

# FEMtools™のご紹介

Dynamic Design Solutions NV  
Leuven, Belgium

Associated by  
Structural Science Inc.

# 主な内容

Dynamic Design Solutions ( DDS ) 会社概要

FEMtools とは

FEMtools 誕生の動機

FEMtools の構成モジュール

テスト・データと FEデータとのインターフェイス

モデル・アップデーティングはどのようにして行うか

アプリケーション (プリテスト, SDM, 材料の同定,...)

FEMtools の利点

サポートとサービス

詳細についてのお問合せ先

# Dynamic Design Solutions (略称 :DDS)

設立: 1994 (ベルギー)

事業内容: CAE ソフトウェア開発

FE モデル・アップデート手法のパイオニア

## 製品概要

FEMtools アプリケーション・プラットフォーム - CAE アプリケーション開発用のためのプログラミング・プラットフォーム (FBScript)

FEA - テスト相関、プリテスト計画、感度解析、モデル・アップデートイング、... のための FEMtools モジュール

## サービス

ソフトウェア関連サービス (サポート、トレーニング、受託開発、...)

コンサルティング (FE 解析、FE モデル検証、データ・ファイル変換、...)

プロジェクト研究

FEMtools ライセンス数: 450+

# FEMtools とは?

下記の分野での応用を拡大するための解析やスクリプティング・ソリューションを提供する多機能 CAE ソフトウェア:

- テスト - 解析の統合
- FE およびテスト・データの管理
- FEM プリ/ポスト・プロセッシング
- プロセスの統合と自動化

現在の最大の焦点:

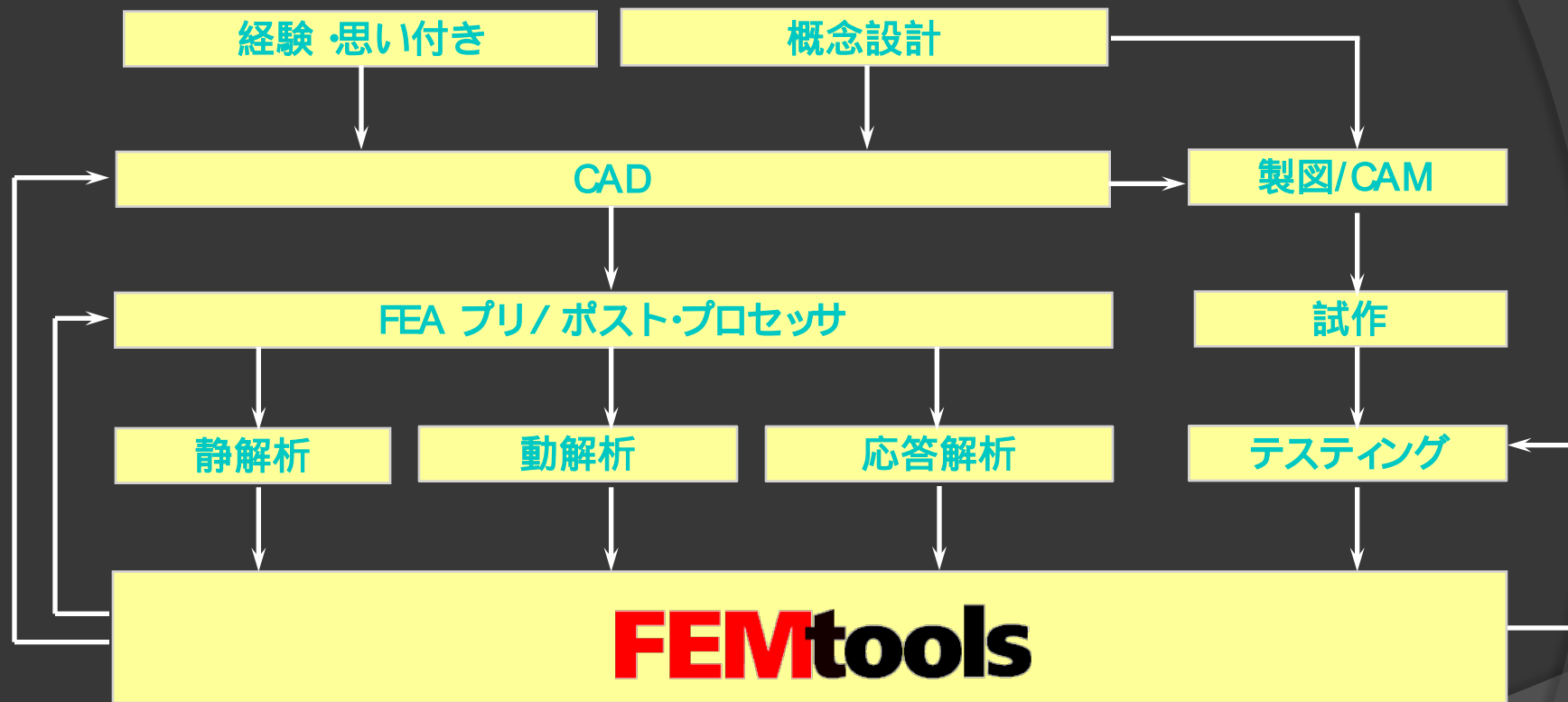
- テスト - 解析の相関
- FE モデル検証とモデル・アップデートイング

実現方法:

- アプリケーション・フレームワーク + アドオン・ツール
- 中間データベース と FEA - EMA インターフェイス
- FEMtools スクリプティングと API



# FEMtools の位置づけ



# 構造物の動的設計法

## § 構造物の動的設計とは：

構造物の動特性を、設計段階で**数学モデル**を用いて検討する作業のこと。

## § 数学モデルは、次の2種類に分類される。

(1) **特性モデル**：構造物の動特性を質量、剛性、減衰などの物理特性による数学モデル

(2) **モードモデル**：固有振動数、振動モードなど、振動現象の直接的量で表現したモデル

## § **理論モード解析**：特性モデルからモードモデルへの変換を行う操作。有限要素解析（FEA）はその代表例

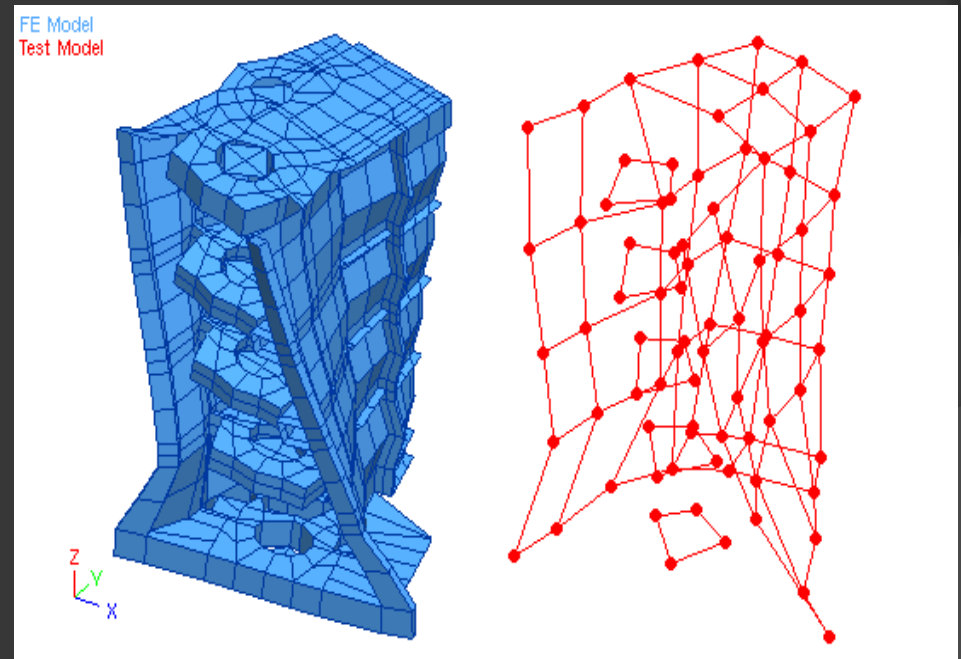
$$[M], [C], [K], \{f(t)\}$$

$$\{\omega\}, [H(\omega)], \{F(\omega)\}$$

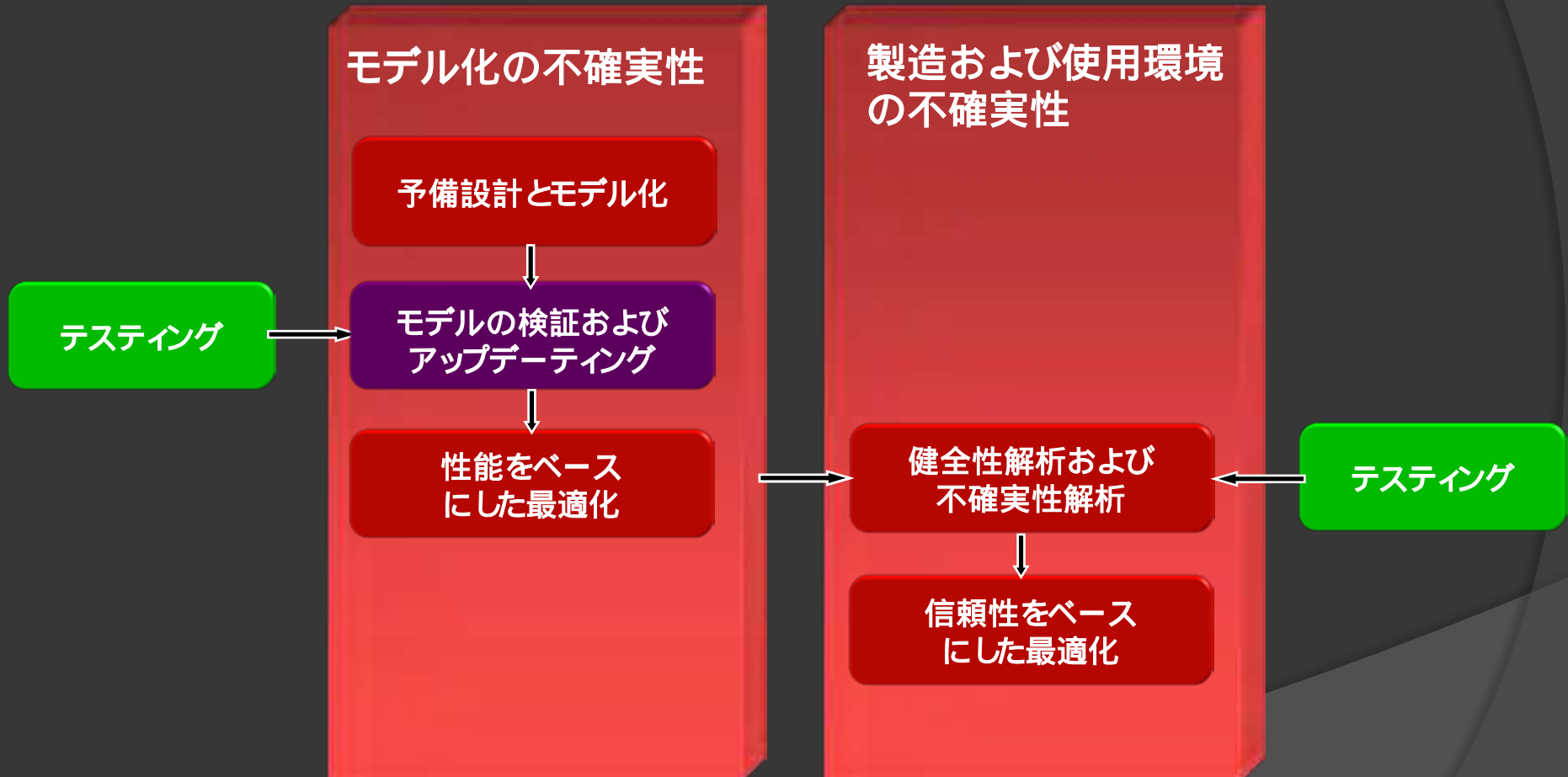
## § **実験モード解析**：構造物の試作品（または実機）を対象に振動試験を行い、得られた伝達関数（周波数応答関数）データから対象物の動特性（固有振動数、減数比、固有モード：**モードパラメータ**という）を推定する操作

