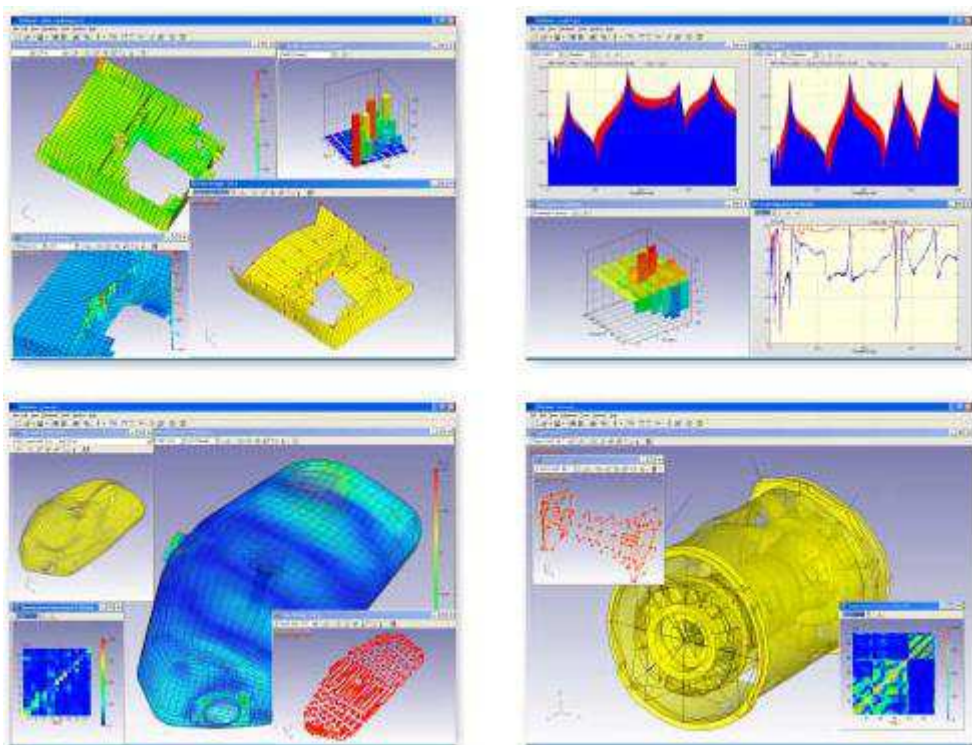


有限要素法解析／実験解析
統合化／CAE ソリューションシステム

FEMtools

アプリケーション・ノート



ストラクチャルサイエンス

解析(FEA)と実験の統合化

はじめに

今日、製品の設計、製造において、メーカーおよび消費者からの多くの要望に伴う条件を満たさなければなりません。それらの高性能、耐久性、信頼性、安全性はもとより、安価、小型化、軽量化が必要とされ、応じて新素材なども使用しなければなりません。また、環境への影響を考慮した設計基準を満たさなければなりません。

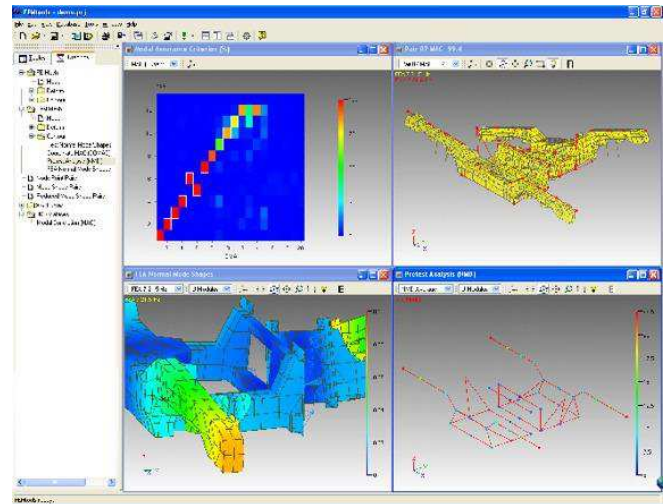
特に、その開発時間とコストの競争力を保つためには、コンピュータ化されたシミュレーション・ツールに依存しなければなりません。有限要素解析(FEA)は、多様な荷重条件での製品構造をシミュレートする強力な技術です。FEA法は、過去30年間にわたり、設計、メッシュ技術、解析およびポスト処理などが高度に統合され、自動化され、解析技術として成熟しました。しかしながら、それらの解析アプローチはシミュレーション・モデル、解析ソフトウェアおよび解析技術者のエンジニアリング判断能力に依存します。

一般に、製品設計と解析を支援する実験的方法は、解析条件あるいは実験条件の下でのプロトタイプの実験にに基づきます。それらは製品の使用条件に関する問題を推定するためにも有効です。しかしながら、一連のプロトタイプによる試行錯誤的な設計や解析のアプローチは多くの時間を費やし、高コストにつながります。そのため、そのプロトタイプの試験などの回数を減らすことが必要です。そして、より少ない試験から多くの情報を引き出すことによって達成することができます。

解析と実験の統合化は、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共通のプロセスを可能にします。例えば、

- 解析と実験のデータ統合化は、開発、製造の技術者に対して、設計の最適化、音響学、疲労解析などのシミュレーションに必要な多くの信頼性の高いデータを提供します。
- FEAの結果は、実験方法(プリテスト解析)を最適化するために使用することができます。
- 統合化によって、構造特性、材料特性、荷重(非破壊試験)を迅速に識別することができます。
- 有限要素モデル(誤差局在化、相関分析、モデルアップデATING)を最適化するためには、実験結果が参照データとして使用されます。そして、未知あるいは、誤った物理特性を識別し、有限要素中の不確実性を修正し、モデルを最適化します。
- 実験結果によって最適化された複合的なFEモデルは、そのモデル・サイズと解析の実行に関して適切なバランスを維持することが可能になり、また、より高精度で、完全なモデルを構築するために使用することができます。
- 将来のモデリングに関する専門技術や普遍的な知識を修得し、より迅速な判断、適切な計画を実行することを可能にします。
- 一貫した標準ユーザー・インターフェイスは、それぞれのプラットフォーム上の異なるソフトウェアの技術者間の情報共有を支援します。

FEMtools システムは、統合化に必要なすべての機能を搭載し、さらに、オープン性、カスタマイズの可能性なども提供しています。FEMtools は、標準的なハードウェア・プラットフォームで利用可能な専用ツールボックスとして、エンジニアリング・コミュニティの要望を満たすソフトウェア・プログラムです。



FEMtools プロジェクト・スクリーンショット

FEMtools は標準構成として、あるいはオプションのアドオンを追加することも可能な多くのツールで構成されます。例えば、以下の技術がそれぞれプログラム構成に応じて利用できます。

- 解析とテストのデータのインターフェイス
- データベース・マネージメント、統合化ソルバーおよびCAEプロセスの自動化
- メッシュ生成、メッシュ・モーフィング、メッシュ精度の検証
- 動解析、モーダル解析と実稼動解析
- 実稼動シェープ(ODS)解析
- 剛体特性エクストラクター
- 有限要素とテストのモデルによる構造ダイナミクス・シミュレーション
- プリテスト解析と設計
- 解析/テストの相関分析
- 感度解析、確率論的パラメータ解析
- FEモデルアップデATINGの自動化
- ダイナミクス同定、静解析、応力解析
- 設計最適化(位相、シェープ、サイズ、材料)
- 設計空間サンプリング(モンテカルロ・サンプリング、実験計画法、応答サーフェイス・モデリング、遺伝的アルゴリズム)
- 遺伝的アルゴリズムによる最適化
- 不確実性と蓋然的構造解析

FEMtools の概説

FEMtools は、次のアプリケーションのために使用される多機能な CAE プログラムです。

- FE モデルの検証とアップデーティング
- 構造設計の最適化
- CAE プロセスの統合化と自動化
- エンジニアリング・データベース管理

FEMtools はユニークなソフトウェアです。汎用の有限要素プログラムではありませんが、内部標準要素ライブラリやパワフルなソルバーのような FEA の能力を提供します。また、物理的なテスト用のソフトウェアではありませんが、テストモデルをインポートすることもできます。

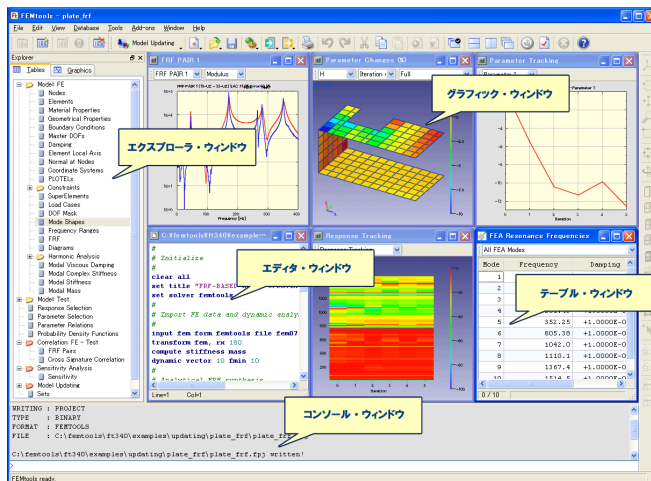
種々のアプリケーションは、データ・インターフェイス、データベース管理、静的変位解析、実モードおよび複素モード解析、周波数応答解析、実稼動解析を含むフレームワーク上に構築されます。グラフィックスビューアは、メッシュや解析結果の視覚化をサポートします。パワフルなスクリプト言語と API が、プログラムをカスタマイズし、拡張するために組み込まれています。

FEMtools は、有限要素データと実験データの双方を取り込むことができる内部リレーショナル・データベースのまわりに設計されたモジュラーソフトウェアです。

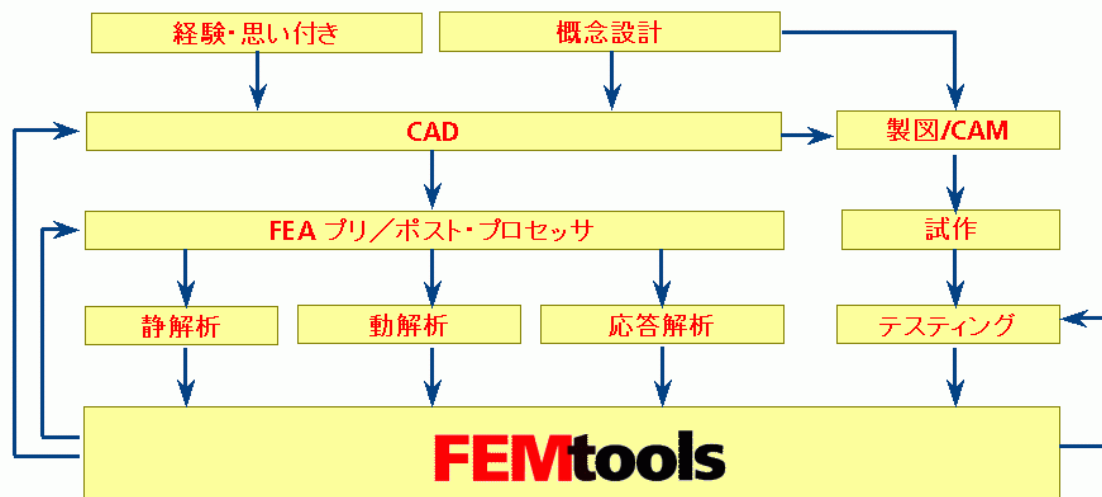
- **FEMtools Framework** - これはデータベース管理、対話式グラフィックス、スクリプティング言語および API 用のツールを含む中核プラットフォームです。レベル 1 の FE インターフェイスおよび、静解析と動解析のための要素ライブラリとソルバーは、オプションで加えることができます。
- **FEMtools Dynamics** - これは先進の動解析用のツールを加えた FEMtools Framework の拡張版 (FEA ソルバー付き) です。
- **FEMtools Correlation** - これはプリテスト解析とテスト解析相関分析を加えた FEMtools Framework と FEMtools Dynamics を含みます。

- **FEMtools Model Updating** - これは感度解析、FE モデルアップデーティング、調和外力同定、確率的解析、および実験計画を加えた FEMtools Correlation の拡張版です。
- **FEMtools Optimization** - これは一般的な非線形最適化、形状、寸法、トポロジー、およびトポメトリ最適化用のコマンドとび関数を加えた FEMtools Dynamics の拡張版です。
- **FEMtools Model Updating + Optimization** - FEMtools Model Updating と FEMtools Optimization を組み合わせたフルセット製品です。

FEMtools は、広範な産業 (自動車、航空宇宙、海洋、土木/建築エンジニアリング、機械、...) での構造解析アプリケーション、有限要素モデルに対応します。そのプログラムは既存の CAE 環境を統合化し、多くの計算応用プラットフォームや汎用エンジニアリング環境で利用可能です。



