { Re} 参照システムの応答(実験データ)を含むベクトル
- {Ra} パラメータ値の与えられた状態{Po}に対する系の予測される応答を含むベクトル
- {Pu} アップデートされたパラメータ値を含むベクトル
- [S] 感度マトリックス

初期のモデル予測とテスト・データとの相違は、次式によって与えられる重み付き誤差 E を最小にすることにより解決されます。

$$\text{Min}(E = \{\Delta R\}^T [C_R] \{\Delta R\} + \{\Delta P\}^T [C_P] \{\Delta P\}) \quad (3)$$

および必要条件

$$g_i(P) \leq 0 \quad ; \quad P_{\min} \leq P \leq P_{\max} \quad (4)$$

マトリックス[CK]および[Cp]は、それぞれ参照システム応答および初期のパラメータ推定値に対するユーザーの確信度を示します。確信度マトリックスが多数のテストの統計的な後処理から導き出される場合、それらは共分散マトリックスから得ることができます。

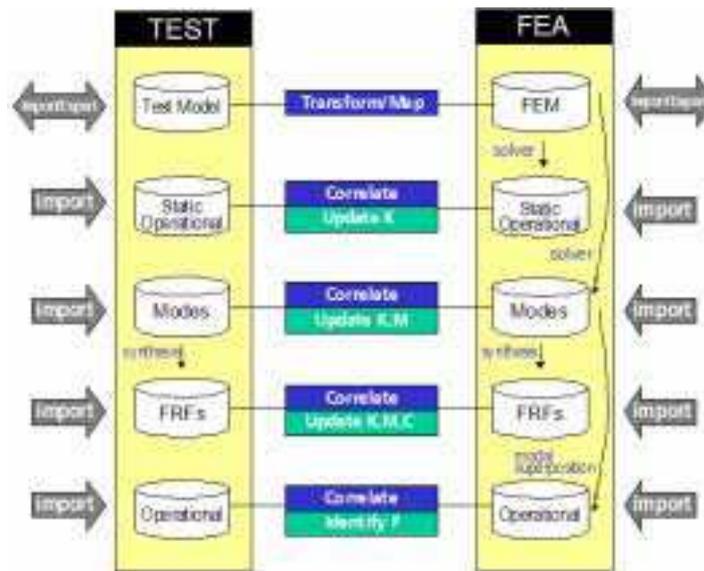


図3 構造解析のためのテスト-解析の相関、および FE モデル・アップデートは、質量(M)、剛性(K)、減衰(C)、あるいは荷重(F)をアップデートするために、静的応答または動的応答データを含むことができる。

(3)式から導き出され、かつパラメータ値に関してEを最小にすることは、シミュレーション結果とテスト結果の間の誤差を縮めるアップデート・パラメータ値の同定を可能にしますが、同時に、オリジナルのモデルとアップデートされたモデルの間の誤差を最小に保つことにも可能になります。

一般的な設計の最適化問題と、(3)式および(4)式によって定義されたモデル・アップデートとの類似性は著しいものがあります。しかしながら、設計の最適化における「目的関数」が、通常はコスト、重量、信頼性などにおける設計の品質を示すのに対して、モデル・アップデートは、観察される挙動をより正確に予測するために、同時にモデルに対する変更を制限します。一方で、有限要素モデルを改善することに関し、これは、目標、変数および制約の異なる選択に変換されます。設計の最適化では、パラメータの制約が満たされれば最適は受理可能です。モデル・アップデートでは、モデルに対する変更は、入力パラメータの予期された変化の範囲内に留まるべきです。これは適切なパラメータ制約を満たすことによるだけでなく、最も適切なパラメータのアップデートによっても保証されます。

別の主要な問題は、連立方程式((1)式)が通常は劣決定系ということです。すなわち、アップデート・パラメータの数が、応答の数を大きく超えています。その可能な解決策は、アップデート・パラメータの数を減らすか、応答の数を増やすことです。アップデート・パラメータの数を減らすには、次のようにいくつかの方法があります。