# 有限要素解析と実験モード解析の比較

- § 有限要素解析は、不確定要素が多く存在する。  
(材料特性、減衰特性、ばね剛性、境界条件など) **実験モード解析**は現実のデータが得られる。
- § **実験モード解析**は、自由度数の制限が厳しい。  
(技術的/ 時間的/ コスト的) 有限要素解析は自由度数の制限なし。
- § 有限要素解析は、構造物の挙動をシミュレートするためのパワフルな手法。(設計/ 生産部門向き)
- § **実験モード解析**は、構造物の「現実」を知る有力な手法。(研究開発部門向き)



# 不確実性の取り扱い





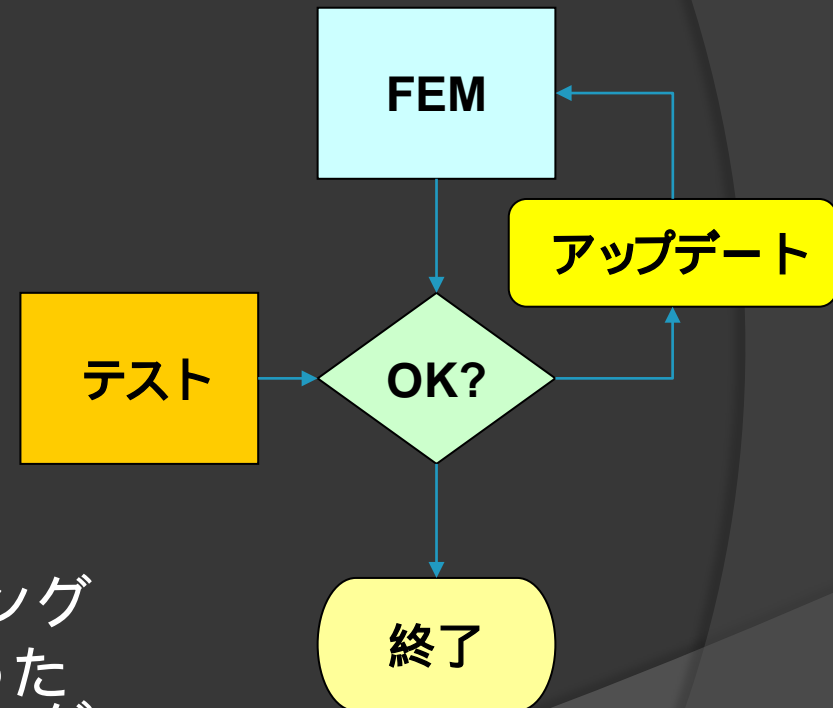
# FEMモデルの検証とアップデート

## 必要な理由

- 不確実性
- 単純化
- 情報の漏れ
- 誤差
- モデルの縮小

## 方法

- テストとの比較
- FEM 特性の手動アップデート
- 特殊型の多目的関数最適化を使った
- FEM 特性の自動アップデート



# FE解析の不確実性

## 物理的要素特性

境界条件

接合部の剛性

材料特性

## モデル化

要素タイプと定式化

モデルの単純化

メッシュ密度

“実験通り” vs “設計通り”

## データのミス

タイピング・エラー

単位

## 解析

非線形効果

主自由度の選択

集中質量 vs. 等価質量

積分間隔

減衰

## 製造誤差

肉厚の誤差

接着

鋳造

## 使用環境の変化

温度

湿度

負荷変動

# 実験に関する分析 - ノイズの発生源

## テストの定義

取付け具

据付け方法

加振方法

トランスデューサの設定位置

## 動的負荷

## 計測機器

校正

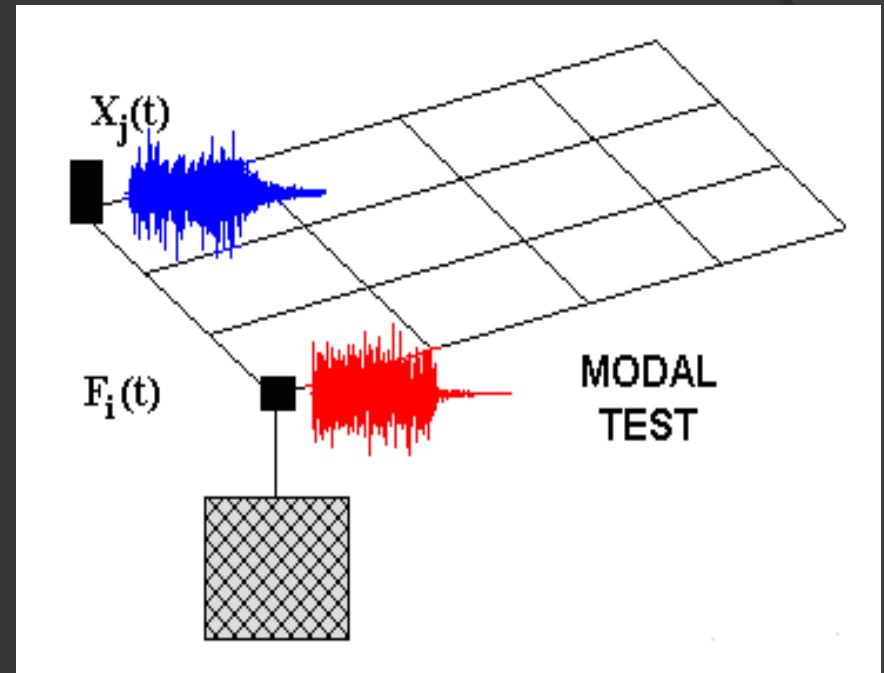
ひずみ

## データ集録

デジタル信号処理

測定方式

## モード・パラメータ推定 - 数学モデル



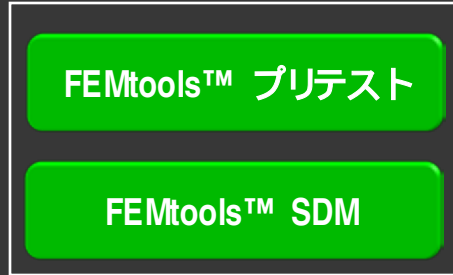
# FEA/EMAデータ統合の必要性

- FEA解析データとEMA実験データの食い違いが著しい。FEAには不確定要素が多すぎ、解析結果の信頼性に欠ける。
- EMAでは測定点数（自由度数）が限られ、構造物の詳細な挙動の把握が難しい。
- 測定の最適化（最適な加振点、計測点の設定など）を前提とし、EMA実験データに基づいて有限要素モデルをアップデートする方法が最善。

## ■ FEA/EMAデータ統合によるメリット

- § FEAの結果は、実験のセットアップの最適化に役立つ：**プリテスト解析**
- § EMAの結果は、FEモデルの検証に使用できる：**誤差局在化、相関分析**
- § FEモデルは、EMAの結果を用いて更新できる：**モデル・アップデートイング**
- § FEAとEMAの両方のデータから、**混合モデル**が開発できる。

# FEMtools のモジュール



# データ・インターフェイス

## 解析側

Nastran, ANSYS, I-DEAS,  
Abaqus,...,NISA,FEMAP,...

モデルの定義, FEA 結果, 要素  
マトリックス

## 実験側

STAR, CADA, I-DEAS Test,  
SmartOffice, ME'Scope, ...

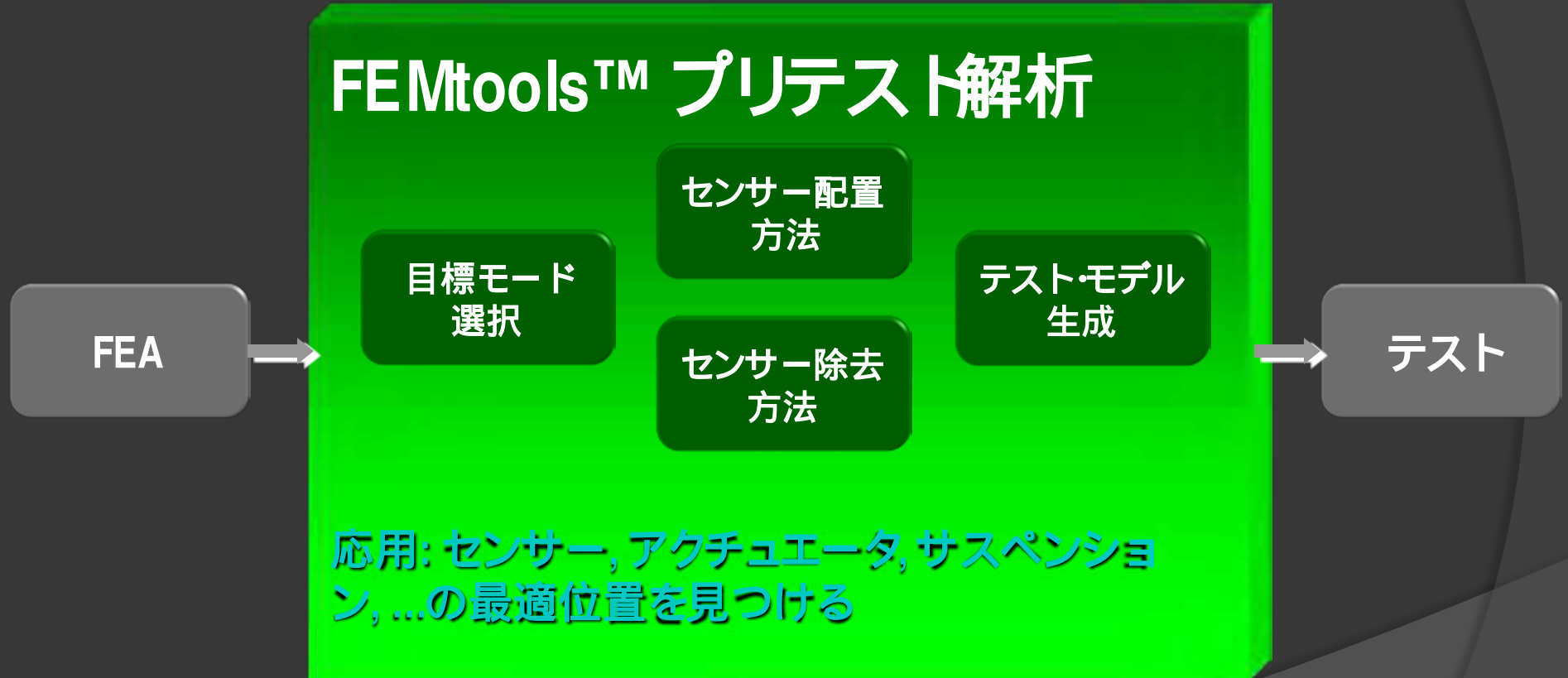
テスト点の位置, FRF, モード・  
パラメータ, ...

データ・トランスレータ

内部中間フォーマット

アップデーティング・ソフトウェア

# FEMtools のモジュール



# モード・プリテスト解析 - 概要

**目的:** 基準となる FE モデルを使用して、モード・テストを計画し最適化する。

関心のある周波数帯域内もモード・シェープを予測するための有限要素解析。 解析結果は、下記の項目についてポスト処理が施される:

- 目標モードの選択

- センサーの設定候補位置の選択

- 後述するセンサー配置とセンサー除去の方法を使用した、センサー, アクチュエータ, サスペンションの最適な位置と方向

## FEA ベースの他の評価項目:

- プリテスト感度解析 (機器の質量, サスペンションおよび / または固定部の剛性,...)