FEMtools プロジェクト・コントロール

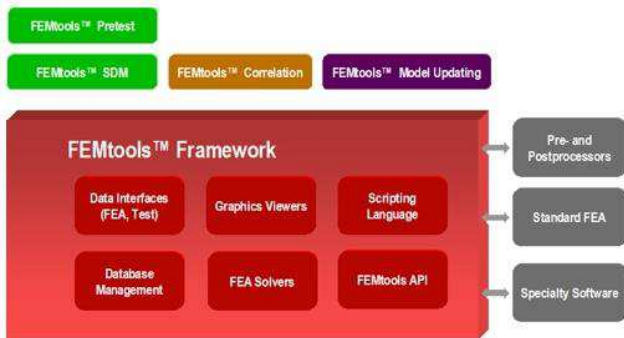


統合システムのモジュール構成

FEMtools™ Application Framework(アプリケーション・フレームワーク)

概説

FEMtools アプリケーション・フレームワークは、データ・インターフェイス、データベース管理ユーティリティ、高精度のデータ・ビジュアル表示、スクリプト言語記述、API 関数ライブラリなどのすべてのユーティリティ・ツールを含む多機能なインタラクティブ CAE 環境で構成されます。また、FEMtools アプリケーション・フレームワークは標準有限要素ライブラリ、線形静解析ソルバー、正規モード解析ソルバー、周波数応答解析、調和応答解析を搭載します。さらに、Nastran、ANSYS、ABAQUS、I-DEAS などの外部ソルバーとも容易に統合することができます。



特徴

- 有限要素とテストのデータを共通のリレーショナル・データベースに変換します。
- エンジニアリング・シミュレーションおよび実験データを分析し、視覚化し、管理し、レポートします。
- 内部ソルバーあるいは汎用の FEA ソルバーを使用し、静的/動的な FEA 問題を解析します。
- ユーザー・プログラムを作成するために、多様な内部の数学的関数、API 関数を使用し、FEMtools スクリプトを記述することができます。

ダイレクト・データ・インターフェイス

FEMtools アプリケーション・フレームワークは、既存の CAE 環境と統合することが可能なオープンなプログラムです。その双方向のインターフェイスは、標準的な FEA (NASTRAN、ANSYS、I-DEAS、ABAQUS、UFF、...) や実験データベース・フォーマットおよび MS Excel や MATLAB などの応用ソフトウェアと共に利用することができます。これらの変換はダイレクトに行われます。外部データベースとのインターフェイス機能は、以下のような目的に利用することができます。

- 要素マトリックスおよび動解析結果を含む、完全な有限要素データベースとのインターフェイス
- メッシュジェネレータによって生成された有限要素メッシュのインポート。要素特性および境界条件は、FEMtools において後で追加されます。動解析を使用して、要素マトリックス、正規モードおよび周

波数応答関数が計算されます。

- FEA データとテストデータを比較するための、実験データベースとのインターフェイス
- それぞれのフォーマット間のメッシュデータの変換
- トポロジー、材料、または幾何学形状に基づく要素セットの自動生成

データベース管理

インターフェイス・プログラムは、FEMtools テーブル・データベースへ外部データベースをインポートし、リレーショナル・データベースを構築します。FEMtools アプリケーション・フレームワークは内部データベース中のすべてのデータの定義、編集、変換などのユーティリティ機能を提供します。

- ツリーリストを使ったデータベースエクスプローラ
- スプレッドシートスタイルのテーブル編集
- データベースの整合性の検証
- 座標系の変換
- ローカル座標系のサポート
- 工学単位の変換
- マスターDOF の定義
- スーパー要素の定義
- グヤン(Guyan)、ダイナミック、IRS 法または反復 IRS 法によるシステム・マトリックスの縮小
- オート MAC およびオート直交性チェック
- モードデータベースの正規化、スケールリング、切り捨ておよび拡張
- 要素と節点のセット (集合) の定義
- セットに関するブール演算
- 要素タイプ間の変換

静解析および正規モード解析

FEMtools データベースに適切に FE モデルが定義されている場合、ユーザーは外部で計算された質量と剛性のマトリックス、静的変位、正規モード、複素モード、実験動シェープをインポートすることができます。また、Nastran や ANSYS などの外部標準ソルバーを操作するスクリプトを使用して自動化し、内部の要素ライブラリおよび内部ソルバーを使用することもできます。

周波数応答解析および調和応答解析

FEMtools は解析的な FE モデルのモードあるいは実験モードに関する任意の自由度コンビネーション間の FRF を同定することができます。さらに、ビスカス、構造、モードなどのダンピングに基づく節点調和荷重、圧力荷重などに対する実験動変位、速度、加速度を計算することができます。

データのビジュアル化

様々なデータがインタラクティブな 2D、3D グラフィックスによって、ビジュアル化されます。関数、テーブル、ベクトル結果はカーブ、マトリックス、メッシュなどによってプロット表示されます。その OpenGL グラフィックスは、EWS の最新世代において期待されるグラフィック機能を提供します。

- メニューのカスタマイズ
- テーブルとグラフィックス表示するエクスプローラ
- 文脈依存ポップアップメニュー
- 多重、カスタマイズ可能なドッキング（繋ぎとめ）/フローティング（浮動） ツールバー
- 同時多重のグラフィックス、テーブルおよびエディタ・ウィンドウ
- コマンド入力およびフィードバック用コンソール・ウィンドウ
- オンラインドキュメンテーション
- ジャーナル・ファイル
- 進捗インジケータおよびキャンセルボタン
- HTML レポートウィザード
- 節点および要素のグラフィカルピッキング
- XY-カーブ、マトリックスおよびメッシュのビジュアル化
- ダイナミックビューイング（回転、パン、およびズーム）
- OpenGL グラフィックスレンダリング
- カラーおよびベクトルの指定表示
- 動画表示、並列表示および上書き表示
- AVI 動画ファイルのエクスポート
- Postscript、ビットマップなどのグラフィックス・エクスポート
- 他のアプリケーションとの間でのコピー&ペースト (Windows)

インタラクティブ・インターフェイス

FEMtools は、カスタマイズ可能なメニュー・インターフェイス、コマンド言語、スクリプトなどを經由して操作されます。テーブルの編集、グラフィックス表示は、より直感的に操作され、解析に必要なコマンドを実行するために、それぞれのメニューから素早くブラウズすることができます。また、熟練者はコンソール・ウィンドウにおいてエントリ・コマンドをタイプし、FEMtools コマンド言語を直接的に実行することができます。さらに、手続きを繰り返し実行する場合には、FEMtools スクリプト言語を使用することが可能です。

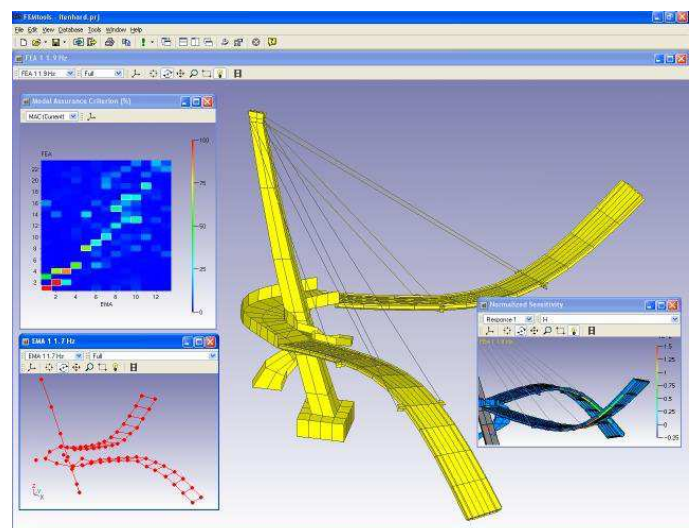
ユーザーは、しばしばそれぞれのデータベースに関する GUI メニューやダイアログボックスへの操作を繰り返したいことがあります。そのすべての操作は、FEMtools ジャーナル・ファイルに記録されるため、ユーザーはそれらの操作を編集し、コマンド・スクリプトとして再度使用することができます。

FEMtools スクリプトおよび API

FEMtools スクリプトは、多くの FEA 解析技術者の要望に応えるために設計された高機能な FEMtools プログラミング言語です。その言語体系は、標準的なシンタックス (Basic) に基づくため、容易に学習することができます。FEMtools データベースおよび既存の FEM データベースや解析ツールへ直接的にアクセスし、数百にも上る FEMtools API 関数を使用することができます。また、ユーザーは、独自の関数やコマンドを実行するために、FEMtools メニュー・インターフェイスをカスタマイズすることができます。そして、FEMtools スクリプトによる FEA をスクリプトとして記述し、独自の解析を実行することができます。

FEMtools スクリプトの特徴

- FEMtools スクリプト・エディタはハイライト機能を搭載しています。そのスクリプト・エディタはダイレクトにコンパイルされ、実行されます。
- 高度な数学プログラミング（配列演算、複素数、マトリックス演算、正規演算、...）関数
- データベース・アクセスのための FEMtools API 関数（400 以上）
- Windows の ActiveX/OLE リンク機能による外部ツール間とのコントロール
- データ・インターフェイス、解析モジュール、グラフィックスへのアクセス
- コンパイルと実行
- エラー・チェック
- データ・サイズは無制限（システム・メモリー・リソースに依存）
- 関数ドキュメント、オンライン・ヘルプから、すべての関数のドキュメントを参照することができます。プログラム・コード例を参照し、新たな FEMtools スクリプト・プログラムに応用することができます。



FEA/実験のダイナミクス解析

FEMtools Dynamics

FEMtools Dynamics は、次のような目的のツールを含んでいます。

- 複素モード解析
- 周波数応答関数解析
- 調和解析
- スーパー要素解析
- 構造変更シミュレーション
- 外力応答シミュレーション

一般に、周波数応答関数解析では、周波数応答関数 (FRF) を得るために、ある位置での応答信号を加振力で割ります。これらの関数は外力に関する情報を含んでいないので、ちょうどモード特性のように、構造物の質量、剛性および減衰特性のみに依存し、それらは相関分析、感度解析およびモデルアップデATING用の応答として有効です。

また、調和応答解析は、調和荷重の下での構造物の応答を検討することができます。

スーパー要素は、いくつかの要素をグループ化することによって定義され、そのサブストラクチャ (部分構造) を別々に解析することができます。スーパー要素は時間領域や周波数領域の応答解析、設計の最適化、確率的解析、ロバスト設計 (安定設計) およびマルチボディシミュレーションのような重要な再解析を必要とする用途に対して、膨大な時間の節約をもたらします。

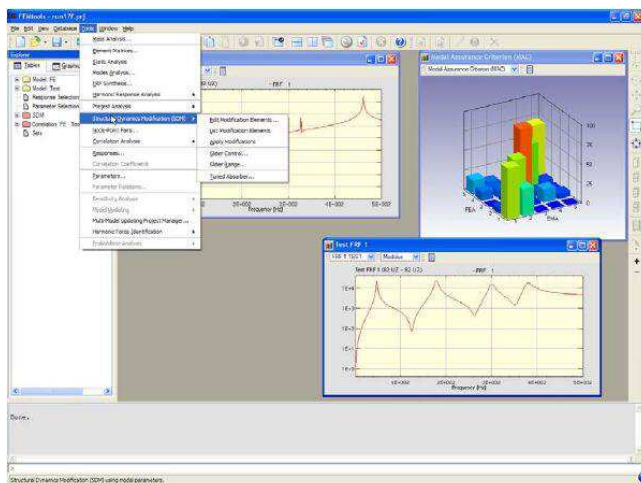
構造変更シミュレーション (Structural Dynamics Modification)

構造変更シミュレーション (SDM) は、多くの構造的変更がモーダル・パラメータに与える影響を迅速に評価するためのモード領域での手法で、FRFs または実稼働形状のような結果を導き出し、テストデータとの相関のレベルについて、種々の異なるモデリングを試みた場合の影響を検討するために使用されます。また、トラブルシューティング、設計、共振周波数を加振振動数からシフトさせる効果的な構造変更方法が分かります。