- 局所的な相関分析、感度解析および不確実性解析のような技術を使用して、入力パラメータの重要な組み合わせの数によってモデル・サイズを縮小すること。
- 要素をグループ化し、ローカルな要素レベルでのアップデートの代わりに、グループに対するグローバル・パラメータを選択すること。
- 多くのパラメータ関係((4)式)を定義し、独立パラメータの数を縮小すること。(3)式の[Cp]マトリックスはまた、パラメータ間の関係を表現する可能性を表していることに注意すべきです。
- ボトムアップ・モデリングおよびテスト方法論を使用すること。このアプローチでは、アセンブリを構成するさまざまなコンポーネントが最初にモデル化され、テストされ、そして別々にアップデートされる。これは、接合部のモデリングに注目することを可能にし、アセンブリのさまざまな段階での繰り返しが後に続く。

代わりに、応答の数を増加させる可能性があります。

相関の目標を加えること。質量、変位、周波数応答関数、または共振周波数のように直接測定が可能な応答に加えて、MAC またはモードシェープの直交性のような計算された相関目標も含めることができます。(図3および図4)

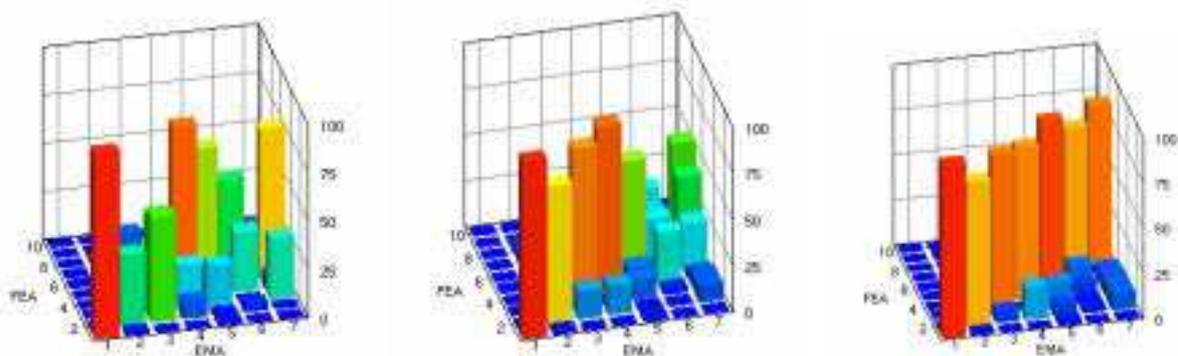


図4 モード信頼性評価基準(MAC) :左は FE モデルをアップデート前、中央は目標としてテストの共振周波数を使用した場合、右は目標としてテストの共振周波数+MAC=100を使用した場合を示す。

- FE モデルの異形 (variants) において共通なパラメータを同時にアップデートすること^[3]。例えば、衛星用のソーラーパネルは、配備の段階、および FE モデルが存在する各段階に対してテストすることができる。これは、あら

ゆる構成で共通な要素特性をアップデートするための参照として役立つ、より豊富なテスト・データの集合を提供します。そのような特性は、例えば接合部の剛性とか材料特性であっても構わない。別の例としては、燃料レベルでテストされるロケットの発射装置、あるいは同定する必要のある複合材料で作られた、異なる形の試験片があります。