- 過剰負荷を防ぐための応力解析

## テスト・モデルの準備:

- テスト位置での法線方向の計算

- FEM からテスト・モデルを抜き出してテスト・ソフトウェアにエクスポート



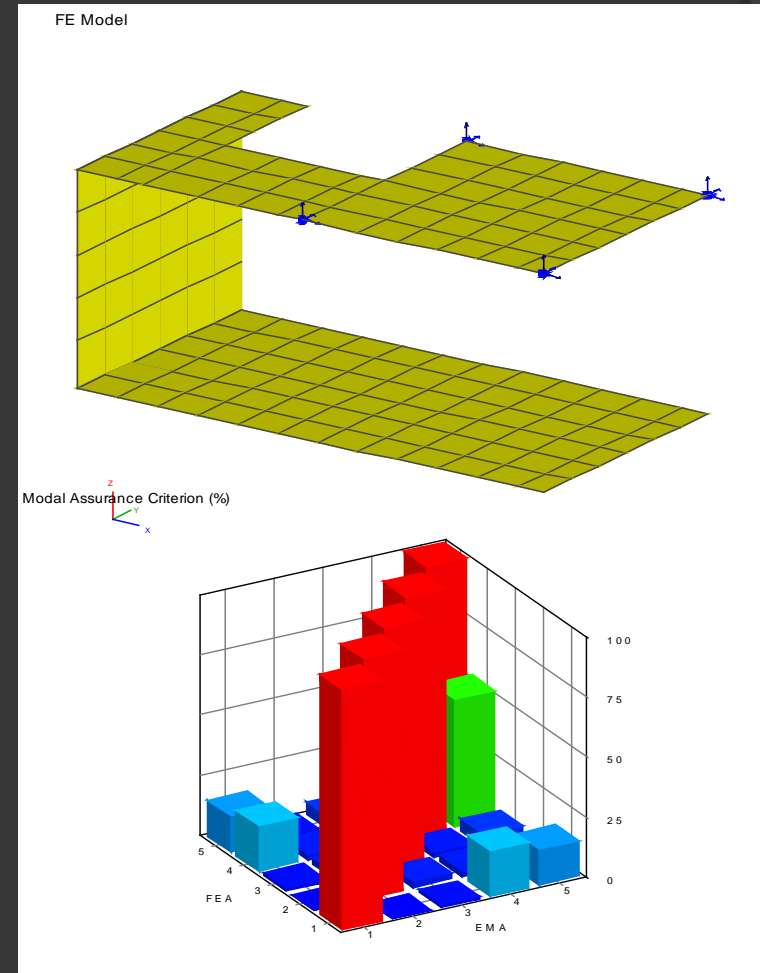
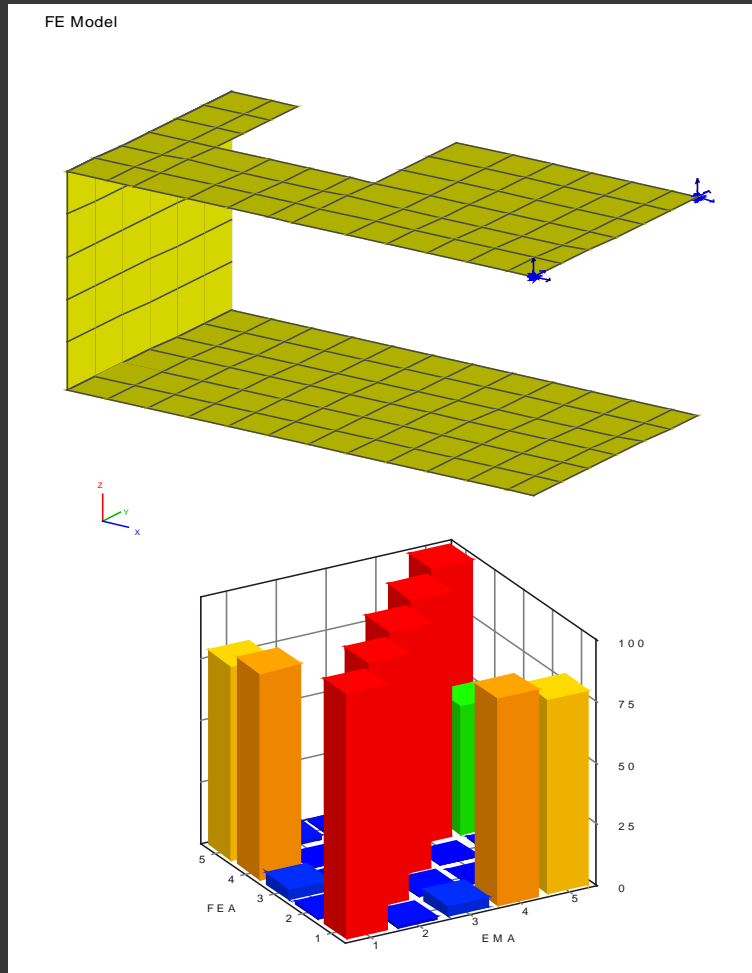
# センサーの配置方法 - 例

最初の選択: 2箇所

モード1, 4 と5 の間で折り返し現象が存在する

改善された2番目の選択: 4箇所

折り返し現象が無くなる



# モード・ポストテスト・ツール - 概要

構造変更シミュレーション (SDM)  
有限要素モデルの検証とアップ  
デーティング

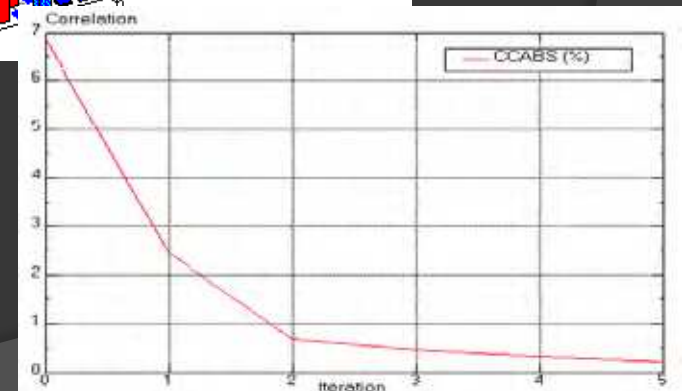
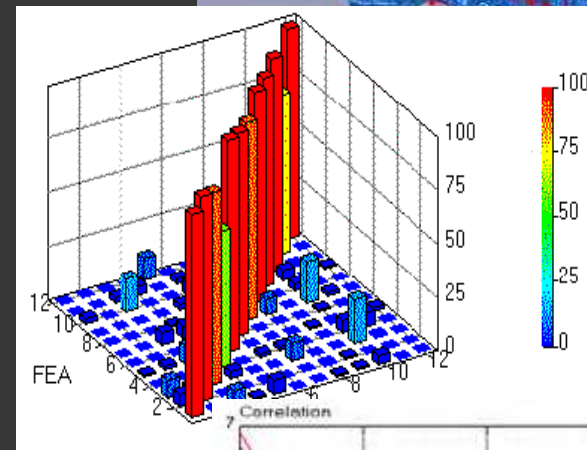
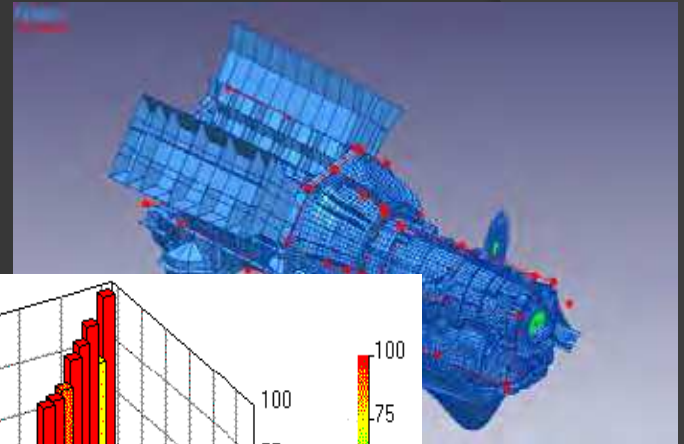
## FEA との相関

- グローバルおよびローカル・モード相関
- 位相相関、拡大、縮小
- 応答関数相関

## 感度解析

有限要素モデル・アップデー  
ティング

調和外力の同定



# FEMtools のモジュール

## FEMtools™ SDM

ローカル固有値  
変更

変動性解析  
&  
モード感度

動吸振器

逆解析

部分構造法

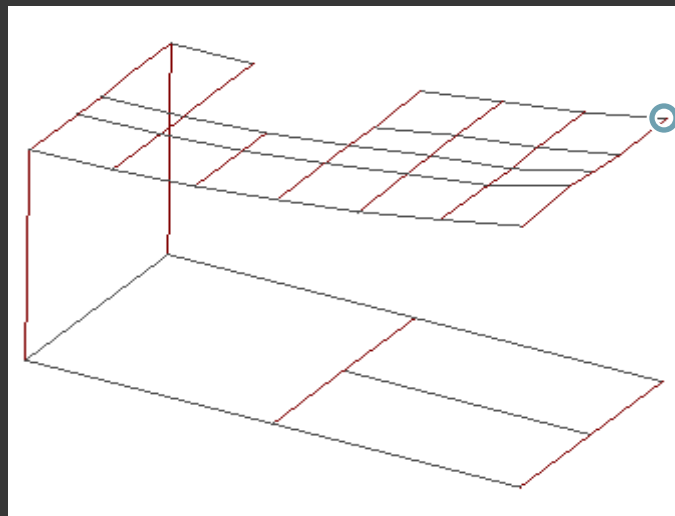
応用: 構造変更の迅速シミュレーション、振動トラブル  
シューティング, 設計最適化, ...

FEA

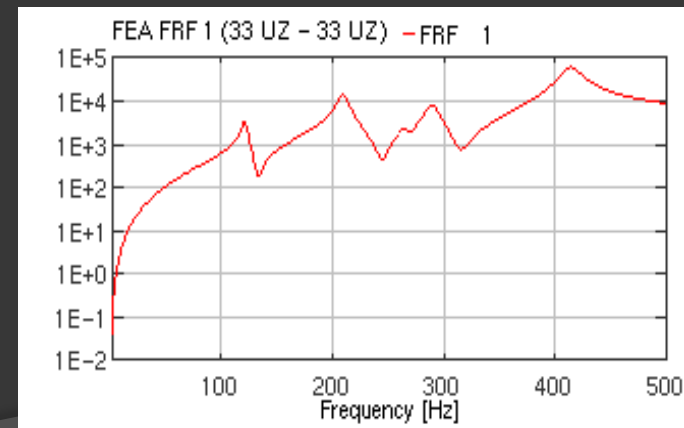
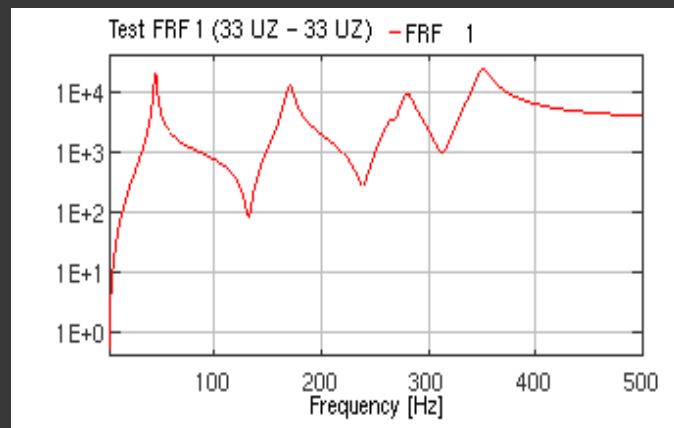
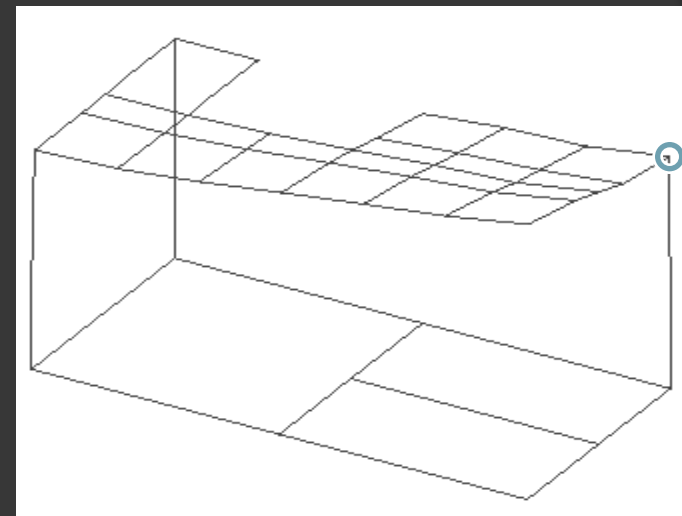
テスト

