

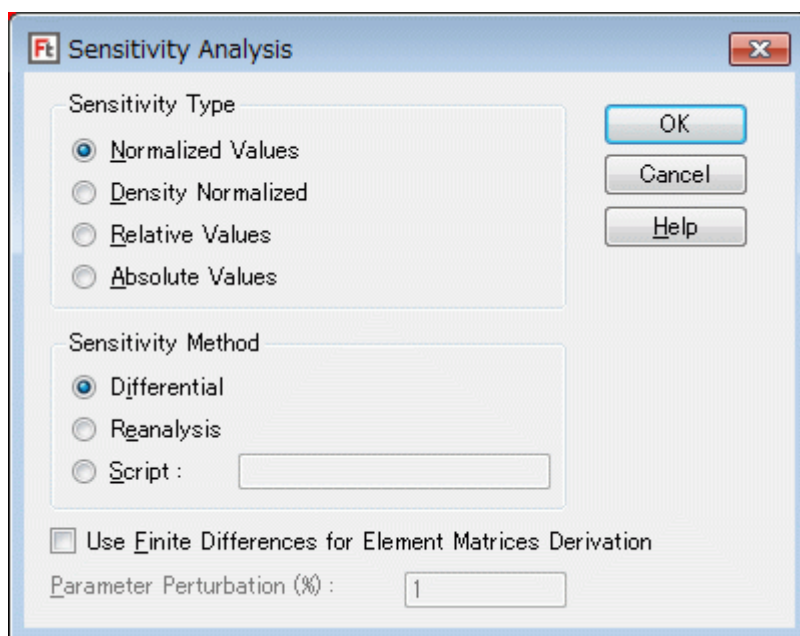
## 【解説】 感度解析

### 概説

感度解析は、材料特性、幾何学特性、境界条件などのパラメータの変更によって、モデルの構造的応答がどのような影響を受けるかを推定する計算技術です。FEMtools の感度解析は、次のような目的のために使用されます。

- 解析：モードパラメータあるいは応答に関するモデル化の仮定の影響を分析します。例えば、弾性材料の代わりに弾性境界条件によるモデル化の影響を推定します。
- 最適化設計：モードパラメータ値を変更するための構造モデル上の最適位置を推定します。
- 特定の応答とパラメータの組み合わせに関する感度の識別：これはモデルアップデートのためにどのパラメータと応答を選択すべきかを決定するために使用されます。
- 新しいパラメータ値を推定するための感度：感度マトリックスは、ゲイン・マトリックスを求めるために、その逆マトリックスとして計算されます。このゲイン・マトリックスは、予測応答値と参照応答値の差を補正するのに必要なパラメータ変更量を見出すために、その差に掛け合わされます。この計算は、FEMtools モデルアップデート・モジュールによって実行されます。
- プリテスト解析：感度解析は、トランスデューサなどの質量負荷がモードパラメータに与える影響を検討する場合のようなプリテスト解析にも適用できます。
- モード応力：共振周波数感度はモード応力と関係があります。モード応力は材料の追加や削除による周波数コントロールおよび重み付けの最適化に役立ちます。モードシェープの性質により、応力や変形の物理的な数値を得ることはできませんが、その相対的な分布情報によって構造物の固有振動数（近傍）における最大および最小の応力領域を推定するのに有用です。

### Sensitivity Analysis ダイアログボックス



### 機能

Sensitivity Analysisダイアログボックスは、感度マトリックスの計算用セッティングを指定するために使用されます。

### 解説

#### Type

絶対値、相対値、正規化値、密度正規化値（Absolute values , Relative values , Normalized values, Density Normalized values）などの感度を得るために指定し

ます。

Method	微分感度、レスポンス有限差分感度（再解析用）、ユーザー定義スクリプトの使用などの感度の計算方法を指定します。
Use Finite Differences	グローバル・セッティングとして、要素の剛性と質量のマトリックスを得るために有限差分法を使用するように指定します。この指定をしなければ、微分法が使用されます。デフォルトの方法はパラメータ・タイプに依存します。
Parameter Perturbation (%)	有限差分感度を計算するために使用されるパラメータ摂動値を指定します。このセッティングは、要素マトリックス有限差分法およびレスポンス有限差分法にも使用されます。