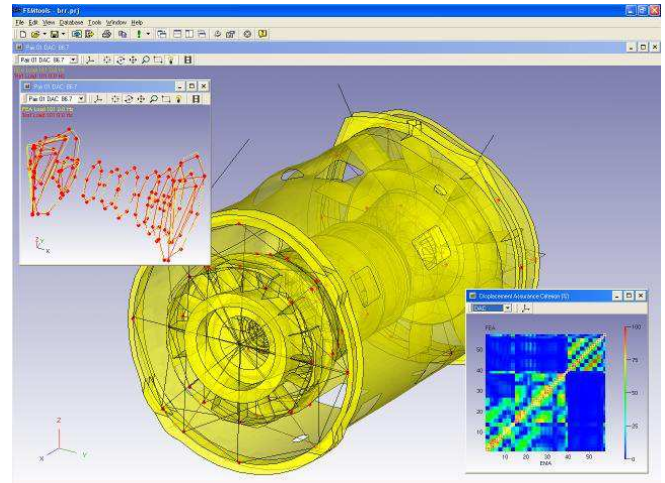
- 有限要素変更は、実験モデルおよび有限要素モデルに追加されます。変更要素はポインティング、クリックによるインタラクティブな定義が可能です。
- 実験モードおよび有限要素解析のモーダル・パラメータを使用し、変更モードシェープおよび共振周波数を解析します。
- 変更要素のすべての物理的特性に関して、スライダー・コントロールによる構造変更解析が可能です。
- 変更前と変更後のモデル間の相関分析
- インバース解析
- 吸収器の設計
- モード (関数) 変化の分析

FEMtools Dynamic の機能要約

- 統合された FEMtools スパースソルバーの使用、または外部の標準的 FEA ソルバーを操縦
- 統合されたクレイグ-バンプトン (Craig-Bampton) スーパー要素解析
- FRF の直接計算
- FEA/テストのモード FRF シンセシス
- 直接解/モードシンセシスの実稼働変位形状解析
- 選択した DOFs での調和応答解析
- 外力応答解析 (加速度、速度、変位の加振)
- テストモデル、有限要素モデルに加えられる変更、Point & Click による変更要素の対話式定義
- モードテスト、有限要素解析で得られる結果を用いた、変更後のモードシェープおよび共振周波数の解
- リアルタイム解析によるモードシェープ、モードシェープ・ペア、FRF、実稼働モードシェープの表示
- 高速のモードソルバーを使用した、応答曲線による変更要素のすべての物性の変動解析
- 変更前モデルと変更後モデルの間の相関分析



FRF ベースの変更シミュレーション



実験静的変位ベースのシェープ相関

FEMtools 相関分析

概説

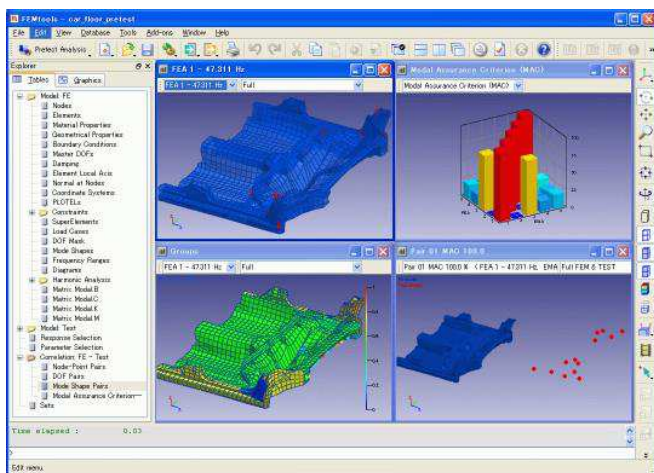
FEMtools 相関分析 (Correlation Analysis) は、FEMtools アプリケーション・フレームワークを拡張したツールボックスです。構造ダイナミクスの技術者に有限要素モデルの最適化、実験条件の最適化、モデル化に伴う問題の分析、誤差の識別などに必要な本質的な機能を提供し、主に以下の機能が搭載されます。

- プリテスト解析 (Pretest analysis) : 実験モード解析に関する測定方法 (加振点と方向) の最適ロケーションを推定します。
- 相関分析 (Correlation analysis) : 空間のモデル相関性、周波数レスポンス関数相関性およびグローバルな形相関性 (静止の置換形、モードシェープおよび運用上の形) に解決策を供給します。
- 誤差局在化 (Error localization) : よりよいかより貧弱な相関性のエリアを識別するために空間の形相関性を使用してください。

プリテスト解析

構造物の有限要素モデルによって、その実験モデルをシミュレートすることができます。これは、実験技術者に構造物の加振や測定センサーの最適な位置や方向を指示する機能を提供します。また、プリテスト解析の結果に基づいた実験によって、最適な相関分析に応用し有限要素モデルをアップデートすることができます。

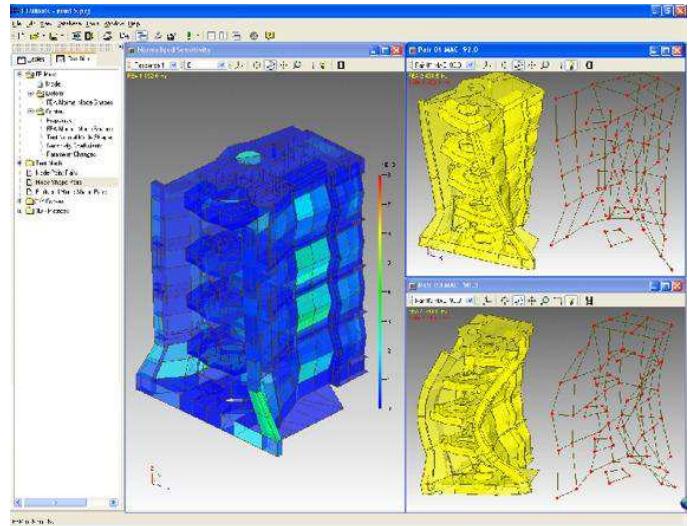
- 実験モード解析のための最適な加振点、保持方法、センサー位置を決定することができます。
- 有限要素モデルを縮小し、実験モード解析パッケージによって判読可能なフォーマットで実験モデルを作成することができます。
- 有限要素モデル曲面の法線方向を決定し、そのデカルト座標に基づく実験モード解析結果に変換します。
- モーダル・パラメータに対する加速度計の質量の影響を評価します。
- 指定周波数レンジにおけるモード数を推定します。



プリテスト解析例

相関分析の特徴

FEMtools 相関は、2組の解析結果データを定量的および定性的に比較するためのツールボックスです。通常、これは FEMtools データベースにインポートされる FEA およびテストのデータベースです。しかし、このツールは FEA-FAE およびテスト-テストの相関に対しても同様に使用することができます。



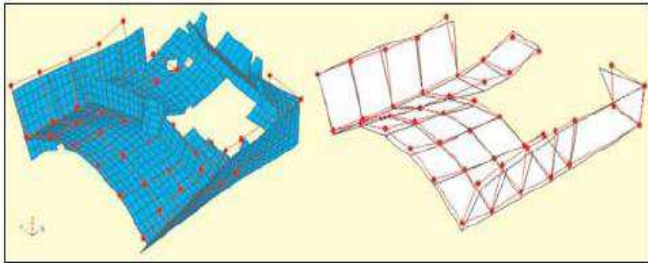
エンジン・シリンダ・ブロックのモード相関

- **位置相関** - 節点と測定ポイントの空間での位置を比較し、その結果、節点-ポイントペアおよび DOF ペアのテーブルを作り出します。これは向きの変更やモデルのスケールの変更を必要とするかも知れません。これは手動でも、自動ツールを使用しても行うこともできます。
- **ビジュアル形状相関** - 解析とテスト結果の形状 (静的変位形状、モードシェープ、および実験モードシェープ) を視覚的に比較します。
- **グローバル形状相関** - グローバルな解析結果の形状とテスト結果の形状を比較します。この情報は形状ペアリングに使用されます。相関ツールは、モード信頼性評価基準 (MAC) とモードシェープ直交性チェックを含んでいます。
- **ローカル形状相関 (エラーローカライゼーション)** - 解析によるモードシェープとテストによるモードシェープを空間的に比較します。その結果は、モデル化の誤差の所在を明らかにするために解釈されます。
- **形状 (シェープ) ペアリング** - 形状のペア (静的、モード、動的) のテーブルを作成します。
- **FRF ペアリング** - FRF ペアのテーブルを作成します。
- **FRF 相関** - 周波数の関数として 1 組の FRF ペアに関する形状と振幅の相関関数を計算します。
- **相関係数** - 応答の選択からの誤差関数の値を計算します。

相関分析の方法

FEMtools 相関は、FE モデルの検証、最適なテスト条件の設計、さまざまなモデリング戦略の評価、モデリング誤差の同定、損傷探知、... などのために使用され、主に次のような機能をもっています。

- モデルの座標およびスケールを変換することができます。それらの変換には、手動や自動による方法が使用されます。
- 解析と実験の位置相関を分析します。これは、双方のデータベースの自由度に関するテーブルにも影響します。
- 結果がモードシェープの場合、その直交条件を確認します。
- シェープと FRF の関係を識別するために双方のデータ結果を相関的に分析し、相関テーブル（量的相関性）を定義します。
- 相関関数（例えば、それぞれのデータベース間の測定誤差や質的な相関性）を計算します。



相関分析の結果は、FE モデルアップデATING用の目標を定義するために使用されます。よく似たモードシェープは、FE およびテストのデータベースにおいて同一とみなされ、したがって共振周波数差、MAC、モード変位に関してレジデュ（残差）をもたらします。

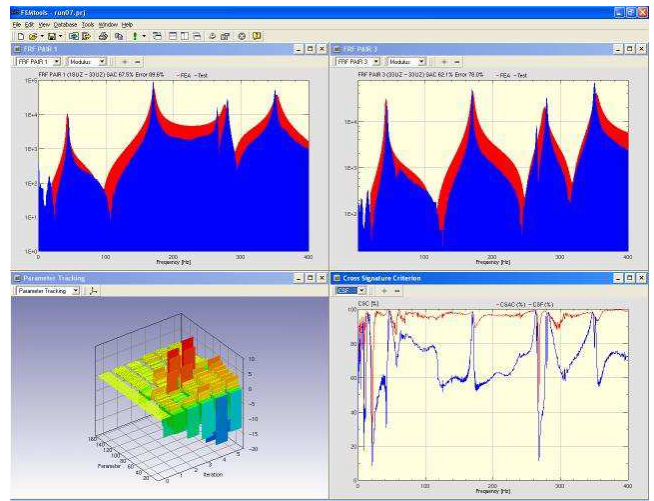
もう一つの用途は、測定でしか得られない情報を解析者に提供することです。たとえば、モード重ね合わせ法で使用されるモード減衰です。モード減衰は実験的に得られ、相関分析を使って、実験によるモードシェープと最もよく一致することが分かった解析モードシェープに適用することができます。

モード相関分析は、output-only モード解析によって得られるテストモードシェープをスケールするためにも使用されます。解析によるモードシェープによって使用されるのと同じスケール（たとえば、単位モード質量）を、相関のあるテストモードに適用することができます。

グローバル相関分析と違って、空間的な相関の方法は、構造物の情報にリンクされたとき、比較的高い相関を示す領域と、「モデリング・エラー」という言葉で解釈できる比較的低い相関を示す領域とを識別するために使用することができます。これらのツールがどのように使用されるかによって、その結果はアップデATING変数（パラメータ）の選択の手助けや構造物の損傷探索のために使用されます。

相関分析の機能要約

- FEA-テスト, FEA-FEA, テスト-テストの相関
- 自動化されたモデルのマッピング
- DOF ペアテーブル、ランキング、フィルターリング
- 静的変位、モードシェープ、実稼働変位の相関分析
- フル・マトリックスまたは縮小マトリックスによるモードシェープのオート/クロス直交性チェック
- ダブルモード（軸対称構造物）のサポート
- 自動モードシェープペアリング
- MAC 寄与分析
- 座標 MAC (CoMAC)、座標直交性 (CORTHOG)、相関モードシェープ差およびモード力残差解析
- FRF 相関 (SAC, CSAC, CSF)
- ローカルテスト座標系を使った相関
- トランスデューサと加振機の最適位置
- ターゲットモードの選択（モード有効質量）
- 候補センサー位置の簡単な選択
- センサー/アクチュエータ位置の可観測の方法（運動エネルギー、ドライビングポイント解析）
- 反復グサン縮小法に基づくセンサー選択用ツール
- センサーの最適位置の自動選択（有効独立法（EI法）、MACによる消去法）



FRF 相関分析の例

誤差局在化

相関分析と異なり、誤差局在化 (Error localization) は、ローカルな相関性を分析します。その位置相関性は最適相関性のエリアを識別するために使用することができます。その主な解析手法は次のとおりです。

- 座標 MAC (CoMAC)
- 座標直交性チェック (CORTHOG)
- 相関モードシェープ差法 (CMD)
- モード外力残差法 (MFR: Modal Force Residues)