# ローカル固有値変更 - 例

元のテスト・モデル  
1次共振周波数 44 Hz



変更後のテスト・モデル (ばねを追加)  
1次共振周波数 121 Hz



# 構造変更シミュレーション

## モード感度

ユーザー定義の範囲内で事前に定義された変更要素の物理特性を変えるためのツール

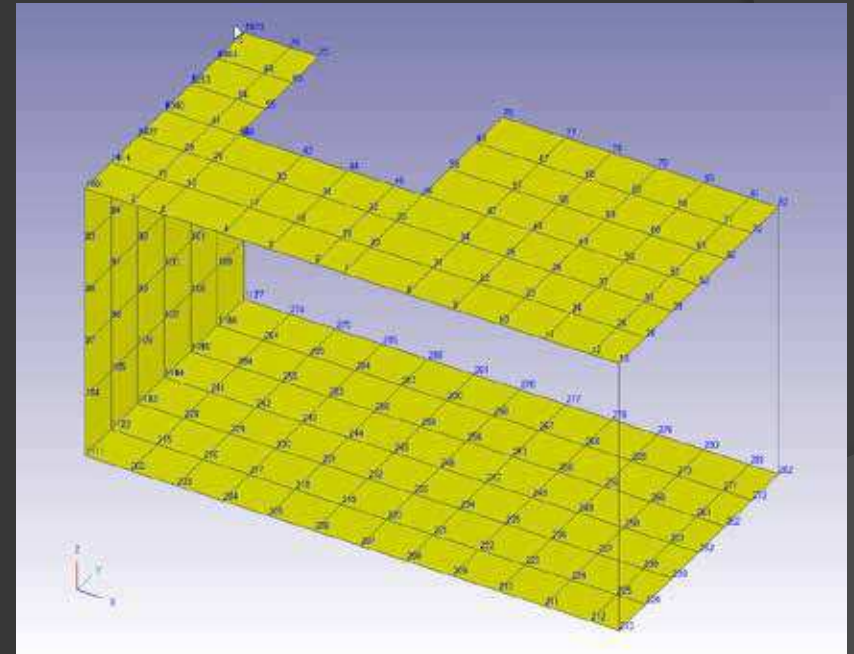
応用:

感度解析

デザイン曲線のプロット

必須: モード・データベース、定義された変更要素

アウトプットは、特性の変化に対応した、各モードについての周波数の変化のグラフ



# 構造変更シミュレーション

## 動吸振器

動吸振器は追加的な部分構造であり、質量、剛性および減衰を用いて特定の振動を吸収することができる。

目的は、動吸振器の最適な特性を同定することである。

解析モデルと同様に、テスト・モデル上でも働く。

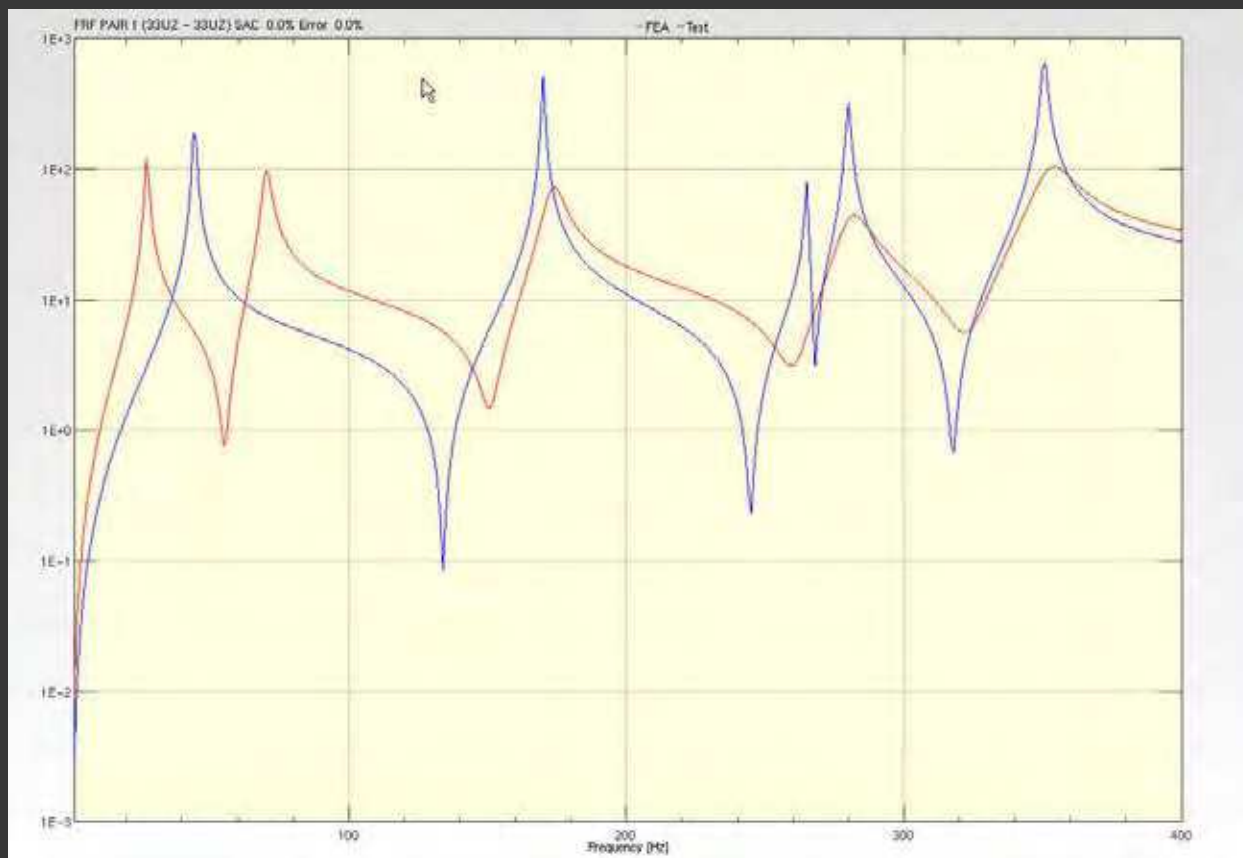
必要なインプット: 吸振器の位置, 方向および特性 (質量, ばね剛性および粘性減衰)

計算後、モードは詳しく調べることができ、吸振器の取り付け前と取り付け後の FRF を重ねることができる。

# 構造変更シミュレーション

## 動吸振器 - 例

結果: 青色曲線 = 元の FRF; 赤色曲線 = 動吸振器つき



# FEMtools のモジュール

## FEMtools™ 関連

FE - テスト  
マッピング

形状関連

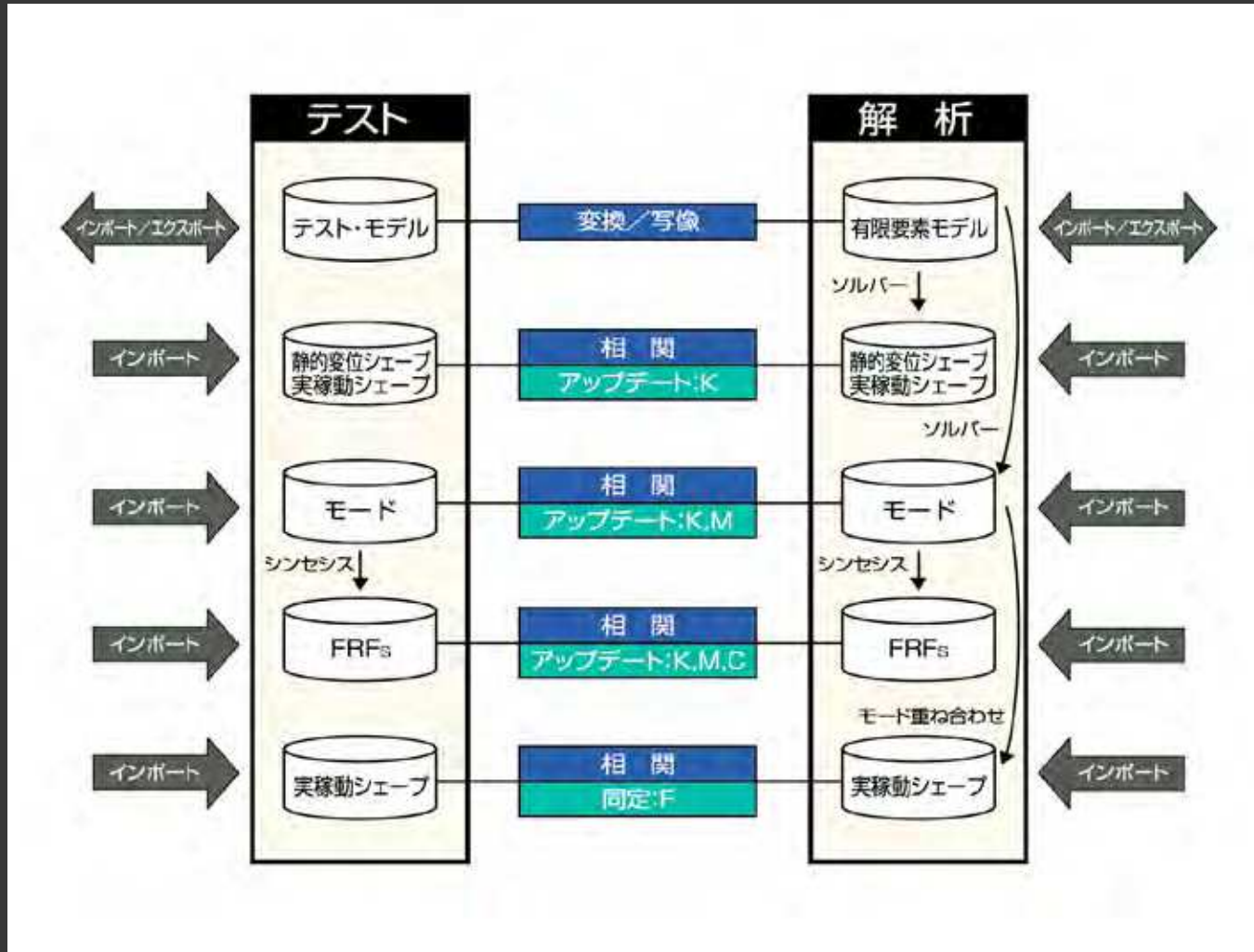
FRF 関連

拡張と縮小

誤差局在化



# 相関とアップデートディング - 概要



# FEMモデルとテスト・モデルのマッピング

## 節点とポイントの空間内での位置を比較する

モデルの整列

スケーリング、並進、回転

手動または自動

## 最短距離に基づく関係テーブルを作成する

自動

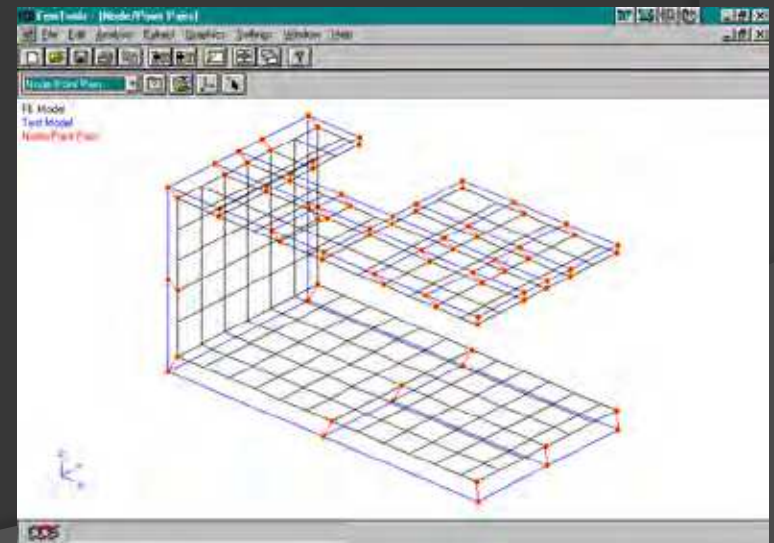
許容誤差の値によるコントロール

手動による編集

## モデルの拡張と切捨て

モード相関は、モード・シェープの切り捨てまたは拡張が必要である。

相関分析が成功するかどうかは、写像された自由度の数に因る



# 相関

## グローバル形状相関

モード信頼性評価関数 (MAC)