- フィールドいっぱい埋められた(光学的)測定データの使用

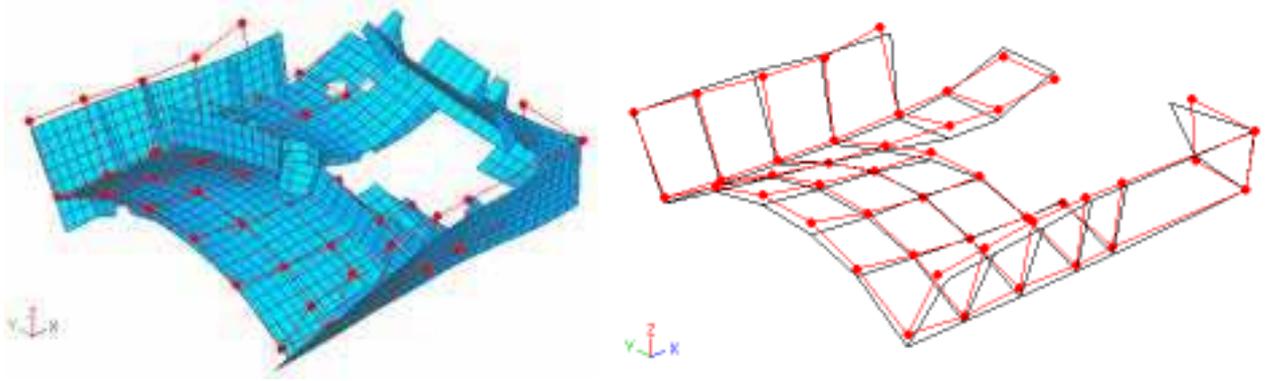


図5 フルモデル・ビューを使ったハードディスク・プレートの FE とテストのモードシェープの重ね書き(左)と、テスト・センサー位置に縮小されたモデル(右)

FEMtools^[4-5]のような専用の商用モデル・アップデーティング・ソフトウェアの主な利点は、それがシミュレーション・モデルの挙動を調査し、かつテストとの相関を改善するためにさまざまな戦略を迅速に試みる広い範囲の応答とパラメータのタイプを提示することです。下記のサポート関連ツールは、簡単で手近に効率を高める必要があります。

- データ・トランスレータ: 双方向のトランスレータは、最もポピュラーな FEA およびテスト・データベース・フォーマット(NASTRAN, ANSYS, I-DEAS, ABAQUS, ユニバーサル・ファイルなど)と共に使用できる。
- ソルバーの統合: 修正後の FE モデルの再解析に、事実上、どんなソルバーでも使用できる。プロセス統合コマンド、トランスレータおよびドライバーは、反復的アップデーティングのサイクルを自動化するために使用できる。
- データベース管理: インポートされたモデルと結果は、考えられる任意の方法で編集したり、視覚化したり、あるいは処理することができるテーブルのリレーショナル・データベースに変換される。代表的な操作は、座標系の変換、モードシェープの正規化、およびトポロジー、材料、または幾何学特性に基づく要素セットの作成です。
- パラメータおよび応答選択: あらゆる物理的な要素特性(材料、幾何学)、集中特性(例えば、質量)、および減衰(モード、粘性、構造)は、ローカルまたはグローバル・アップデーティング・パラメータとして選択することができる。ソフトウェアは特性カードを管理し、新しい要素セットを作成しながら手動で新しい特性カードを作成する煩わしさを取り除く。アップデートの目標または相関の目標が MAC のような基準に対して指定することができるので、測定可能な構造物の応答はすべてを選択することができる。
- プリテスト解析: 構造物の基本有限要素モデルが利用可能な場合、それはテストをシミュレートするために使用できる。さまざまな可観測性あるいはモードシェープの直交性基準を使用すれば、テスト・エンジニアは、構造物を測定し加振する最適な位置と方向を見つけることができる。FE モデルは、これらの位置にまで縮小されて、テスト・モデルに変換することができる^[6-7]。
- 相関解析: この仕事には、テスト・モデルの FE モデルへの写像、視覚的相関、FRF 相関、ローカルおよびグロ

ーバル・シェープ相関、およびを反復的モデル・アップデーティングの間の収束を監視するために使用できる相関の数量的なレベルの計算が含まれる[8]。モードシェープ相関のいくつかの例については、図5および図6を参照されたい。

- 感度解析: 感度係数は、パラメータ値の修正の結果として応答値(例えば、共振周波数または質量)の変動を数量化します。
- パラメータ推定: (3)式および(4)式によって定義されるモデル・アップデーティング問題は、多くのパラメータ(FEモデルの要素数を最大とします。)を潜在的に含んだ、本質的に制限付きの多重目的最適化問題です。さまざまな方法が考えられるが、重み付き最小二乗法です。ベイズのパラメータ推定法は、バランスのとれたスムーズな収束を得るために、速度と容量の点から非常に適切であることが分かった。