FEMtools 感度解析

概説

FEMtools 感度解析 (Sensitivity Analysis) は、解析技術者のバネ剛性、材料剛性、幾何学形状などの設計変数の変更による構造レスポンス (応答) を推定する技術です。これは、パラメータ値の微小変化に対するレスポンス値 (例えば、共振周波数や質量) の変更量として定義される感度係数の計算により行われます。レスポンスとパラメータのすべての組み合わせ係数は感度マトリックスに格納されます。このマトリックス結果は次の目的に使用されます。

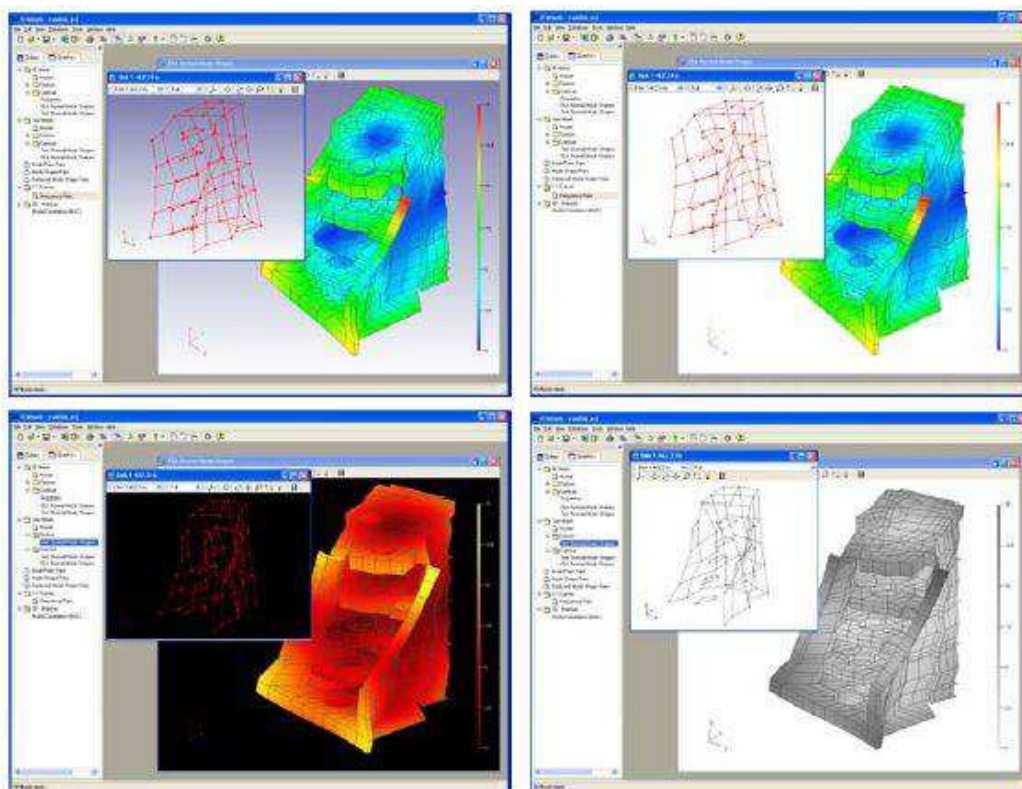
- 仮定の解析 (What-If analysis) : モデル・パラメータ、レスポンス・タイプに基づく仮定のモデリングを検討します。
- 設計の最適化 (Design optimization) : 構造レスポンス値を変更するための最適位置を推定します。
- レスポンスおよびパラメータの組み合わせに基づく構造感度エリア (高感度、低感度) の識別: これは、モデルアップデATINGに使用するパラメータとレスポンスの選択方法に関して解析技術者を支援します。
- モデルアップデATING: 感度マトリックスはゲイン・マトリックスを識別するためにインバース化され、ゲイン・マトリックスは相互誤差の掛け合わせです。また、必要なパラメータ変更の推定するための参照レスポンス値はこの誤差を補完します。
- プリテスト解析: 感度解析は、モード・パラメータとして荷重されるセンサー質量の影響を検討のようプリテスト解析に応用されます。

- アコースティック感度 (Acoustic sensitivities) : それらが音響感度計算に使用される場合、FEMtools で計算された構造感度は、音響解析パッケージにエクスポートすることができます。
- 静的変位感度の分析: 設計とレスポンスの関係を検討します。

感度係数は、差分または有限差分法を使用し、FEMtools 内部によって計算されます。また、FEMtools をプリ・プロセッサとして使用し、そのポスト・プロセッサとして外部感度解析 (例えば、MSC.Nastran SOL 200) を使用することもできます。

特徴

- 設計変数とレスポンスを定義するために使用します。
- 強力な感度解析ソルバーは、すべてのレスポンスとパラメータの組み合わせに関する最大勾配を計算します。
- 結果 (例えば、感度マトリックスおよび相関カーブ) を検討するためのテーブルおよびグラフィックスを出力します。
- 要素マトリックスと感度は、ユーザー・プログラムで再使用することができます。
- 構成に含まれる FEMtools アプリケーション・フレームワークと FEMtools 相関分析とともに、同一データベースおよびユーザー・インターフェイスを共有します。
- FEMtools モデルアップデATINGに利用します。

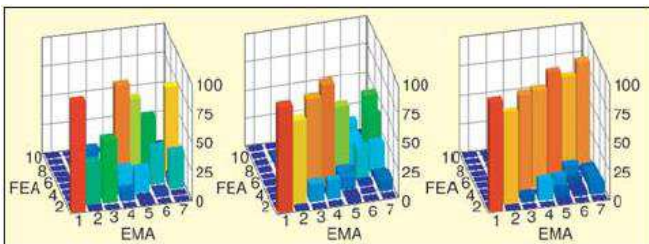


エンジン・シリンダ・ブロックの感度解析

FEMtools モデルアップデートイング

概説

FEMtools モデルアップデートイングは、実験データなどを参照データとして有限要素モデルをアップデートする方法を含んでいます。このアップデート方法は、感度係数に基づいて行われ、シミュレートされたレスポンスと参照値の相関性を改善するために選択した物理的な要素特性（例えば、材料特性、剛性）を反復的にアップデートします。レスポンス・タイプは、静的変位、質量、モード・データ、FRF、実稼動データあるいはMACのような相関値です。アップデートされるパラメータは、すべてFEモデルで使用される質量、剛性および減衰などの特性です。そして、アップデート結果のFEモデルは新たな構造解析に使用することができます。



FEMtools モデルアップデートイングは、FEモデルの検証、振動実験による材料特性の識別、FEモデルの縮小化、損傷の検出などに応用されます。

このモジュールは、調和応答の測定データから外力同定の機能も含んでいます。

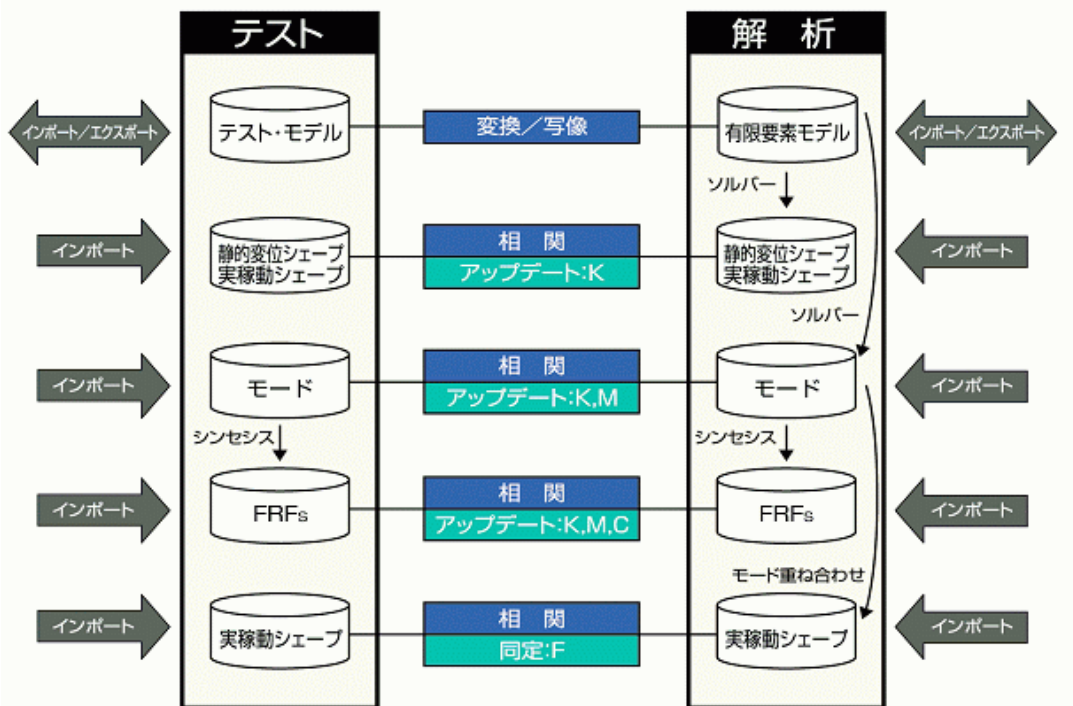
特徴

- 変数アップデートと参照の広範な選択方法
- 感度係数やベイズの推定法に基づく、強力な反復計算、パラメータ選択、モードベースとFRFベースのアップデート・アルゴリズム
- 汎用解析ソルバーおよび再解析用の組織内ソルバーとの統合化
- 解析結果（例えば、パラメータ変更値）を検討するためのテーブルおよびグラフィックス表示
- FEMtools アプリケーション・フレームワーク、FEMtools 相関分析、FEMtools 感度解析は、同一データベースおよびユーザー・インターフェイスを共有します。

モデルアップデートイングの概念

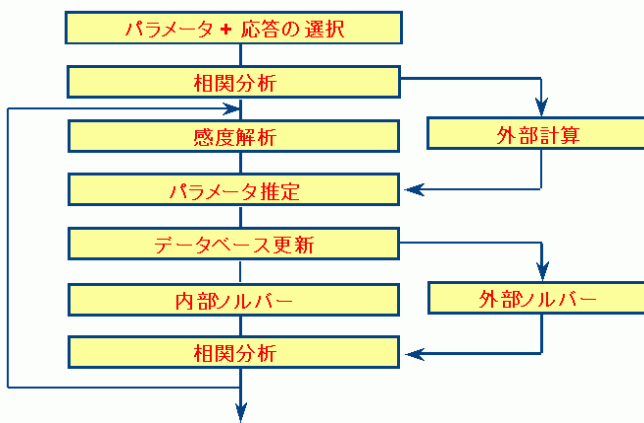
FEAの結果と実験データのような参照データの間の相違は、その物理的関係（例えば、線形のFEM理論に基づくモデリングの非線形性）に起因するかもしれません。あるいは、不適当な境界条件、要素材料特性、幾何学的特性、実験データの粗いメッシュによるモデリングの不確実性によるものかもしれません。

これらの「誤差」は、モデル化に伴う不確実性情報の不足によって生じます。そのため、FEA結果に対するそれらの影響を分析し、FEモデルに関する誤差を縮小しなければなりません。モデルアップデートイングは、FEモデルの誤差を修正し、最適な構造データを作成するための俗称になりました。



相関分析、モデルアップデートイングのための統合化データベース

モデルアップデーティングは、FEA のデータと実験データ間の改善条件が達成されるまで、FE モデルの材料特性、幾何学特性、境界条件などを修正することによって行われます。直接法と異なり、FE モデルをアップデートする目的は、その再生可能な数学モデルを作成することによって、不確定要素を伴うモデルを修正し、最適なパラメータに基づくモデル化を達成し、また、物理的に意味のある変更を加えることにより、モデルと実験のデータ間の相関性を改善することです。そして、実験を繰り返すことなく、そのアップデート FE モデルにおいて、新たな荷重、境界条件、条件下（ダメージ、損傷など）をモデル化するために使用することができます。さらに、そのモデルを使用し、実稼動変位や応力などを推定するために使用することができます。



モデルアップデーティングのフローチャート

FEMtools モデルアップデーティングの方法

有限要素モデルをアップデートするには様々な方法があります。FEMtools の感度係数、ベイズの推定値に基づいた反復法、パラメータ・アップデート、モードベースと FRF ベースのアップデート・アルゴリズムを使用します。

モデルアップデーティングの方法は、FEA 結果と実験間の相違を縮小するアップデート・パラメータの変化を推定するために感度が計算され、その結果から FE モデルのアップデート・パラメータとしての新しい値を使用し、修正されます。また、このプロセスは相関関数によって分析され、許容する収束基準まで繰り返されます。

主な参照値(構造レスポンス)