モードシェープの直交性

モード倍率

## ローカル形状相関 (“ 誤差局在化” )

COMAC

CORTHOG

モードシェープ差 (Mode shape difference)

モードカレジデュ (Modal force residue)

## FRF 相関

## 相関係数

FEM - テスト、FEM - FEM、テスト - テスト

# FEMtools のモジュール

## FEMtools™ モデル・アップデートイング

パラメータ選択

微分感度

パラメータ推定

応答選択

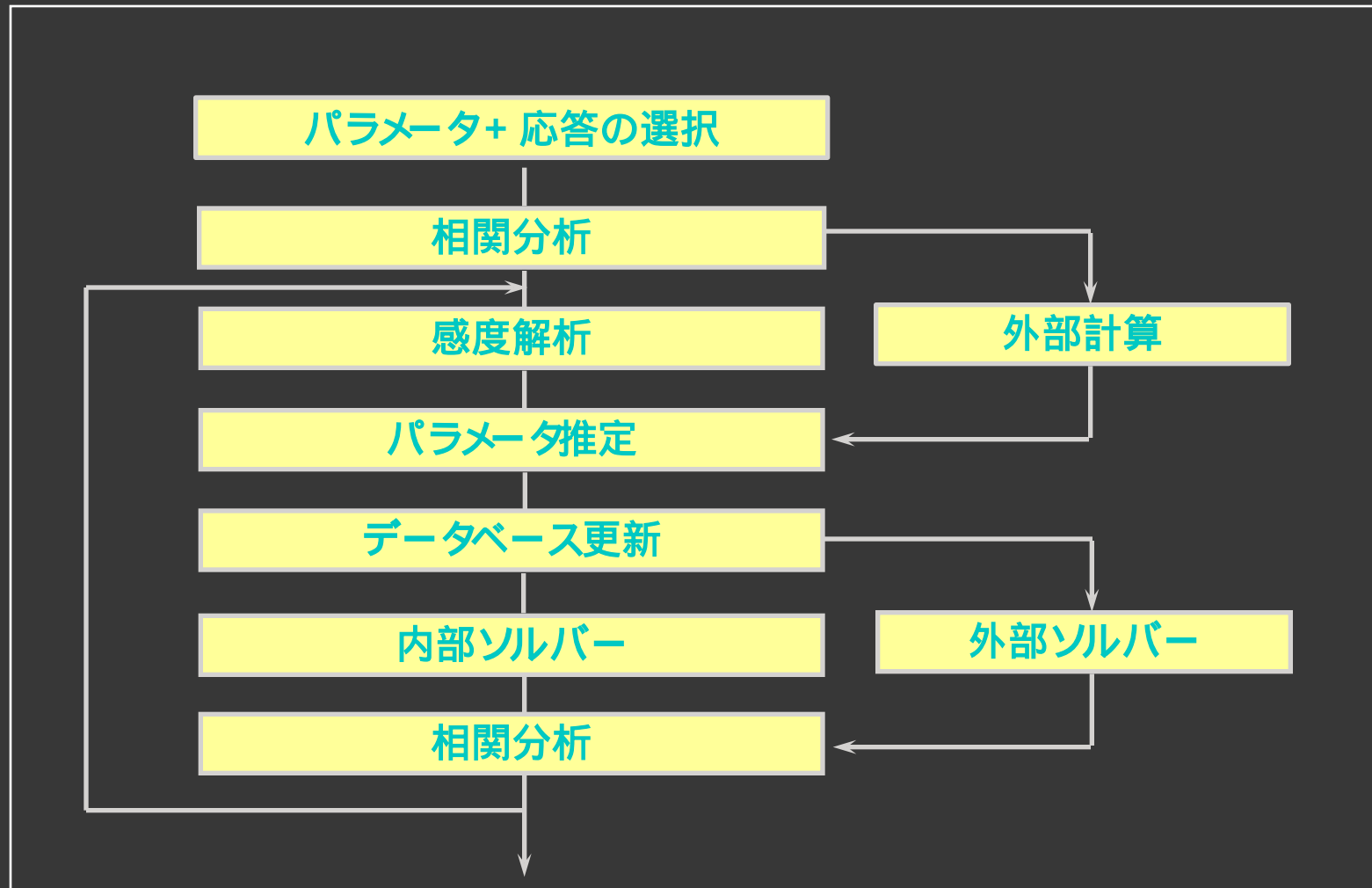
有限差分感度

外力同定

FEA  
再解析

応用: What-if 解析, 変動解析, モデル・アップ  
デーティング, 最適設計, ...

# 自動的 FEM モデル・アップデートイング



# FEMモデル・アップデートイングの方法

- 質量特性をベースにしたアップデート
- 静的試験データを用いたアップデート
- モード特性を用いたアップデート
- 周波数応答関数(FRF)を用いたアップデート
- 運転時のデータからの間接外力の識別
- 感度ベースの自動アップデート (ベイズのパラメータ推定法)
- 全要素の材料特性、幾何学特性、境界条件、集中質量、減衰係数および加振力をパラメータとして選択できる。
- 共振振動数、モード変位、FRF、MAC値および質量特性をアップデートの目標として選択できる。
- パラメータの組み合わせ
- パラメータと、ユーザ確信度を表す目的関数の重み付け
- 微分感度と有限差分感度
- 最適パフォーマンスのための感度マトリックスの自動スケーリング
- アップデートイングのトラッキング、およびアップデート時の系の応答

# パラメータと参照応答の選択

## パラメータの例

### (1) 材料特性および幾何学特性

RHO,E,NU,G,EX,EY,EZ,  
NUXY,NUYZ,NUZX,GXY,GYZ,GZX  
H,AX,AY,AZ,IX,IY,IZ

### (2) 境界条件

KX,KY,KZ,HX,HY,HZ

### (3) 集中質量

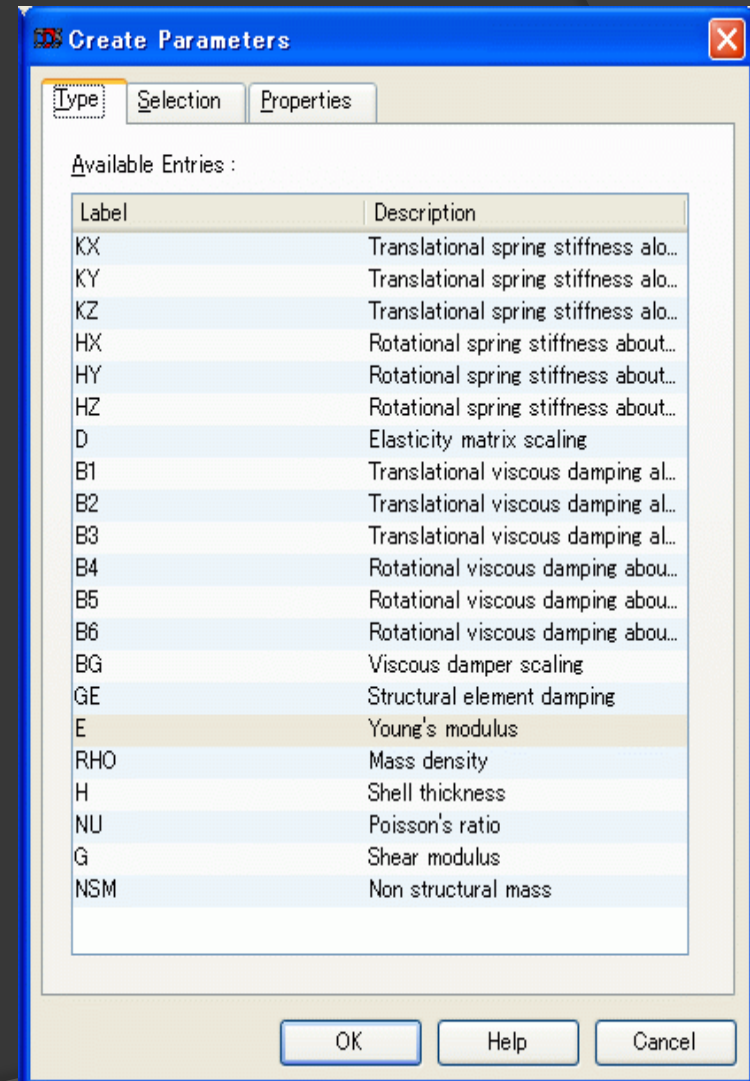
MX,MY,MZ,JX,JY,JZ

### (4) 減衰係数

A0,A1,MDAMP

## 参照応答の例

共振周波数、モード変位、MAC値、  
構造質量、周波数応答関数など



# 感度解析とモデル・アップデート

## 感度解析 (感度マトリックス)

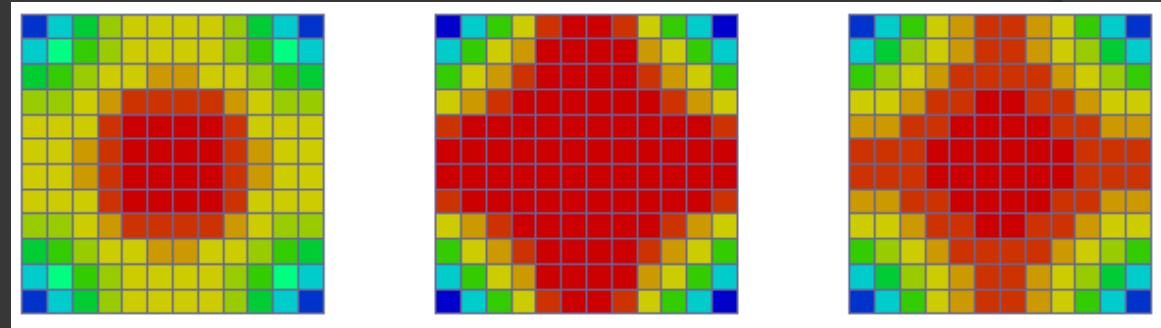
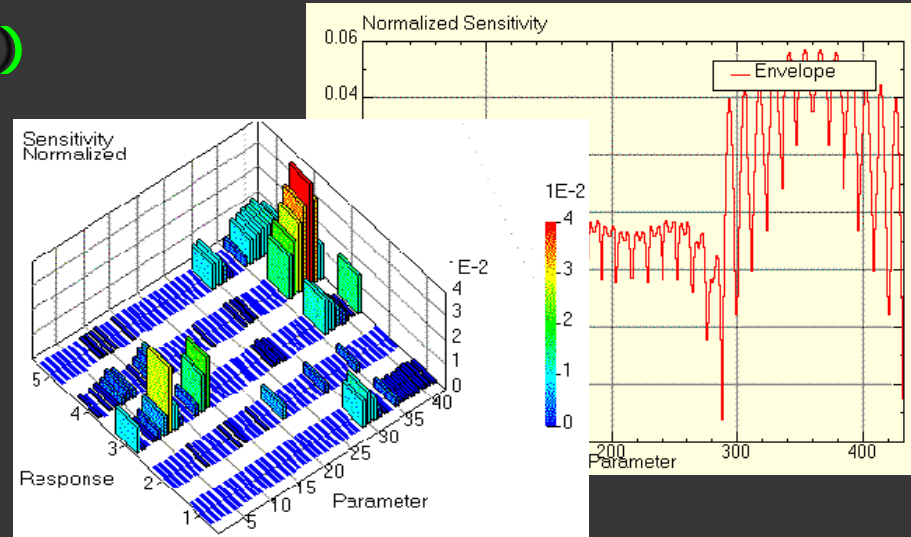
### (1) 微分感度