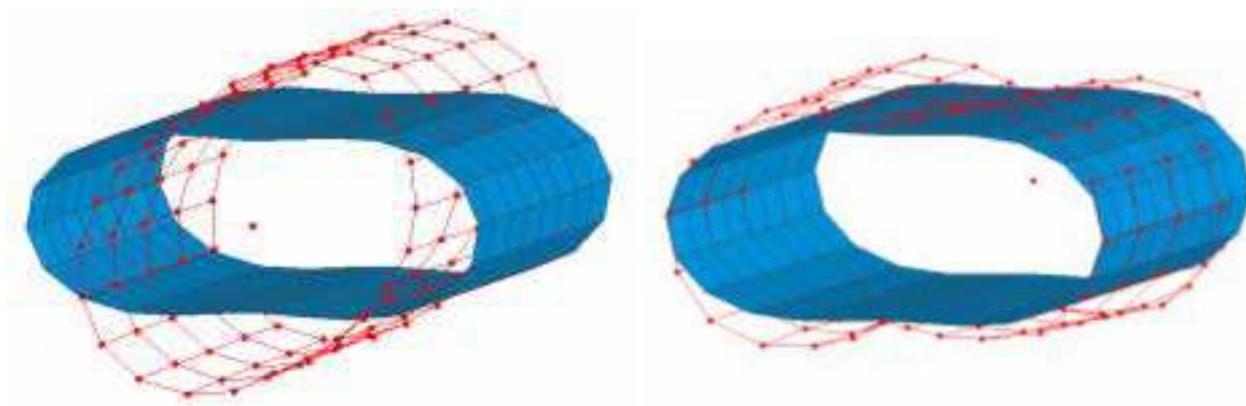


図6 軸対称構造物のモードシェープ相関は、ダブルモードの自動スケールリングとローカルな回転を必要とします。左図は、FE モード(青)とテスト・モード(赤)のオリジナルの重ね書きを示す。右図はモード変換後の重ね書きを示す。

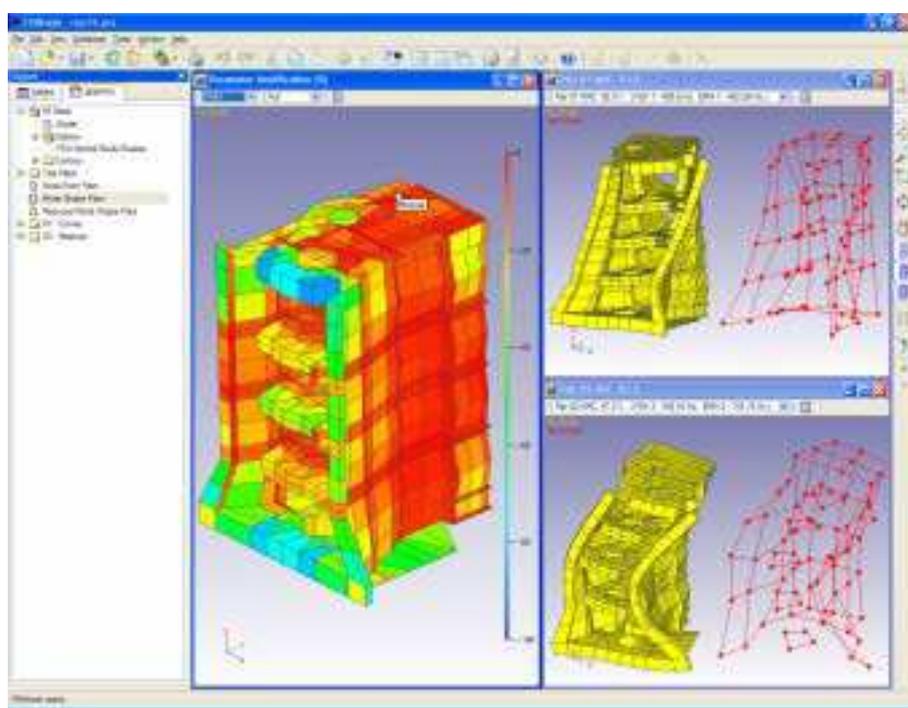


図7 マルチウィンドウ・ツールボックスを使ったエンジン・ブロックのモード相関と感度解析

構造変更シミュレーション:このツールは、再メッシングおよび再解析の必要なしに構造物の動的応答に対する構造変更の影響を、迅速に適用し解析するために使用されます^[9]。受け入れ可能なパラメータ・アップデートを見つけることができる場合、モデル化において使用された詳細の幾何学的レベルを再調査することが必要かも知れない。例えば、集中質量あるいは補強材ビームを加えたり取り除いたりする効果を迅速に評価することができます。