次の参照レスポンス・タイプを FEMtools で選択することができます。

- 構造質量、部分構造質量
- 静的変位
- 共振周波数
- 独立モード変位
- MAC 値
- 周波数応答関数(FRF)値 (指定の周波数振幅)
- FRF 相関関数値 (シグネチャー、振幅相関係数)
- 実稼動の変位、速度、加速度

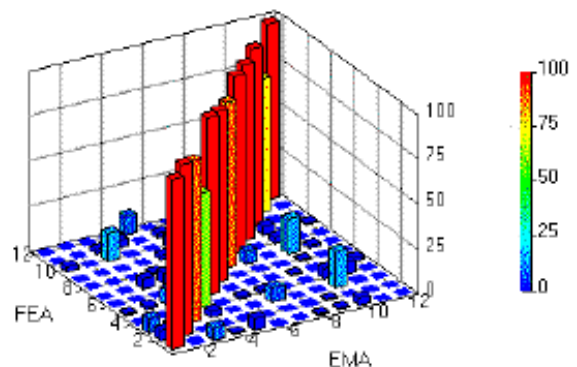
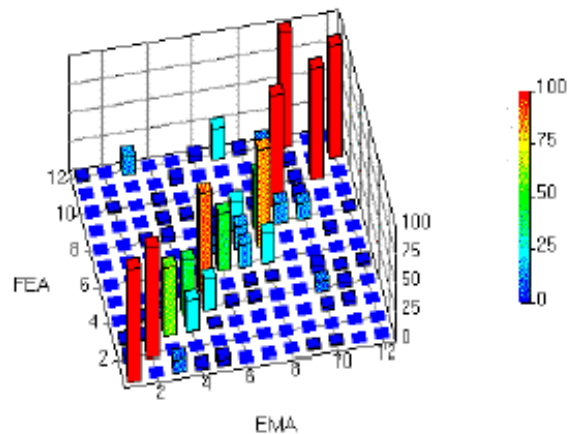
主な設計変数(パラメータ)

次のパラメータ・タイプを選択することができます。

- 材料特性：ヤング率 (等方性、直交性)、ポアソン比、せん断係数、質量密度
- 幾何学要素特性：バネ剛性、プレート厚さ、ビーム断面特性
- 集中特性：弾性拘束 (境界条件)、集中質量
- 減衰特性：モード減衰、レーリー減衰係数、粘性 (ビスカス) 減衰値、構造減衰値

主な機能の特徴

- ローカル、グローバルのパラメータ
- 任意のパラメータ、レスポンス組み合わせ
- マルチ・モデルアップデーティング、パラメータリンク
- 相関関数の定義とカスタマイズ
- アップデート・パラメータの重み値、ユーザー確信度を示すターゲット値の定義
- アップデート・パラメータの条件定義 (最大反復数、最大および最小の許容値)
- 内部あるいは外部の感度係数の使用
- 最適計算用の感度マトリクス自動スケーリング
- 静/動解析の内部および外部ソルバーのサポート
- パラメータとレスポンスのトラッキング
- コマンドの実行、データベースの回復



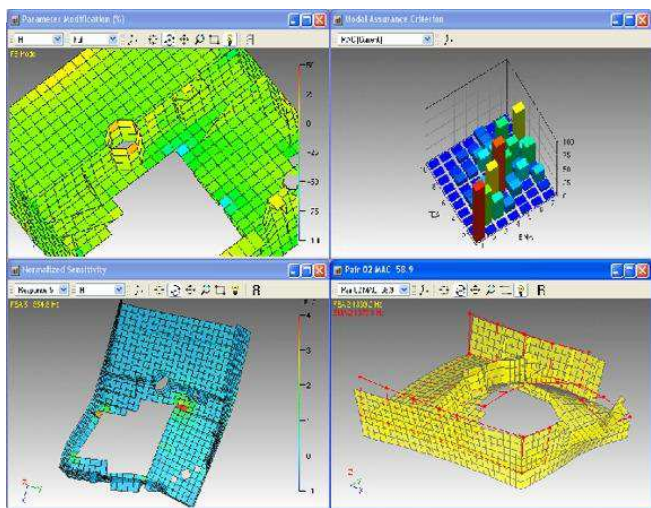
モデルアップデーティング前後の MAC 関数

実験解析との統合化

モデルの検証と修正

モデルの検証は、技術解析品質保証基準（ISO9001）に基づくべきです。FEモデルの検証はそのモデリングの理想化が立証され、正しい解析結果が得られなければなりません。有限要素解析の多くのパラメータが不確定な場合、必然的に実際の構造特性と解析結果との相違を示します。

FEMtools 相関分析は、解析結果と参照データとを比較し、その相違を分析するために利用します。不確定なパラメータが識別され、それらが解析において重要と評価されます。また、必要に応じて、FEMtools 感度解析が実行され、FEMtools モデルアップデューティングはモデルの品質を改善するために使用されます。さらに、FEMtools は解析モデルの概念設計、FEモデルあるいは実験のセットアップを支援するために使用することができます。



コーナー部のメッシュ特性の検証

FEモデルの縮小化

最近の有限要素構造は、何十万もの自由度(DOF)を必要とする複雑な幾何学形状を作成しなければならない場合があります。比較的単純な構造においても、例えば、パーツ間のボルト締あるいは溶接などの構造を高密度のFEメッシュによってモデル化しなければならない場合があります。そのような大規模モデルの解析では、計算上の負担は大きな障害になります。

一般に、FEモデルには、計算上扱い易いモデル・サイズを維持するために構造形状および接続関係を単純化し、またシミュレーション・タイプに依存した単純なモデル化が要求されます。例えば、音響解析などで使用する高密度なメッシュは対象周波数レンジに依存します。

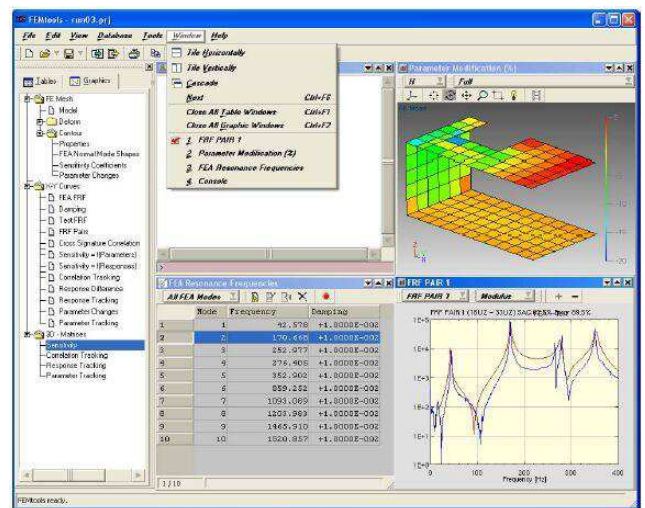
そのような高密度なメッシュは重要な部分のみにおいて必要であり、多くの残りの要素に対しては、粗いメッシュによって十分に等価なモデルを作成することができます。そして、それらの要素に対して割り当てる質量や剛性に基づく物理特性（例えば、要素の厚さ、バネ剛性）最適化することが重要です。

損傷(ダメージ)の検知

アップデート後の有限要素モデルは、実際の損傷を伴う構造の動特性を観察するために反映することができます。さらに、このモデルが損傷を受けていない構造物を参照モデルとして比較すると、その構造変化は、モニタリング、損傷の検知あるいはQA法として役立ちます。損傷検知の主な機能は次のとおりです。

- 損傷の存在の識別（相関分析）
- 損傷位置の識別（誤差局在化）
- 損傷の大きさの推定（モデルアップデューティング）

損傷が識別されると、構造上の修理方法やパーツの交換方法を決定することができます。実際、損傷検知は、誤差局在化法だけでなく相関分析、感度解析、モデルアップデューティング、数学的実験（損傷パターンのシミュレーションなど）にも依存します。損傷検知はまだ広範囲な新しい研究を必要とする領域であり、いくつかの基本的な手続きが提案されています。さらに、正確な損傷検知は実験データの精度に依存することは明らかです。



モデルアップデューティング応用構解析

構造モニタリング

構造寿命間において、その検知手続きが特定の間隔で繰り返される場合、この損傷検知が応用されます。最初に必要なのは損傷の存在を識別することです。損傷が識別された場合のみ、次のステップが行われます。

品質管理/残余構造寿命予測/材料の識別

検知手続きが大量の同一製品上で適用される場合、損傷検知が応用され、損傷の存在を識別することが必要です。さらに、疲労解析と構造モニタリングを組み合わせることによって、動的荷重下の残余構造寿命を推定することが可能です。また、材料特性がグローバルなアップデート・パラメータとして選択される場合、非破壊材料試験法（複合材、積層材などの材料特性の識別）にも利用されます。

確率的解析

現在の FE モデルの検証とアップデATINGは、実際には入力パラメータとテスト結果に対する名目的な値に基づいています。確率的解析機能を持つ拡張ツールとして、モデルの検証とアップデATINGのプロセスにおける不確実性も組み込んだソリューションが可能です。

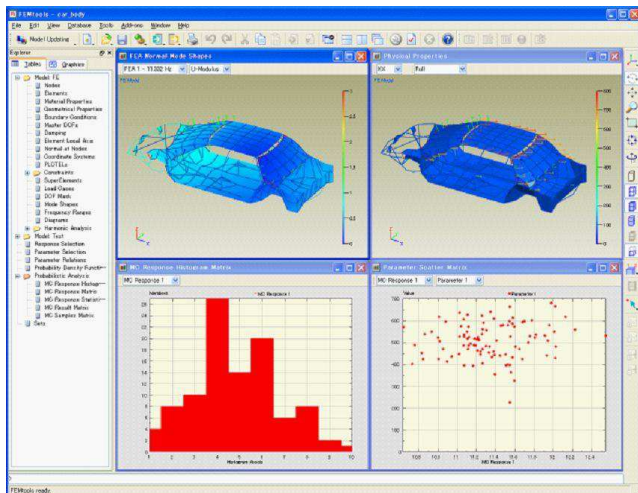
数値シミュレーション結果における不確実性は、それ自身を2つのメインクラス（物理的な不確実性と数値的な不確実性）で明示することができます。物理的な不確実性（またはバラツキ）が目に見えるようになる、次の4つのメインレベルが存在します。

- 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、仕切りの特性など
- 材料特性 - 弾性、降伏応力、密度、減衰、局所的な欠陥など
- 幾何学特性 - 形状、厚さ、継ぎ手の剛性、製造および組み立ての許容誤差など
- 負荷 - 地震、突風、波浪、爆破、衝撃、衝突など

これらの特性の多くが温度、周波数、または負荷の程度によって本質的に変化するかも知れないので、不確実性はさらに増加します。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、平均値と標準偏差によって特徴づけられる正規（ガウス）分布を使用して記述することができます。次のタイプの数値的不確実性は、同定することができます。

- 概念上のモデリングの不確実性 - 含まれる物理的プロセスに関するデータ不足、系の不確実性
- 数学的モデリングの不確実性 - 数学モデルの有効性の精度
- 離散化誤差の不確実性 - メッシュ密度
- 数値解の不確実性 - 丸め誤差、収束許容誤差、繰り返しステップ
- 人間によるミス - プログラムのエラー、データや単位の誤り、ソフトウェアの間違った使用

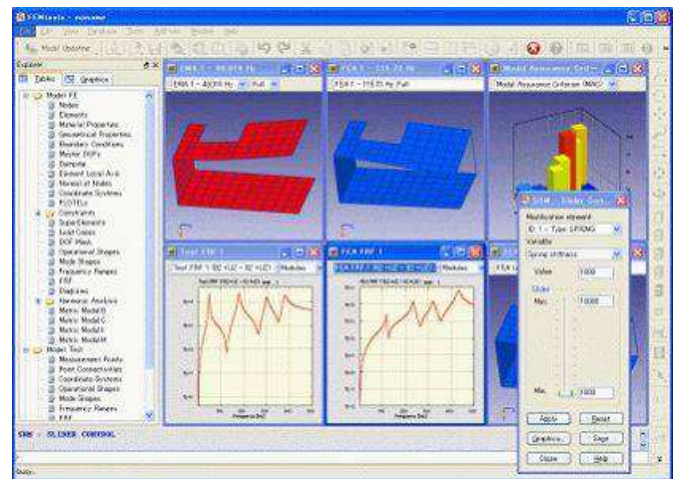


モンテカルロ確率変数の計算結果

構造変更シミュレーション

Structural Dynamics Modification (SDM)は、構造変更によるモーダル・パラメータへ影響を高速シミュレーションし、モードシェープ、実稼動シェープおよびFRFのような結果を算出する設計向けのツールです。構造変更は、ばね、質量、ダンパー、あるいは有限要素（バー、ビーム、シェル、ボリューム）をモデル化し、解析モデル、実験モデルおよび混合のモデルに対して有効です。