- ・共振周波数微分感度
- ・モードシェープ微分感度
- ・MAC値微分感度
- ・質量微分感度

### (2) 有限差分感度

## モデル・アップデート

- ・擬似インバース法
- ・ベイズのパラメータ推定法





# 位置相関/ モード相関/ FRF相関

## 位置相関

FEモデルの節点と実験における計測ポイントとのペアリングを行う。

## モード相関

MAC (モード信頼性評価関数) により、EFAとEMAによるモードの相関関係を調べる。

## FRF相関

CSAC(クロスシグネチャ信頼性評価関数)とCSF(クロスシグネチャ倍率) を使って、FEAによるFRF(周波数応答関数) とEMAによるFRFの相関関係を調べる。

## モード倍率 ( Mode Scale Factor )

添字 1 は実際の測定自由度、添字 a を解析のベクトル、添字 e を実験のベクトルとすると、

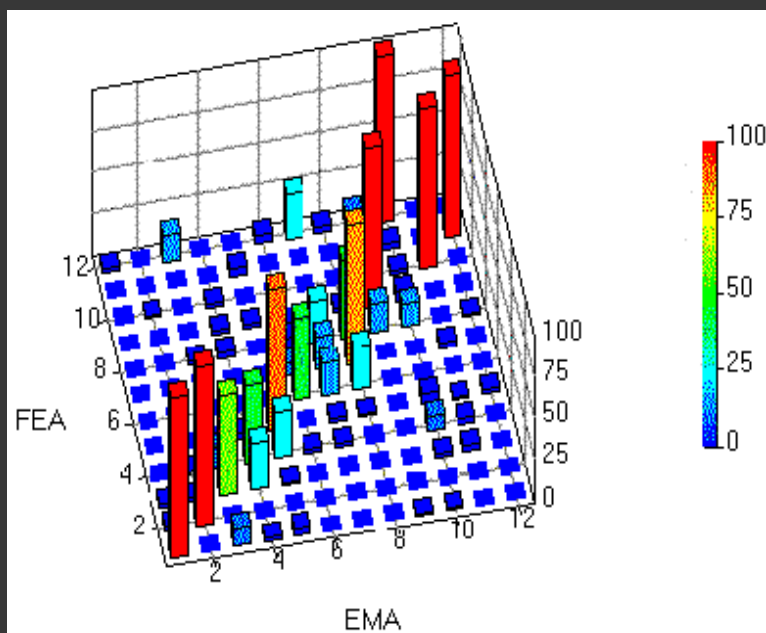
$$MSF(\psi_{a1}, \psi_{e1}) = \frac{(\{\psi_{a1}\}^t \{\psi_{e1}\})}{(\{\psi_{e1}\}^t \{\psi_{e1}\})}$$

- 実験のベクトルの中の測定されていない部分を添字 2 で表すと、

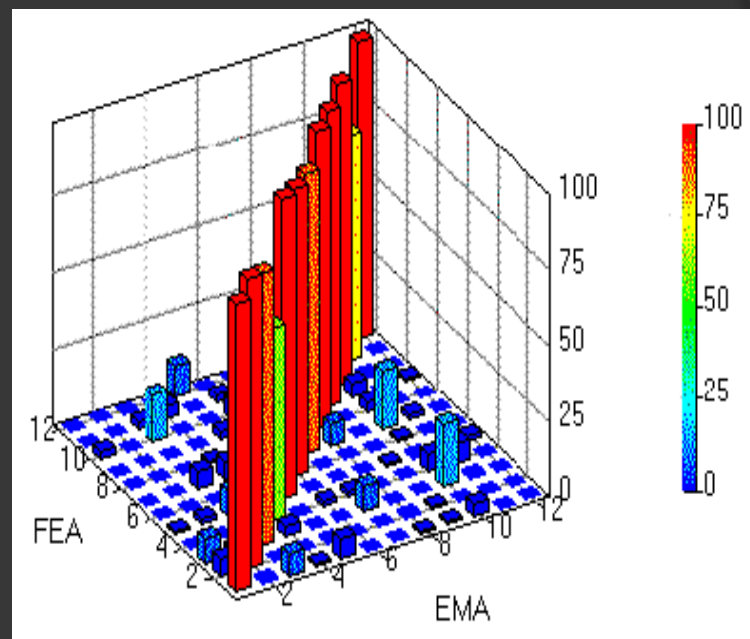
$$\{\psi_{e2}\} = \frac{\{\psi_{a2}\}}{MSF(\psi_{a1}, \psi_{e1})}$$

# MACマトリックス

アップデート前



アップデート後



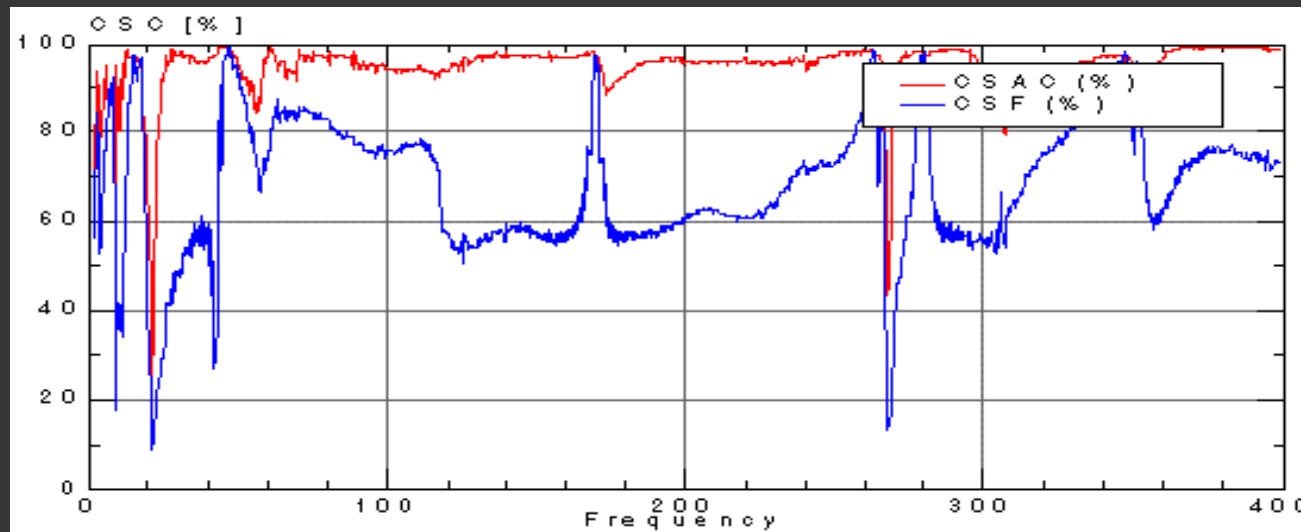
# CSC (クロスシグネチャ相関関数)

## CSAC (クロスシグネチャ信頼性評価関数)

測定データと予測（解析）データ間の形状に関する相関。0と1の間の値をとる。主として共振ピーク的位置と大きさによって決定するので、この関数は質量と剛性のモデル化の変更に対して最も感度が高い。シグネチャとは識別特性のこと。

## CSC (クロスシグネチャ倍率)

振幅の食い違いを評価するための相関。0と1の間の値をとる。振幅を評価するので、この関数は減衰のモデル化における誤差に対して高い感度を示す。



# 収束演算 (目的関数)

## § 共振周波数間の重み付き相対差

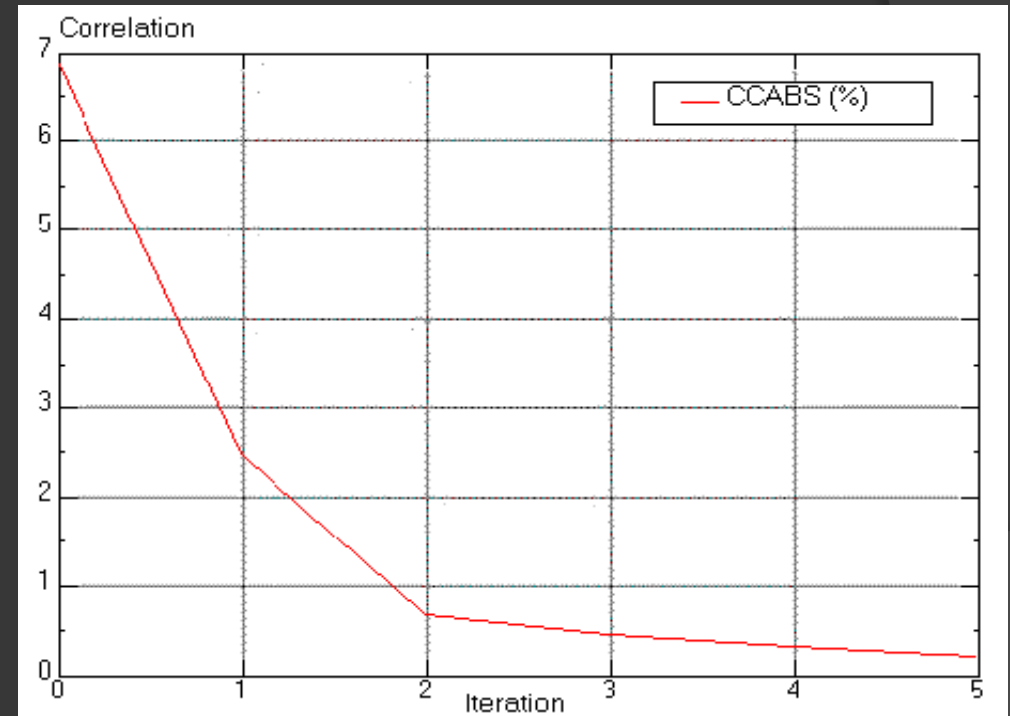
$$CC_{MEAN} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{R_i} \frac{\Delta f_i}{f_i}$$

## § 重み付き絶対差

$$CC_{ABS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{R_i} \frac{|\Delta f_i|}{f_i}$$