これらのツールは、下記の設備も提供するフレームワーク環境において提供されます。

- グラフィックス:プロセスのあらゆる段階のデータを、2D および3D グラフィックスを使用して視覚化することは肝要です。複数のグラフィックス・ウィンドウを、左右に並べて比較するために開くことができる。アニメーションと、テストの位置に縮小された FEA モードのような特別なグラフィックスは、構造物についての理解を得るのに有用です。(図 7、図 8)。
- ユーザー・インターフェイス:ツールはすべて、カスタマイズ可能なメニューおよびツールバー、あるいは自動手続きのためのコマンド言語によってアクセス可能です。
- スクリプト言語:内蔵のスクリプト言語と API 関数ライブラリは、制限のないインテグレーション、オートメーション、およびカスタマイゼーションに対して、あらゆる FEA およびテスト・データへのアクセス、解析ツール、およびグラフィックスを提供します。

確率的モデル検証とアップデーティング

バラツキの存在において、単一の確定的応答は点群の中の1点のみを表し、したがって類似と傾向に関する情報はほとんど伝わらないことは明らかです。一方、点群は、応答値が規定されたレベルの上か下にある確率という言葉で解釈できます。少なくとも、すべての応答は、解析者が真の応答値はこの間隔内に存在するだろうと考える確信の度合いに関する情報を持った間隔として定義され、必要なら、付加的な統計情報は引き出すこともできます。

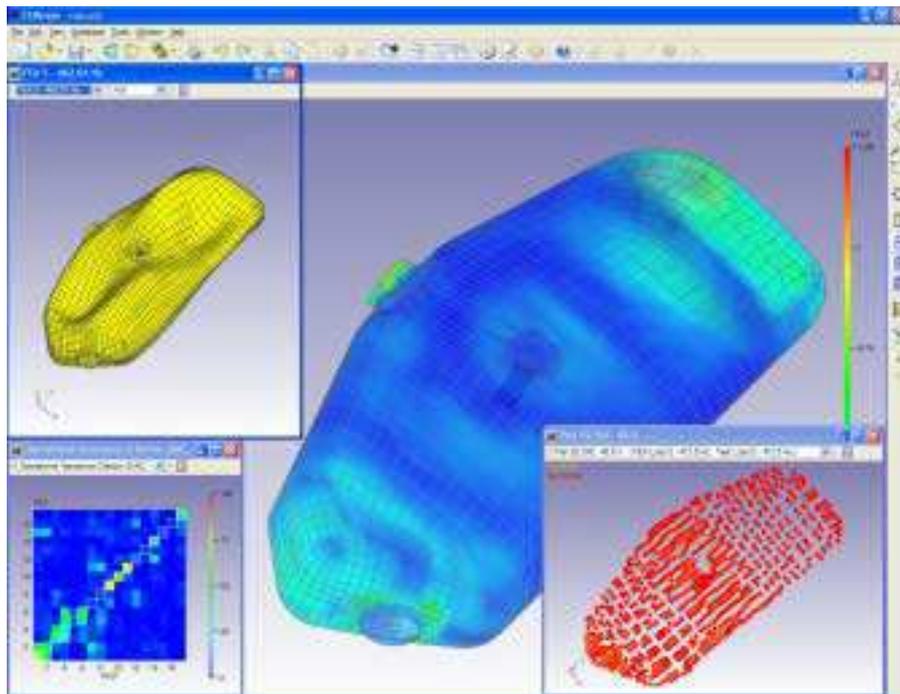


図8 外側表面で実稼動シェープ (ODS)、シェル弾性モード、および空洞の音響モードの測定に基づくマフラー空洞内の分布圧力の同定。測定はレーザー走査装置を用いて行われた(赤いマーカー)。