- ストモデルまたは有限要素モデルに追加される有限要素を使った構造変更。変更要素の数とタイプの無制限の組み合わせが可能です。
- ポイント&クリックによる変更要素の対話型定義
- モード試験または有限要素解析から得られたモーダル・パラメータを使って、変更後のモードシェープおよび共振周波数が求められます。
- スライダー・コントロールを使って変更要素のすべての物理特性についてリアルタイムで再解析し、観察することができます。
- 変更前のモデルと変更後のモデルの間の相関分析
- 高速モード解析ソルバーを使った、変更要素のすべての物理特性の変動解析



スライダー・コントロール構造変更シミュレーション

SDM 使用の利点はすべての解析がモード空間で行われることです。構造変更はローカル座標で表された質量、剛性、減衰の等価な変化に轉換されます。そのため、得られた連立方程式からリアルタイムに解析することが可能になります。それらの主な特徴は次のとおりです。

- モード感度解析および変動解析
- 同調吸振器の設計
- 目標応答を使った逆解析
- テストデータとの相関の当該レベルでのさまざまなモデル化の仮定による影響の検討
- モデルアップデATING高速モード解析ソルバー
- 設計空間のサンプリング
- モデルアップデATING、設計最適化の最良開始値の推定

構造設計の最適化統合ソリューション

構造設計の最適化

有限要素解析技術に数学的な最適化アルゴリズムを統合することにより、既存の設計を最適化し、新しい根本的な設計方法を提案することができます。しかしながら、このアプローチを実行するためのアプリケーションには、FEA解析ソフトウェアと最適化ルーチンとのシームレスな統合が必要です。

FEMtools Optimization は、汎用の構造設計最適化ツールです。FEMtools Model Updating と組み合わせることにより、検証済みかつ（または）アップデート後の有限要素モデルに対して設計最適化を行うユニークな可能性を提供します。

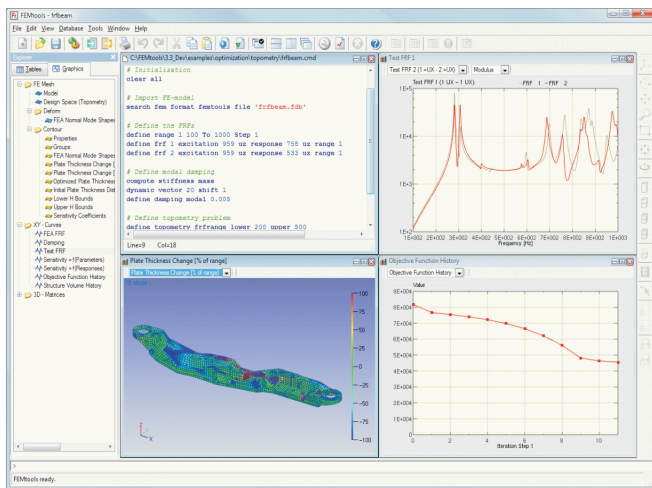
Femtools Optimization とは、

FEMtools Optimization は、有限要素法CAEプログラム・プラットフォームに基づいた構造設計最適化ソルバーです。FEMtools Optimization は、問題に定義に十分な柔軟性を提供し、関数再評価用FEソルバーとして使用できるようにオープン・アーキテクチャ・システムとして設計されています。

FEMtools最適化モジュールをFEMtoolsモデルアップデートと統合し、アップデート後の有限要素モデルを使用することにより最適化設計の信頼度を向上させ、従来の試行錯誤的アプローチと比較し、より効率的で生産的な解析手法を提供します。

FEMtools Optimization は、次のような最適化問題が取り扱えるように、パワフルな非線形最適化ソルバーを核として構築されます。

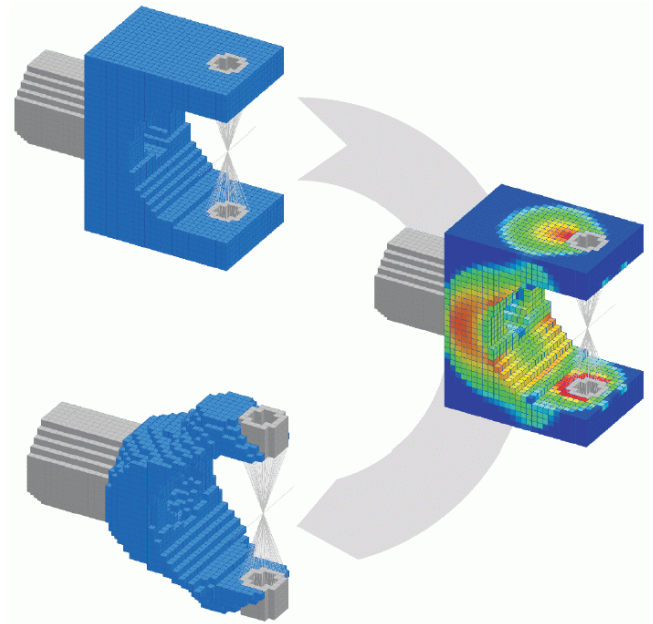
- 制約付き最適化：任意の数の非線形制約を含む最適化問題
- 多目的最適化：任意数の目的関数を含む最適化問題
- 最小二乗距離：一組の参照データを用いて、最小二乗距離の最小化に焦点を合わせた最適化問題
- パレート最適化：ミニマックス最適化問題



FRF振幅レベル縮小の最適化

構造設計最適化のための基本ツール

FEMtools Optimization は、優れた非線形用の最適化ソルバーとして、設計されたモジュール・アプリケーションです。FEMtools Optimization は構造の設計最適化問題を解決するのに必要なツールのすべてを搭載し、外部FEソルバーと組み合わせることによって、最適化問題を解決するためにプラットフォームとして使用することもできます。



継手ブラケットのトポロジーの最適化

一般非線形問題の最適化

FEMtools Optimization は、非線形最適化ソルバーを搭載しています。その仕様において、最適化パラメータ、目的関数、上限数などに制限はありません。また統合FEMtoolsスクリプト言語は任意の目的関数や制約関数をプログラムするために使用することができます。

静解析と動解析

実験データを参照し、相関分析するためのFEMtools内部ソルバー、FRFシンセサイズ、調和応答解析を搭載し、さらにシームレスに外部ソルバーと統合します。

感度解析

適切な構造最適化は、目的関数や拘束関数に関する勾配情報の解析的な計算を必要とします。それはプレート厚さのような設計パラメータ、横断面積などに関する勾配計算のための感度モジュールを持っています。

アップデート・モデルの使用

FEMtools Optimization は、FEMtoolsモデルアップデートと組み合わせることにより、構造設計の最適化のより有効な方法の推定を可能とします。

サイズ(寸法)の最適化

FEMtools Optimizationは、モデルのサイズ最適化問題を解析するモジュールを提供します。データベース管理や感度解析の機能は、サイズの最適化問題のユーザー・フレンドリーな定義を可能にします。

- 広範囲にわたるサイジングパラメータの簡単な選択
- FEMtools 感度モジュール を用いた高速勾配計算
- FEMtools スクリプト言語を使用した問題定義
- 内部または外部の有限要素解析ソルバーの使用

形状の最適化

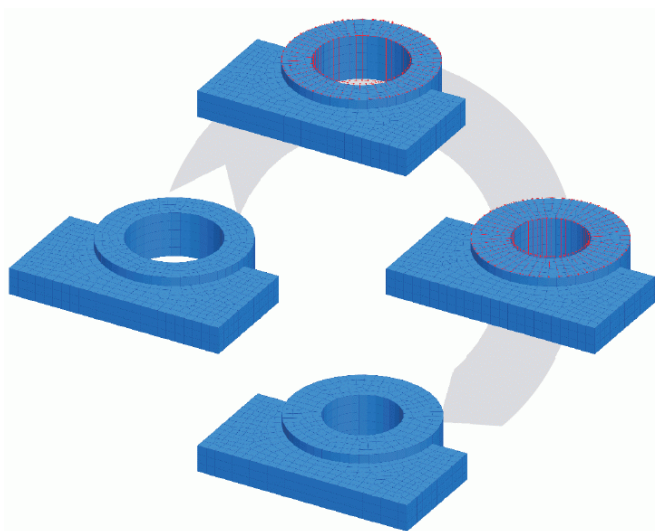
形状の最適化問題は、フリーメッシュ変形技術に基づく形状ベースを使用して解析することができます。構造シェープを最適化するためのそれぞれのアプローチでは、FE メッシュに関する CAD データを必要としません。

- 基本とする CAD データを必要とせず、有限要素モデルを修正すること。
- メッシュ・モーフィング技術 の使用により、大きなメッシュ変形の取り扱いが可能であること。
- FEMtools スクリプト言語 の使用により、問題定義が完全に柔軟であること。
- 内部 または外部の有限要素解析ソルバーの使用

メッシュ・モーフィング

Shape Optimization モジュールは、有限要素モデルのメッシュを変形させるために、次のような方法を提供します。

- 格子をベースにしたフリーメッシュ変形：一組のブロックを格子セル・ベースでメッシュ変形します。
- スケルトン・ベースのフリーメッシュ変形：曲線（線、スプライン、円など）によって結ばれたコントロールポイント・ベースでメッシュ変形します。
- 基本形状の使用：変形後のメッシュは、基本形状を定義する形状の一次結合となります。



フリーメッシュ変形によるリング内径変更

トポロジーの最適化

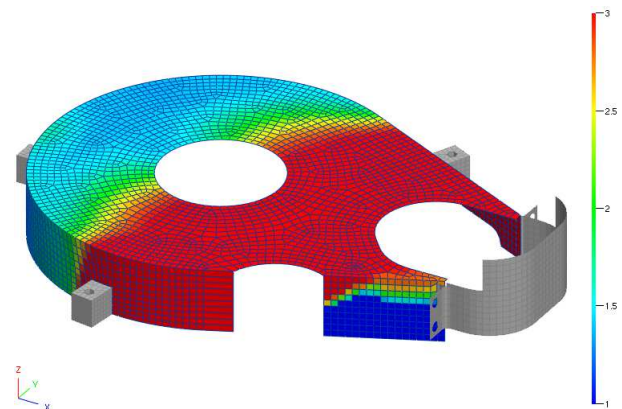
トポロジーの最適化モジュールは、モデルの最適化のための新たな条件の作成を可能とし、静的/動的な設計問題に対応するトポロジーの最適化を提示します。一連の一般的な設計制約は、いくつかの設計工程を改善します。

- 静的コンプライアンスの最小化設計：定義されたすべての荷重ケースを考慮して、静的コンプライアンスを最小にするトポロジーが得られます。
- 基本固有値の最大化設計：第1次振動モードの共振周波数を最大にするトポロジーが得られます。
- ダイナミック・コンプライアンスの最小化設計：調和荷重下のコンプライアンスを最小にするトポロジーが得られます。

トポメトリの最適化

トポメトリの最適化モジュールは、要素ベースのサイズの最適化を可能とし、静的/動的な問題のためにトポメトリの最適化を提示します。一連の設計制約は、設計工程を改善します。

- 最小静的コンプライアンス設計：定義されたすべての荷重ケースを考慮して、静的コンプライアンスを最小にするトポメトリが得られます。
- 基本固有値の最大化設計：第1次振動モードの共振周波数を最大にするトポメトリが得られます。
- FRF レベルの最小化/最大化：調和荷重下のコンプライアンスを最小にするトポメトリが得られます。



トポメトリ最適化の結果

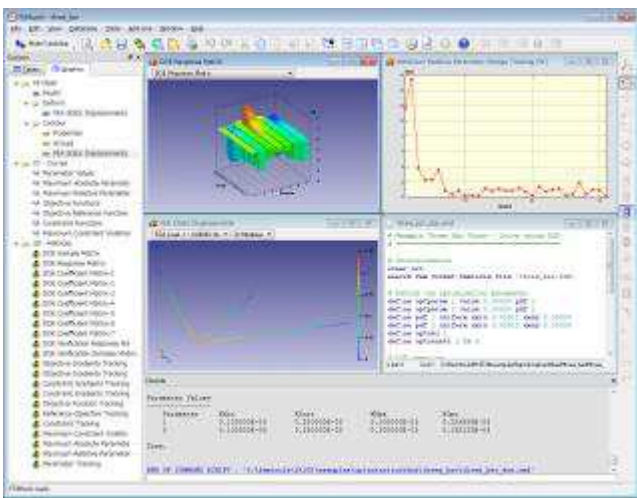
トポロジー/トポメトリ・モジュールには次のようなフィルタや条件が使用されます。

- 1次チェッカーボード・フィルタ
- 2次チェッカーボード・フィルタ
- シンメトリー制約条件
- 押し出し制約条件
- ダイキャスト制約条件

実験計画法と応答面法

実験計画法 (DOE:Design of experiment) は、問題の設計空間のサンプルを効率的な方法で抽出するために使用されます。設計空間におけるサンプリングポイントの特別な配置は、「実験計画法」として知られています。各サンプリングポイントの評価が必要ですから、実験計画法の主要な目標は、最小のサンプリングポイント数と最小FEモデルの追加実行で必要な情報を得ることです。