## § 平均MAC値

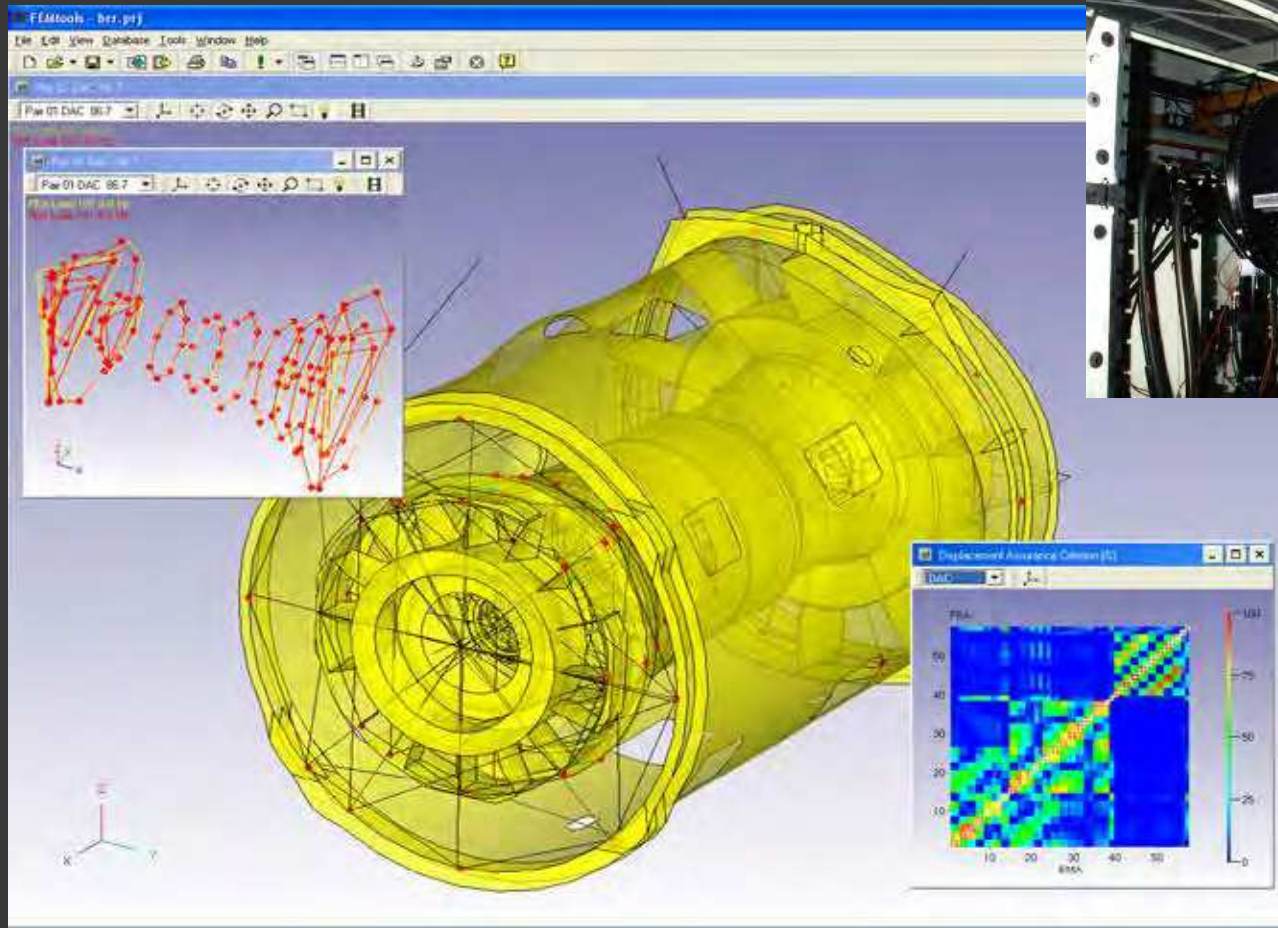
$$CC_{MACMEAN} = 1 - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M C_{R_i} MAC_i$$



# システム・シンセシス / システム同定 / 誤差局在化 / 感度解析

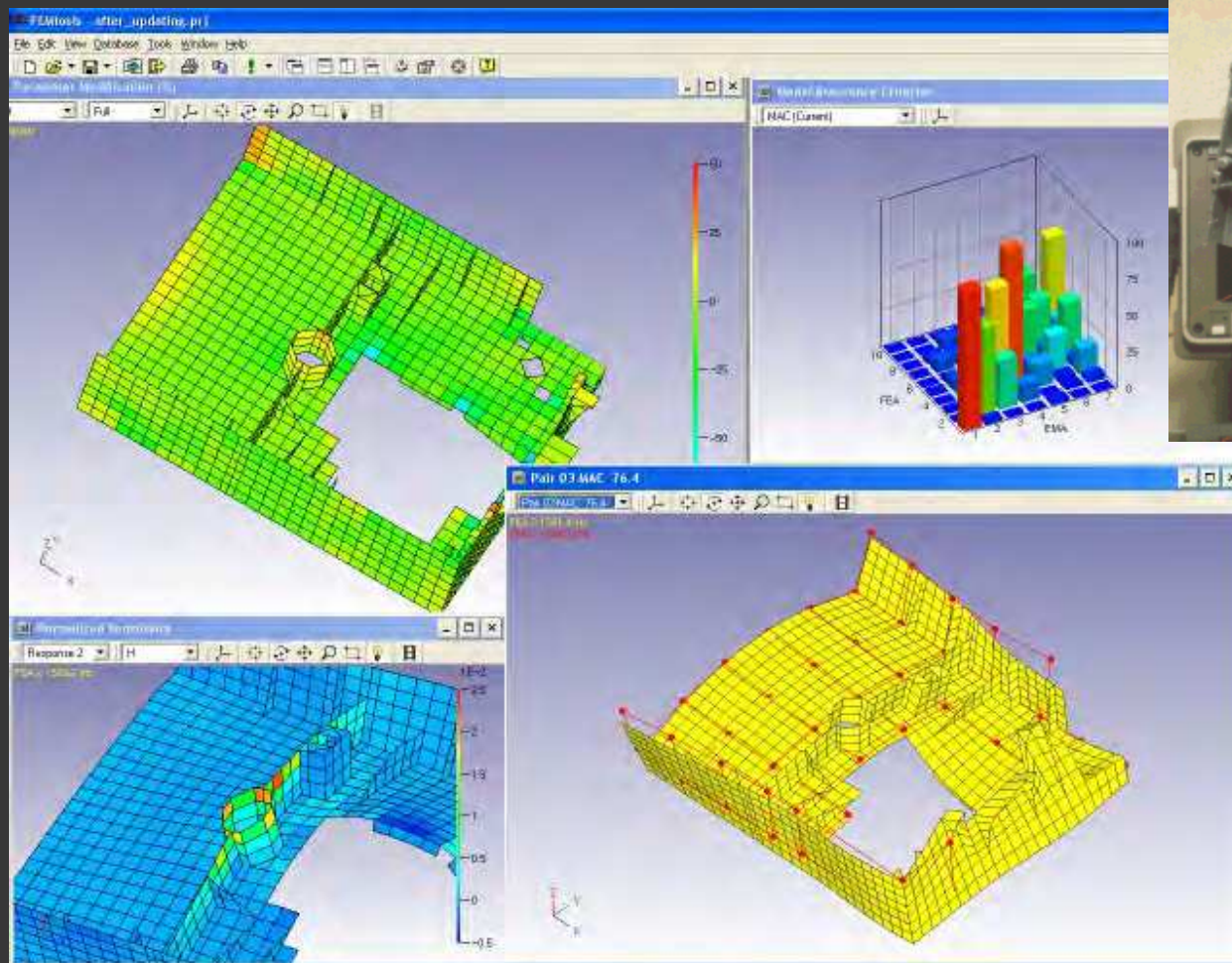
- ◎ **システム・シンセシス (System Synthesis)**  
与えられた入力に対して既知の異なる伝達関数が組み合わされた場合の、出力を予測する技術のこと。
- ◎ **システム同定 (System Identification)**  
当該部分の伝達関数や特性（質量、剛性、減衰）を求めるために、入力と出力を解析すること。
- ◎ **誤差局在化 (Error Localization)**  
あるモードの範囲に対して特に良い相関や悪い相関を示す領域を推定する方法。
- ◎ **感度解析 (Sensitivity Analysis)**  
当該部分の特性を変化させることによって出力にどのような影響を及ぼすかを予測する技術のこと。

# 産業事例



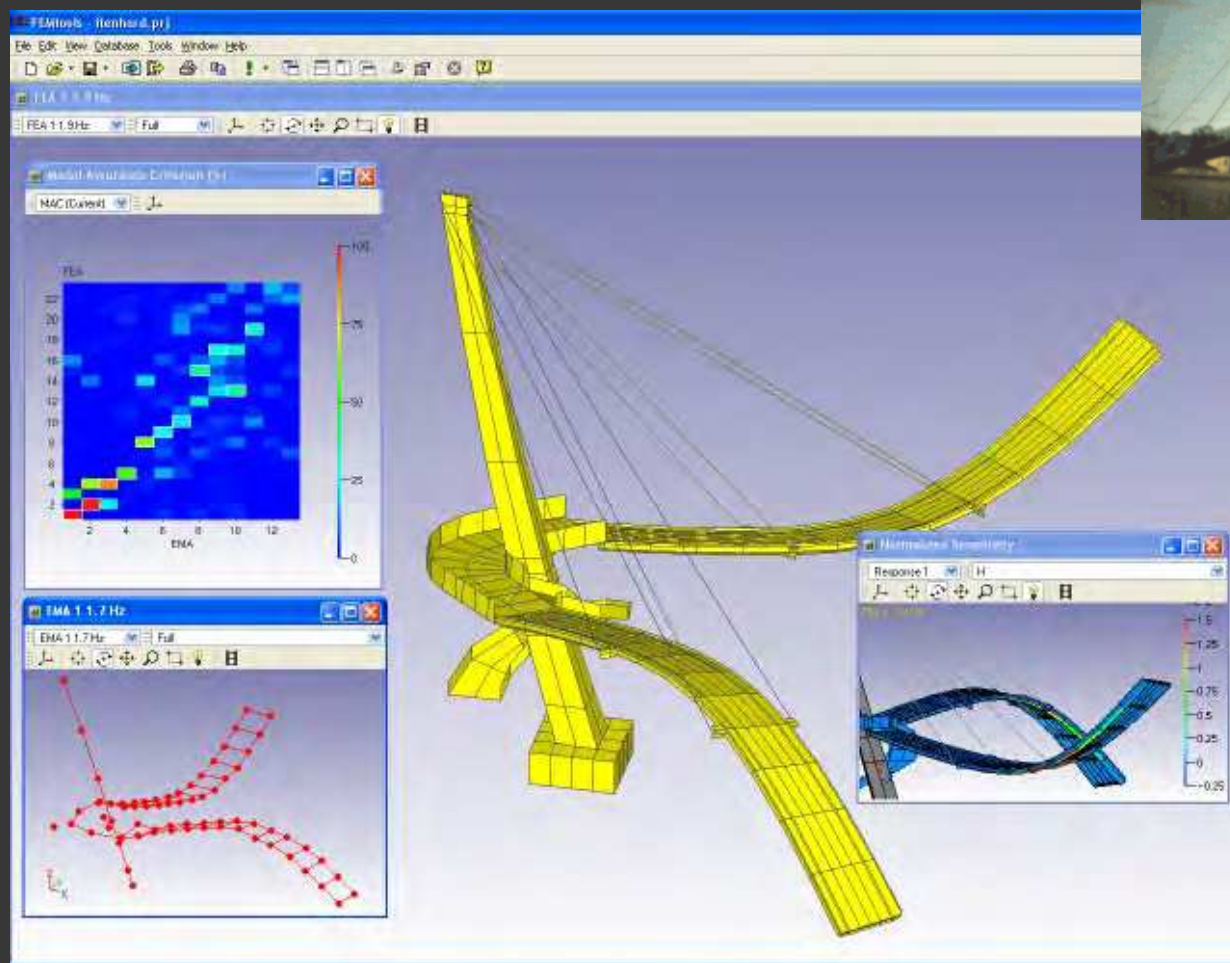
実験による静的変位データを用いた剛性パラメータの  
アップデートイング(Courtesy Rolls-Royce, Dahlewitz ; ドイツ)