点群を得るには、製品の変動性を識別するために一連の類似の製品をテストするだけでなく、(物理的なバラツキを明らかにするために)同じ製品の繰り返しテストも必要です。シミュレーションの側からは、アップデーティング・パラメータはランダム化する(つまり、統計確率分布を適用する。)ことができ、モンテカルロ・シミュレーションのような確率的解析ツールを使用して、あらゆるパラメータ応答の組み合わせに対する点群を得ることができます。入力変数の各状態(サンプルとも呼ばれる)に対して一つの点が存在する統計の場合では、すべての点群を集めたもの、個々の入出力変数の組み合わせに対するもの、モデルの新しい概念の構造などは、しばしば文献ではメタモデルと呼ばれる。これらの点群から、出力応答のヒストグラム、中間値および標準偏差のような統計的な後処理結果が得られます。

シミュレーションによって得られた点群と実験的に得られた点群の間の相関性は、統計的な手段を用いて解析されるべきです。一つの例が、次式で表されるマハラノビス距離です。

$$d_M = (\mu_1 - \mu_2)^t \text{COV}_p^{-1} (\mu_1 - \mu_2) \quad (5)$$

ここで、ベクトル μ_1 および μ_2 は各メタモデルの重心を表し、 COV_p は共同共分散マトリックス^{*1}を表す。(3)式との類似に注意すべきです。相関の確定的尺度が、例えば共振周波数に関する平均的相対誤差のように、良いも悪いも確信度に依存するスナッフ・モーションの尺度しか提供しないのに対して、マハラノビス距離は、それが点群の位置と形に基づいているので、明らかに遥かに安全な尺度です。一致とかパラメータ推定による運の良し悪し、あるいは変化する測定条件は、この結果にほとんど影響を及ぼすことはありません。

数値シミュレーションとテストの双方にとって、メタモデルの概念は、マハラノビス測定基準とともに、統計的な探りと厳密な方法で応答の比較を可能にします。その点群の位置と形とサイズは、参照するテストのメタモデルと比較されるべきです。例えば、図9に示されるバラツキ図から、2つの楕円の主軸における違いは、構造物の幾何学形状の離散化における主要な欠点、2つのモデル間の物理的な矛盾、または単なるモデル化のエラーを示唆しています。点群の相対的な並進移動と全体にわたるサイズは、相対的な回転移動よりも修正が容易ということは明らかです。前者は単に機械的なエラーかグローバル・エラーを示し、一方、後者は通常、(ローカルな)物理的なエラーを示します。

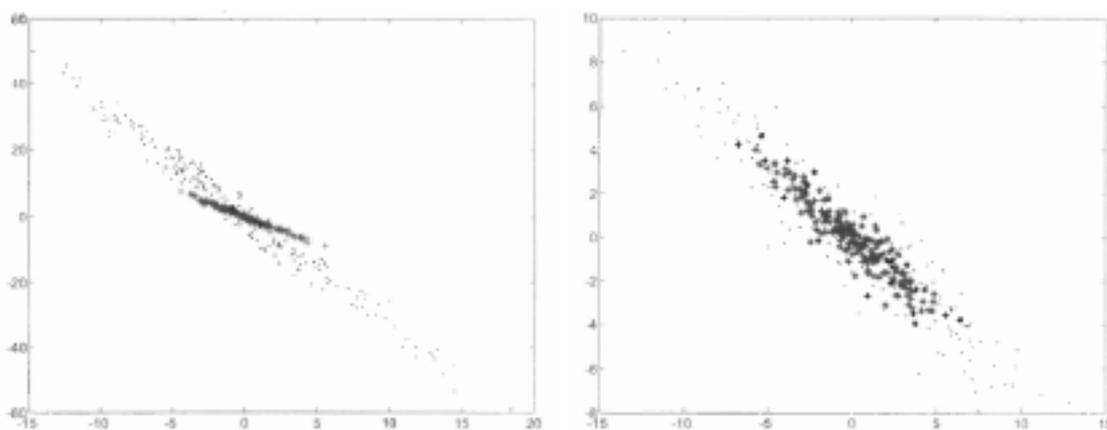


図9 点群を用いて表された、物理的に離れたモデル(左)と接近したモデル(右)