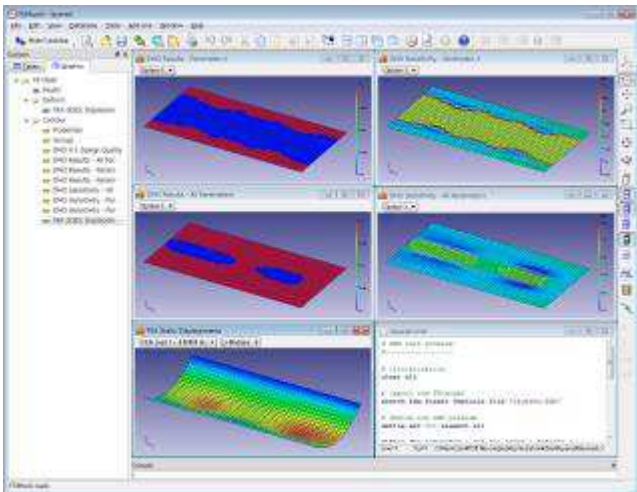
応答面法 (RSM:Response surface methodology) は、系の応答を最適化するために使用できる数学的ツールや統計的ツールを集めたものです。RSMの主な考えは、設計パラメータの機能で系の応答を予測する近似モデルを構築するために、いくつかのうまく選ばれた設計パラメータのセットを使用することです。したがって、この近似モデルは考慮中の系の応答を最適化するために使用することができます。



3本のトラスバーの構造設計最適化問題

離散的材料特性

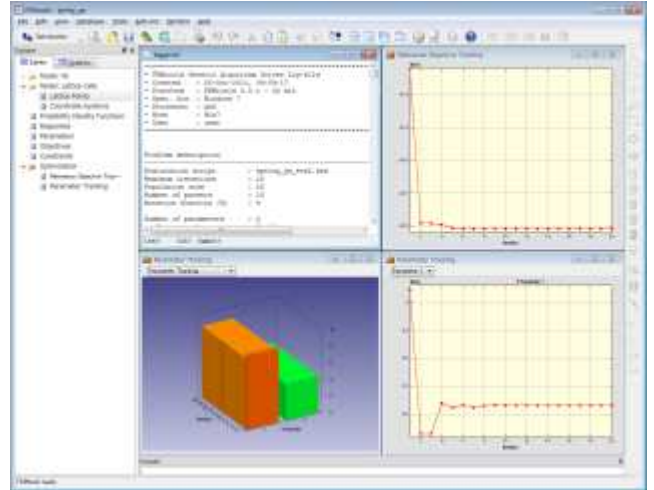
離散的材料最適化 (DMO:Discrete Material Optimization) は積層複合材料の最適化を目的とし、DMOは利用可能な材料と受理可能な方向角度のセットから、各層の最適材料と方向角度を識別することができます。



積層材料の荷重試験最適化材料設計問題

ジェネティック・オプティマイザー

ジェネティック (遺伝学的) オプティマイザーは、確率的な最適化方法として、自然淘汰と遺伝学を使用し、反復的最適解を検索します。ジェネティック・アルゴリズムは、いくつかの特殊な状況における最適化値 (例えば、不連続目的関数、離散型最大化変数など) を持っています。



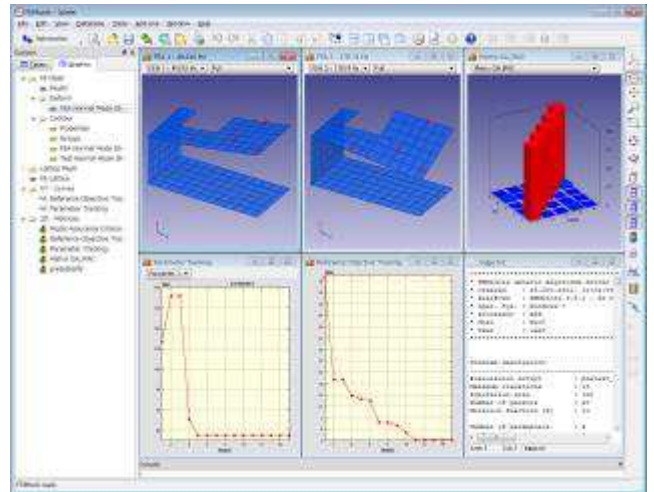
バネの釣り合い遺伝学的非線形最適化問題

FEMtoolsのジェネティック・オプティマイザー・ソルバーは次のタイプの最適化パラメータをサポートします。

- 連続的実数の最適化パラメータを基準化します。
- 多くの特定値による離散的パラメータをマトリックとして定義することができます。

オプティマイザーは次の最適化問題をサポートします。

- 単一目的最適化問題。マルチ目的最適化問題を解析するには、評価スクリプトの単一参照目的への目的を組み合わせなければなりません。
- 非拘束最適化問題
- 拘束最適化問題：拘束は外部のペナルティ関数[2]を使用して行われます。



加速度計の最適配置プリテスト解析問題

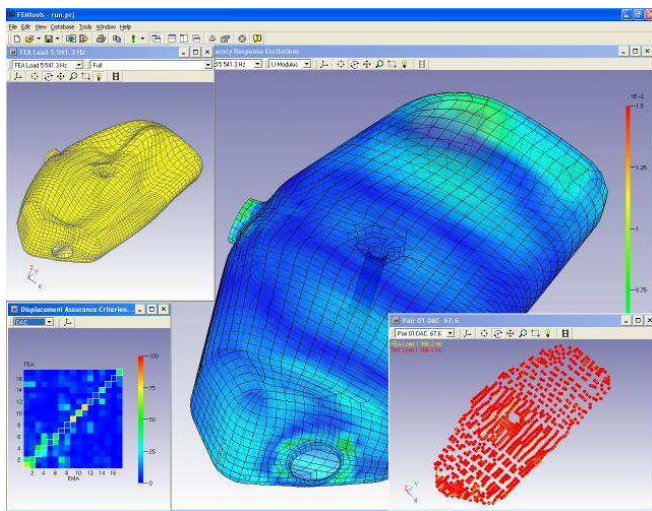
FEMtools の応用

実稼動データによる最適化

有限要素モデルは、既存の製品における測定結果、実験結果と比較し、直ちに検証することができます。その解析モデルが満足な精度が保証される場合、新たな製品の動特性を推定するために使用することができます。また、所望の動特性を得るために最適な構造変更の推定が可能です。一般に、初期条件において選択されたパラメータの最小変更によってその最適化が推定されます。例えば、FEMtools の感度解析は、「質量を一定にしたまま 1 次の共振周波数を+20%ずつシフトする最も効率的な方法」によって疑問に答えます。

外力の識別

運転状況などでは、加振力が未知で直接測定することができない場合があります。その方法はレスポンス値（例えば、変位、表面速度など）を測定し、加振力を識別する方法です。FEMtools モデルアップデATING は、レーザー走査装置を使用して測定された表面速度からマフラー（消音器）の内圧力を識別するために応用されました。



マフラー外部表面の実稼動変形シェープ (ODS)
測定に基づいたマフラー内の圧力分布の識別

動的応力の推定

実稼動応答の測定から動的加振による応力を計算することができます。いくつかの位置で実験的に得られる実稼動変位を使用し、動的外力を同定することができます。動的応力を求めるには、次の 2 つの方法が可能です。

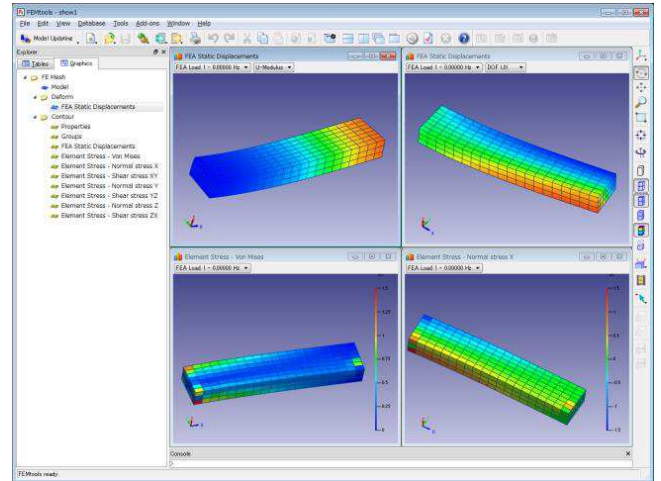
- FEMtools において同定された調和外力をエクスポートし、動的応力の計算が可能な外部 FEA プログラムで応力解析を実行します。
- 強制変位として実稼動変位シェープをエクスポートし、外部 FEA プログラムで静解析における応力計算のための負荷としてそれらを使用します。

静的線形応力

FEMtools データベースが静的線形シミュレーションの結果を含む場合、計算された変位フィールドから応力フィールドを算出することが可能です。

モーダル応力

FEMtools データベースが正規モード解析の結果を含んでいる場合、計算された変位フィールドからモーダル応力を算出することが可能です。



3D モーダル応力

FRF ベース・アセンブリ

FRF ベース・アセンブリ (FBA) は、複数のサブ・コンポーネントを組み合わせる動的サブストラクチャリング法（部分構造合成法）であり、計算上の FRF あるいは各コンポーネントの測定データからアセンブリ・レスポンスを推定します。FBA の場合はアセンブリ構造の計算された振る舞いと同等にサブ・コンポーネントの動的特性も周波数応答関数 (FRF) で記述されます。

パデ近似法による FRF の計算

パデ近似を使用すると、モーダル・アプローチ（高速性）と直接的アプローチ（不断性、減衰モデル対応）の利点を組み合わせ、FRF 勾配を指定した FRF ソリューションが可能です。

時間領域シミュレーション

時間領域シミュレーション (TDS: Time Domain Simulation) 技術は付加荷重関数による構造の過渡応答を計算することが可能です。FEMtools TDS ソルバーは、最初に構造物の正規モードから定常空間モデルを推定し、応答の時系列を計算するためにこのモデルを使用します。

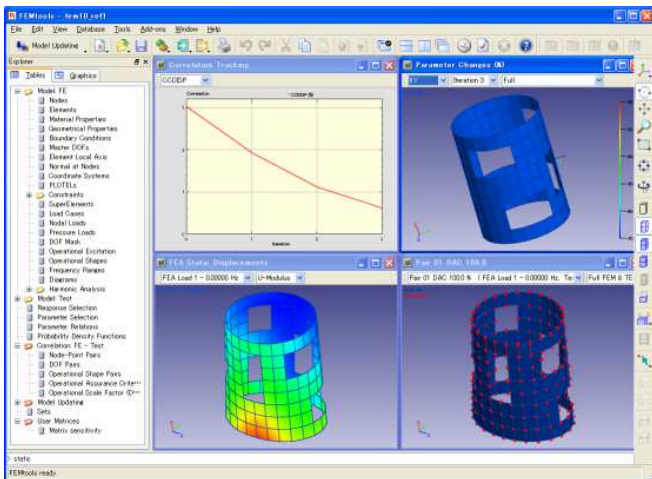
FEMtools モーダル・パラメータ・エクストラクター (MPE) と統合し、TDS のモジュールをプリテスト解析ツールとして使用することができます。

静的変位によるモデルアップデーティング

静的応答の感度を計算するには、次のステップを必要とします。

FEMtools あるいは外部 FEA プログラムにおいて、解析モデル上に静的荷重ケースを定義し、静的変位を求めます。現状では、この擬似荷重による静解析は、デフォルトの FEMtools 静解析ソルバーおよび Nastran に対応しています。

次にモデルアップデーティング・パラメータおよび感度解析応答として絶対静的変位または相対静的変位を選択し、モデルアップデーティングを実行することができます。



静的変位による有限要素モデルアップデーティング

有限要素モデルの縮小

FEMtools の魅力的な応用の一つに、実験データまたは「参照」データとして、別の FE データベースを使用するということがあります。この方法は、2つの FE が比較でき、あるいは細かいメッシュモデルと同じ動的挙動を行うように、粗い FE モデルをアップデートすることができます。これは、実際によく使用される幾何学的なモデル縮小の一形式です。細かいメッシュモデルは、通常は静的応力解析のために作成され、粗いモデルは動解析により適しています。