# 産業事例



実験モード・データ(共振周波数, モード・シェープ)を用いた、ハードディスク・カバーの物理的要素パラメータのアップデーティング

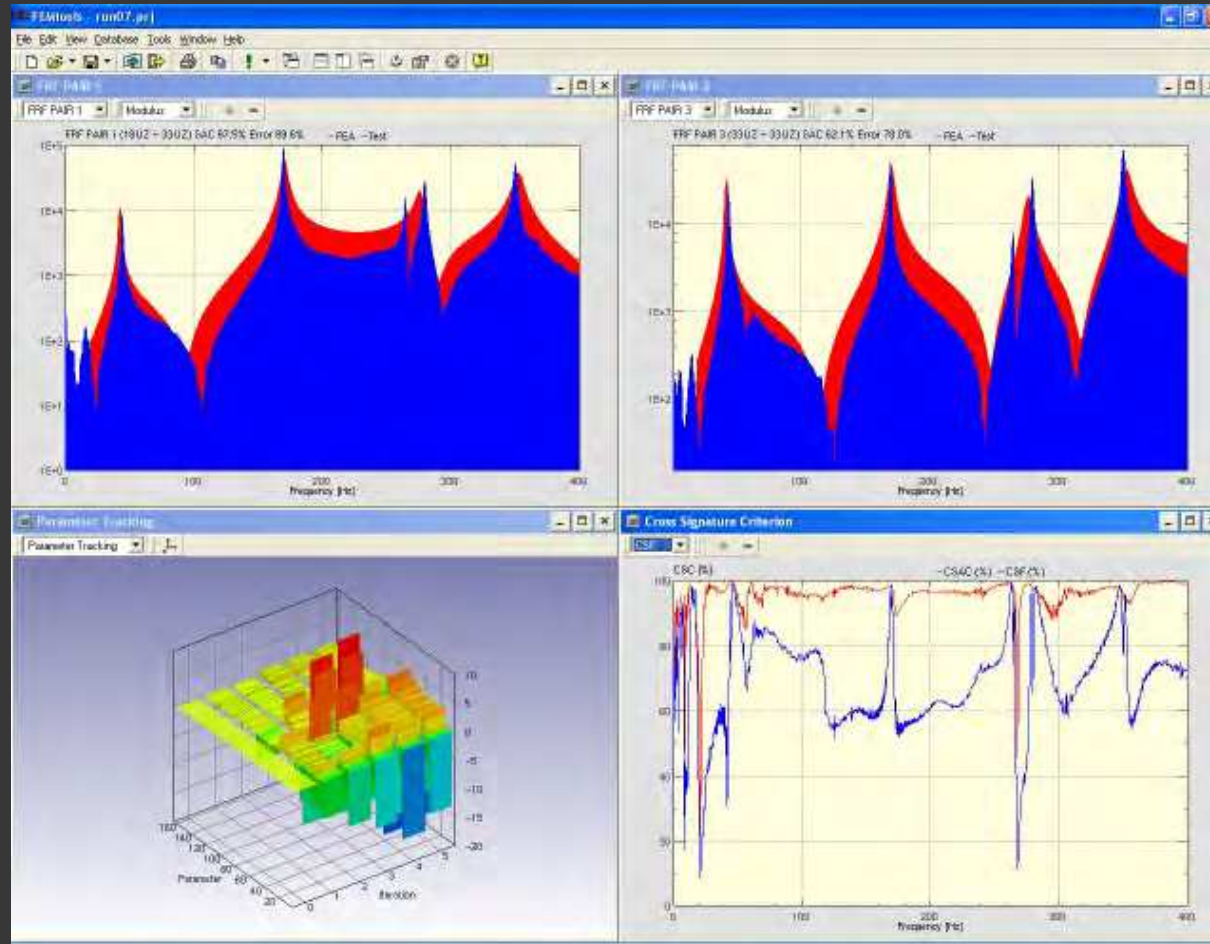
# 産業事例



歩道橋の FEA とモード・テスト・データの相関  
および感度解析 (Courtesy EMPA; スイス)

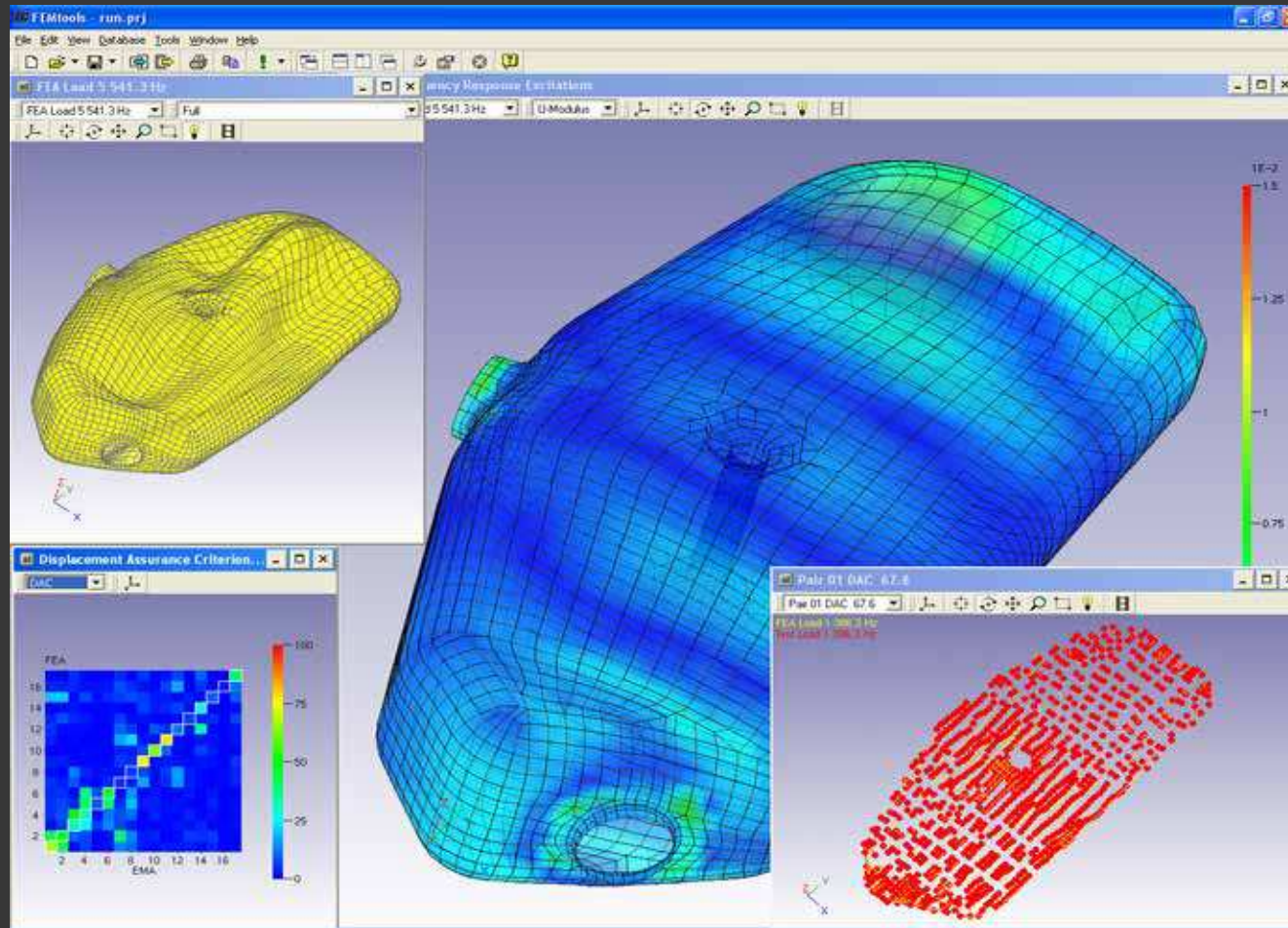


# 産業事例



周波数応答関数を直接利用した、物理的要素パラメータの  
アップデートイングおよび減衰のモデル化

# 産業事例



マフラーの外側表面の実稼動形状をレーザー・スキャニング測定し、マフラー空洞内の分布圧力を同定 (Courtesy Faurecia; フランス)

# FE モデル・アップデートイングの利点

モデル化の方法を学べる。

解析結果と実験結果の解釈や判断が可能になる。

構造特性の同定ができる。

FEA における不確実性が把握できる。

将来の FE のモデル化に対する専門的技術が得られる。

# FEMtools の応用

静的 / 動的構造解析

プリテスト計画

FE モデル検証 (相関, 感度, アップデーティング)

誤差局在化 - 損傷探知 - モニタリング - 品質保証

FE モデル縮小

設計空間探索 (摂動法, 確率的手法, ...)

シンセシス - 構造変更シミュレーション - 設計最適化

材料の同定

スクリプティングと FEMtools API (FBScript, Python, Matlab, ...) による制限のない拡張性、カスタマイゼー

ション

およびインテグレーション

# 将来の方向

CAD-CAE 統合における応用 (構造変更、シンセシス、設計最適化、確率的解析、...)

時間領域法

非線形ダイナミクス

データベース管理 (カスタマイゼーション、マルチモデル、...)

他技術とのリンク (熱、SEA、音響、...)

外部ツールとの強力な統合 (プリ / ポスト・プロセッサ、FEA ソフトウェア、Matlab、MS Office、...)

FEMtools テクノロジーを統合したエンドユーザー・アプリケーション (損傷探知、材料同定、...)

# 市場

## 輸送

自動車 (ボディ・イン・ホワイト、エンジン、パワートレイン、...)

航空機 (ジェットエンジン、フレーム、...)

列車 (台車、...)

宇宙 (衛星システム、オプティカル・マウンティング、...)

電子 (プリント基板、カバープレート、...)

装置 (洗濯機、ドライヤー、...)

電力 (タービン、配管、...)

土木 (橋梁、高層ビル、配管、...)

医療 (インプラント、義肢、...)

教育 (教育、学位論文、プロジェクト研究、...)

# サポート&サービス

通常のメンテナンス・リリース  
ホットライン・サポート

FEMtools サポート・サイト  
([www.femtools.com/support](http://www.femtools.com/support))

リリース情報

刊行物の公開

ダウンロード

ニュースおよび FAQs

コンサルティングおよびプロジェクト研究  
トレーニング

# プラットフォーム

Windows XP, Vista, 7, 8, ... (32bit/64bit)

UNIX (SUN SPARC, HP-UX, IBM RS/6000 -  
AIX 4.3+, SGI - IRIX 6.5+)

MAC OS

Linux Red Hat 9.0+



# フレキシブルなライセンスリング・オプション

system ID を使用するワークステーション用のノードロック・

ライセンス(すべての Unix)

携帯可能な dongle を使用するノードロック・ライセンス  
(PC および Linux)

フローティング・ライセンス (すべての OS)

サーバー上にライセンスマネジャー

ネットワーク上の任意のコンピュータ上で実行可能

コンピュータ・ライセンス (= ポータブル・フローティング・ライ  
センス)

トライアル・ライセンス

買取または年間レンタル・ライセンス

一般企業向けライセンスまたは教育機関向けライセンス

# まとめ: FEMtools の主な利点

使いやすく、直感的なユーザー・インターフェイス  
モダン・フレームワーク・アーキテクチャ  
プラットフォーム・インディペンデント・テクノロジー  
(Windows、Unix、Linux、MAC OS: シングル・ソース/クロス・プラットフォーム・テクノロジー)

## 産業上の強み

- 既存 CAE 環境でのインテグレーション
- 無制限のモデル・サイズ
- ソルバー・インディペンデント
- オープン・データベース・アーキテクチャ

統合化されたスクリプティング・ツールを用いたカスタマイゼーションや拡張

スペシャリストの専門チームによる開発およびサポート

# さらに詳しい情報の入手先

<http://www.femtools.com>

製品情報  
技術論文  
評価版

<http://www.femtools.com/partners.htm>

<http://www.femtools.jp>

国内向サイト （運用：DDS/Structural Science）  
製品情報  
技術論文

FEMtools 開発元

**Dynamic Design Solutions ( DDS )**

Interleuvenlaan Belgium

[www.femtools.com](http://www.femtools.com)

FEMtools 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 FAX: 044-738-031 6

E-MAIL: [support@ssinst.com](mailto:support@ssinst.com) URL: <http://www.ssinst.com>