第2に、2つのモデルにおけるバラツキのレベルが明らかに異なる。これはある場合には望ましいかもしれないが、テスト・データに関するバラツキとのバランスがとれた、ある一つのバラツキのレベルを示すシミュレーション・モデルを得ることの方が一般に望ましいことです。

モデル・アップデートに向けたメタモデル解析の基本的な目的は、系を支配するパラメータを正確に示す可能性、および入力と出力の変数間の相関を定量化することです。これは、確定的解析における感度解析に相当するものです。しかしながら、感度もしくは勾配の概念は、バラツキという存在においては、もはや存在しません。したがって、バラツキが非常に低レベルで無視できる場合でない限り、支配的なパラメータを識別するために他の手段を適用する必要があります。すべての利用可能な応答が、同じように等しく関連するとは限りません。実際、統計的な後処理は隠れた関係を明らかにし、従属および独立の応答を識別するかもしれません。その結果、解析者は最も支配的なパラメータおよび独立の応答だけを含む系の規模を縮小化することができます。回帰分析を用いると、支配的なパラメータと独立応答の関係が確立され、これは、アップデート・パラメータの選択、目標の定義(すなわち、いつ相関が満たされるか)、および結果の解釈のような、確定的モデル・アップデートにおいて残存する障害のいくつかを解決します。それらの見込みを含む確率的解析から得られる補足的な考察がなければ、これらの決定は主として工学的判断に基づいて行われなければなりません。

確率的モデル・アップデートの目的は、対応するテストの点群に一致させるために、確率解析の結果得られる点群の重心、主方向、および密度を変える未知のパラメータの特性に関する連立方程式を解くことです。事実、これは出力の確率密度関数(PDF)が実験的参照応答のPDFに一致するように入力パラメータのPDFを「アップデートする。」こととなります。その最も単純な形式では、正規確率分布を仮定すると、これは(確定的モデル・アップデートにおけるような)名目値に加えて、モデルのパラメータの標準偏差も調節されるべきことを意味しています。

それらが系の性能にどれほど影響を及ぼすかに基づく入力パラメータのランキングが、後の設計改良段階において付加的な利点を与えるということは留意されるべきです。実際、設計者またはエンジニアは、微小な影響しか及ぼさない入力パラメータを用いて時間を浪費する必要はありません。代わりに、設計の機能的な性能は、最も支配的なパラメータのみを用いることにより、最も効率的に修正することができます。これらのパラメータのバラツキを(例えば、製造の許容誤差をもっと厳しく指定することによって)縮小化することは、設計の健全さという面では最も価値のあることです。一方、エンジニアは性能に重大な影響を及ぼさず、プロセスにおいて製造コストを節減するパラメータについては、許容誤差を緩めるべきです。

※1 共同共分散マトリックス:pooled covariance matrix の日本語訳。変数のグルーピングを含む共分散マトリックスをいう。

総括および将来的展望

有限要素解析は、仮想の製品開発を支援するための不可欠なツールとなりました。デジタルの試作にうまく移動させ、それによって物理的な試作の数を減らすには、製品性能の予測は確信度という尺度で与えられ、実験データに対して有効なものになるべきです。FEA とテストのリンクは、エンジニアリングの設計と解析のサイクルのあらゆる局面に触れる複雑なプロセスです。この仕事の複雑さと性質から、専用のソフトウェア・ツールが必要です。このプロセスの実行はオプションではなく、必須です。実践の標準的なコードと品質保証のプログラムにおいて、モデル検証という別の焦点が加わった影響で、産業界ではこの技術を採用するペースを加速しています。

いくつかの傾向と最近の開発は、FEA とテストの統合技術の将来的展望を決定するかも知れません。

- FEA およびテストの間のギャップを埋めるための専用のフレームワークは成熟し続けるだろう。それらはより多くの FEA とテストのシステムをシームレスに接続し、アルゴリズムを更新し、かつウィザードをサポートして、診断ツールの範囲をさらに広げるであろう。
- 解空間をより速く探索するために、リアルタイムのパラメータ変動解析を提供するモデル・アップデートのツ