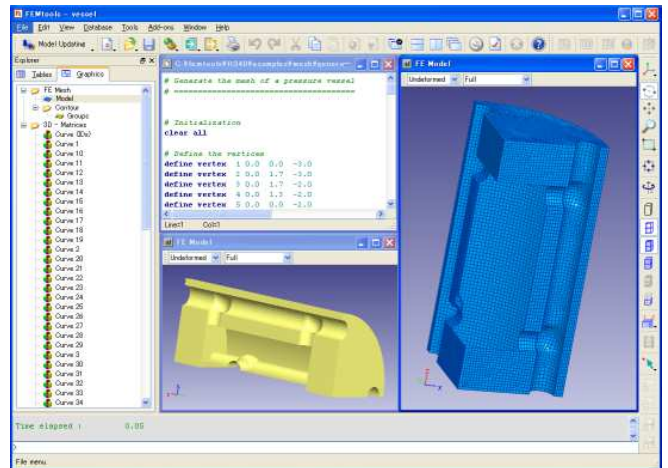
FEMtools Mesh Tools

FEMtools Mesh Tools は、メッシュ生成とメッシュ操作のためのツールボックスです。それは、次のようなコンポーネントで構成されています。

- 面（サーフェス）および立体（ボリューム）メッシュの生成
- 非構造化メッシュの生成
- 2D メッシュの押し出し、周回転等による 3D メッシュの生成
- 移動、回転、ミラーリング等のメッシュ変換機能
- 格子セルをベースにしたフリーメッシュ変形
- スケルトンをベースにしたフリーメッシュ変形

また、FEMtools Framework は、最適化をサポートする次のコンポーネントを提供します。

- 有限要素データのインポートおよびエクスポートのためのインターフェイス
- 外部有限要素ソルバー用ドライバー
- スタンドアロンの静解析および動解析を行うための内部有限要素ライブラリとソルバー
- グラフィックビューア
- 有限要素パラメータおよび応答の管理
- フリーメッシュ変形（寸法／形状の最適化用）
- FEMtools Script プログラミング言語
- FEMtools API 関数ライブラリ



メッシュ生成ツール

FEMtools プログラミング

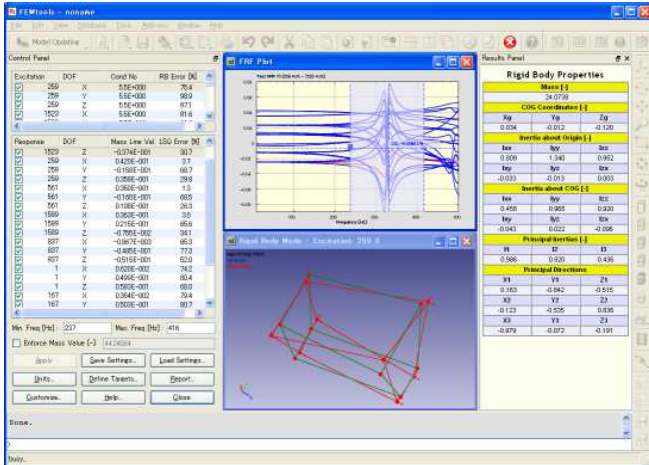
FEMtools Script は、解析者のニーズに応じて設計された統合化 FEMtools プログラミング言語です。この言語は学びやすい Basic 構文をベースにした数多くの先進的機能を備えています。

- 高速実行を目的としたコンパイル・バイトコード
- 統合化スクリプト編集ウィンドウ - コマンドや関数、ステートメント等を色分けし、スクリプト編集ウィンドウから編集や実行が可能です。
- 数学的プログラミング - 数学的プログラミング用の先進的機能（配列演算、複素数、スパースマトリックス、正規表現、集合演算、…）
- サードパーティのツールとの統合のための機能（Matlab や Excel とのインターフェイス、サブプロセスの起動やコントロール）
- ユーザー・インターフェイスのプログラミング（ピッキング、ダイアログボックス、…）
- 知的財産保護のためのスクリプトのエンコーディングやソース・コードの完全性の保証
- OLE オートメーション / ActiveX
- エラー・チェック
- オンラインドキュメンテーション

FEMtools のオプション機能

剛体特性エクストラクター (RBPE)

Rigid Body Property Extractor (RBP エクストラクター) モジュールは、測定データ・アクセラランス周波数応答関数 (加速度/力) から構造物の剛体特性 (質量、質量中心、および慣性) を同定するためのツールです。



RBP エクストラクターは、例えば、低周波のサスペンションモードと構造物の弾性モードとの間に存在する水平方向のマスライン(mass lines)を特徴とする、構造物の剛体応答を同定するための手堅いカーブフィッティング方法を使用します。これらの剛体応答から、構造物の質量特性が一組の簡単な剛体運動方程式を解くことによって直接得られます。

FRF (周波数応答関数) は、加振 DOF として最低 3 つの荷重ケースまた、各荷重ケースとして最低 6 つの応答 DOF (加速度計) を使って測定され、それらの加振 DOF および応答 DOF の位置と方向は視覚化されます。

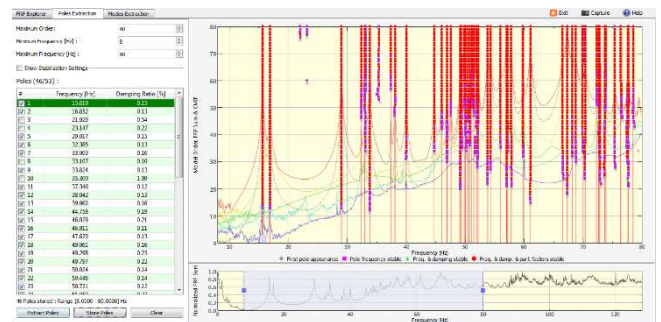
RBP エクストラクターは、簡単に使えて、しかも完全に対話形式のグラフィカルな環境において統合化され、次の機能を提供します。

- 剛体質量特性 (質量、質量中心、慣性) の計算
- 質量値 COG (質量中心) の計算のオプション
- 加振 DOF および応答 DOF の包含/排除の完全コントロール
- ローカル座標系の加振 DOF/応答 DOF の定義
- 剛体応答 (測定/最小二乗値) のアニメーション
- マスラインの同定に使用される周波数間隔の対話式的定義/変更
- マスライン値の同定のための補間法の自動選択
- 剛体応答値およびマスライン値のための誤差推定パラメータ
- 同定された剛体質量特性の書式付きテキストファイルへのエクスポート
- モデルアップデーティングのターゲットとしての、同定された剛体質量特性の自動定義

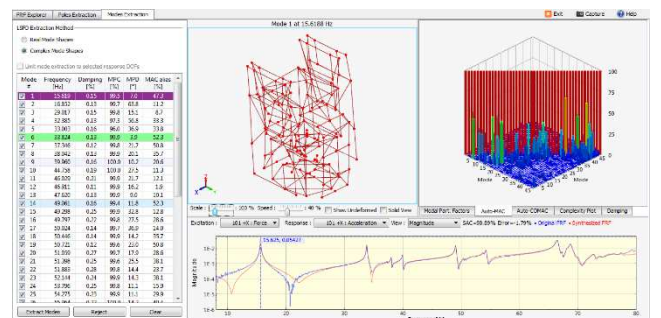
モーダル・パラメータ・エクストラクター (MPE)

FEMtools モーダル・パラメータ・エクストラクター (Ft-MPE) モジュールは、1 セットの周波数応答関数 (FRF) およびクロスパワー・スペクトルからモーダル・パラメータ (固有周波数、モードシェープ、モード減衰) を推定するための FEMtools アドオン・モジュールです。

- モーダル・パラメータ推定法は、ポリレファレンス最小二乗複素関数法 (pLSCF) が使用されます。
- 安定化ダイアグラムに基づいた自動/手動のポール (極値) の選択機能
- 狭/広域バンド抽出法 (最小/最大の周波数設定)
- バンド外モードの剰余モードの考慮
- 複素モードシェープ、正規モードシェープの抽出
- MAC、複素モード解析、FRF シンセシス、モードシェープ・アニメーションなどの機能
- GUI ウィザード操作、コマンド操作のサポート



- 測定 FRF のインポートおよび推定モーダル・パラメータのエクスポートはユニバーサル・ファイル・フォーマット (UFF) をサポートします。
- 時刻歴データをインポートし、クロスパワー・スペクトルを計算することが可能です。
- モードシェープ・アニメーション、FRF プロットなどを表示します。
- スクリプトを使用したエクストラクター操作により、自動データ処理が可能なモーダル・エクストラクターの統合化



FEMtools システム／ユーザーサポートの特徴

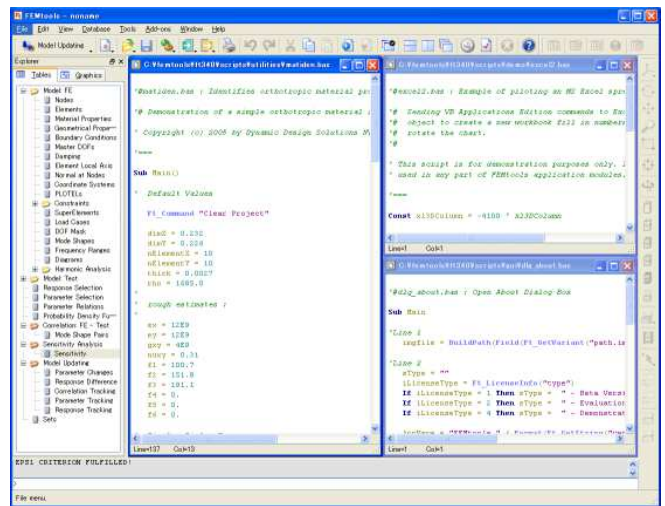
エンド・ユーザーへの利点

FEMtools は、その強力な機能を優れた操作性の下で使用することができます。エンド・ユーザーに対するその主な利点は次のとおりです。

- **標準ツール**：動解析/静解析ソルバーおよび解析と実験のリレーショナル・データベースを中核として設計されたモジュラー・プログラムです。それらの解析と実験のデータを統合し、相関性および FE モデルをアップデートするために必要なツールのすべてを搭載しています。
- **オープン・システム**：FEMtools スクリプトを使用し、既存のツールのカスタマイズや新しいツールを開発し、CAE アプリケーションとして多くのハードウェア・プラットフォームで利用可能です。
- **柔軟性**：FEMtools は、いくつかのモジュールで構成され、カスタマイズすることができます。FEA システムとして、FEMtools 内部ソルバーはスタンドアロンとして使用し、既存の外部 FEA ソルバーを使用し続けることができます。
- **実用性**：FEMtools は、様々なタイプの有限要素モデルに対応し、モデル・サイズの制限はありません。FEMtools は既存の CAE 環境の下で、他のプログラムで出力された実験データ、FEA データを使用し、また解析結果としてそれぞれのデータを出力します。
- **操作性**：FEMtools は、直感的で強力な GUI、オープンで容易なコマンド言語を提供します。また、オンライン・ドキュメント/ヘルプ、マニュアル（英語/日本語）をサポートします。
- **信頼性**：FEMtools は、構造解析に関する専門のエンジニアとプログラマによって継続的に研究され、今尚、先進の構造解析システムとして先駆的な役割を担っています。
- **共同開発**：共通の開発プラットフォームにおいて、新しいプログラムを開発することが容易になります。FEMtools とともに多くの既存の FEA ベースのアプリケーションの解析結果、データベースにアクセスし、自作のアプリケーションの開発が可能です。

開発／研究への応用

- **開発支援**：FEMtools スクリプト (FBScript) によるプログラミング機能は、FEMtools のすべての内部関数を操作し、また、新たに開発したソース・コードを広く応用することができます。
- **コード体系**：プログラミング言語と API を使用することは、FEMtools データベースとアプリケーション間の信頼性のあるインターフェイスを提供します。Basic、Visual Basic と同言語仕様の FBScript は容易に習得することができます。
- **FEMtools API**：FEMtools 内部関数および外部のアプリケーションを操作するための関数ライブラリです。FEMtools Script によって、搭載されているすべてアプリケーション・ツール、数学的プログラミング関数がサポートされます。



動作環境

- Windows (XP/Vista/7/8/10,....、64ビット)
- Mac OS X 10.5,...
- Unix /Linux (64ビット)

開発元



Interleuvenlaan 64
B-3001 Leuven Belgium
www.femtools.com

国内総代理店

株式会社ストラクチャルサイエンス

〒211-0016
川崎市中原区市ノ坪 66-5 LM 武蔵小杉第 2-215
TEL : 044-738-0315
E-mail: support@ssinst.com
URL: http://www.ssinst.com