ールボックスの一部になって、実験計画法、応答曲面法、およびより高次の感度解析のようなツールが見られることが期待される。

- 統計的相関および確率的モデル・アップデATINGは、安定設計^{※2}および信頼性解析の方法と必然的に関連づけられ、かつこれらの技術の調整はそれら相互の利益になるであろう。
- モデル・アップデATINGは、構造物の健康管理^[10]や材料の同定^[11]のようなアプリケーションに重要な役割を果たすであろう。これらのアプリケーションは、テスト機器(2D および3D の全フィールドの測定、無線センサー)およびデータ処理(アウトプット・オンリー・モード解析アルゴリズム、写真測量法、デジタル・イメージ相関)における進歩から利益を得るであろう。変位、速度、加速度、ひずみあるいは温度のより簡単な測定は、シミュレーションのあらゆる分野:例えば 熱、音響、非線形の静的・動的解析におけるモデル検証とモデル・アップデATINGを可能にするであろう。

膨大な計算量によって可能になるこれらの拡張された能力は、もっと信頼でき、もっと活用できるシミュレーション・モデルを作成することに寄与します。そしてそれは、次の数十年間に CAE の可能性を十分に実現することへの必須条件です。

※2 安定設計:robust design の日本語訳。構造物を、簡単に制御できないプロパティ(特性)の差異に対して敏感でないようにすることがこの設計の目標です。例えば、製造の許容誤差が小さいと一般に製造コストが高くなるが、製造の許容誤差に敏感でないような設計をすれば許容誤差は大きくなり、製造コストも下がります。

参考文献

1. Dascotte, E., "The Use of FE Model Updating and Probabilistic Analysis for Dealing with Uncertainty in Structural Dynamics Simulation", Proceedings of the 2003 Japan Modal Analysis Conference (JMAC), September 10-12, 2003, Tokyo, Japan.
2. Friswell M.I., Mottershead, J.E., "Model Updating in Structural Dynamics: A Survey", Journal of Sound and Vibration 167:347-375.
3. Lauwagie, T., Dascotte, E., "Layered Material Identification Using Multi-Model Updating", Proceedings of the 3rd International Conference on Structural Dynamics Modeling - Test, Analysis, Correlation and Validation - Madeira island, Portugal, June 2002.
4. FEMtools 3.0, Software for Correlation, Validation and Updating of Simulation Models, Dynamic Design Solutions N.V., www.femtools.com.
5. Dascotte, E., "Practical Applications of Finite Element Model Tuning Using Experimental Modal Data", Sound and Vibration, June 1991.
6. Larson, C. B., Zimmerman, D. C., and Marek, E. L., "A Comparison of Modal Test Planning Techniques: Excitation and Sensor Placement Using the NASA 8-Bay Truss", Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference (IMAC), 1994.
7. Blesloch, P. A., "Shape - and Matrix Based Sensor selection Algorithms", Proceedings of the 20th International Modal Analysis Conference (IMAC), 2002.

8. Allemang, R.J., "The Modal Assurance Criterion - Twenty Years of Use and Abuse", Sound and Vibration, August 2003.
9. Avitabile, P. "Twenty Years of Structural Dynamics Modification - A Review", Sound and Vibration, January 2003.
10. Load, J.F., Ventura, C., Dascotte, E., "Automated Model Updating Using Ambient Vibration Data from a 48-Story Building in Vancouver", Proceedings of the 22nd International Modal Analysis Conference (IMAC), January 2004, Detroit, MI.
11. Dascotte, E., "Material identification of Composite Structures from the Combined Use of Finite Element Analysis and Experimental Modal Analysis", Proceedings of the 10th International Modal Analysis Conference, February 1992, San Diego, CA.

さらに詳しい情報をご希望の場合は、次のウェブアドレスにアクセスして下さい。

- Dynamic Design Solutions N.V (www.femtools.com)