### 関連セッティング

レスポンスの再解析や要素マトリックス有限差分の計算に外部ソルバーを使用することも可能です。ただし、すべてのドライバがこれをサポートするとは限りません。その詳細については、それぞれのFEAインターフェイスとドライバのドキュメントを参照してください。

感度解析用ソルバー・ドライバは、セッティング環境で指定されます。

Edit > Settings > Analysis > Server and Solvers

その他のドライバについては、<installdir>%scripts%drivers ディレクトリあるいは、FEMtoolsサポート・サイト (support@femtools.com) を参照し、必要に応じてインストールしてください。

### 関連項目

SENSITIVITY

SET SENSITIVITY

## SET SENSITIVITY コマンド

SET SENSITIVITY コマンドは感度解析に関係するデフォルトのセッティングを指定するために使用されません。

### シンタックス

```
SET SENSITIVITY METHOD {DIFFERENTIAL | REANALYSIS | SDM | script}
```

```
SET SENSITIVITY FINITE [ON | OFF]
```

```
SET SENSITIVITY PERTURBATION real_val
```

```
SET SENSITIVITY SOLVER script_name
```

### 補語

DIFFERENTIAL	それが利用可能な場合、微分法を使用するために指定します。
FINITE	要素の質量と剛性のマトリックスの差分が微分法を使用する (FINITE OFF) か、要素マトリックスの有限差分法を使用する (FINITE ON) か、を明示します。
PERTURBATION	有限差分感度（パーセント）計算のために使用されりパラメータ摂動値のデフォルト値を指定します。同上のFINITEを参照してください。
REANALYSIS	レスポンス差分法を使用するために指定します。
Script	感度マトリックスを計算するか、インポートするためのカスタム・スクリプトを指定します。
SDM	SDMベースの感度解析法を使用するために指定します。（ODSベースのアップデートに利用します。）
SOLVER	有限差分感度解析（レスポンス有限差分またはマトリックス有限差分）用の外部ソルバーを使用するためのプログラム・スクリプト名を指定します。

## 備考

- ソルバー（静解析または動解析）が「femtools」とSET SENSITIVITY FINITESETとセッティングが異なる場合、FEMtoolsは形成されたFEモデルの一時的モデルを使用して正確な感度を計算するためのメカニズムを使用します。ソルバーが「femtools」である場合、要素マトリックスの有限差分の形成には内部要素公式が使用されます。
- カスタム・スクリプト（SET SENSITIVITY METHODスクリプト）が使用される場合、それは絶対感度を返します。その後の正規化は、SENSITIVITYコマンドによって行われます。
- デフォルトでは、感度計算方法として、選択されたパラメータに対して微分感度（利用可能な場合）が使用されます。補語のPERTURBATIONは有限差分計算と共に使用されるパラメータ摂動値を指定するために使用されます。

## メニュー・パス

Edit > Settings > Analysis > Sensitivity Analysis

## パラメータの選択

パラメータは実際の構造物をモデル化するために使用する物理的量であり、どのパラメータを選択するかは、問題の種類によって異なります。

感度解析をモデルアップデート用のパラメータを選択のための効果的なツールとして使用するには、はじめに、多くのパラメータを選択し、高感度と低感度のパラメータを識別し、効果がない（低感度）パラメータを除外します。さらに、より最適なモデルアップデートを実行するために、その有効なパラメータ（高感度）について、誤差局在化法を使用し検査することができます。感度解析用のパラメータを選択するには、次のことを考慮に入れてください。

- 潜在的なモデル化の誤差を検証するために、関連する剛性や質量などの多くのパラメータを含めてください。
- 幾何学的特性、許容値、確信度、感度などに基づいて、パラメータをグループ化できるかを検討してください。
- 感度解析と誤差局在化の結果を比較、検討してください。

感度解析は選択することができるパラメータ数と種類は、メッシュ密度と使用される要素タイプの関数です。例えば、ブリック要素のみのフリー/フリーFE モデルの正規モード解析では、材料特性のみをパラメータとして選択することができます。一方、ビーム、シェル、ソリッドなどの要素でモデル化され場合には、パラメータの選択幅は広がり、その選択を決定するにはより多くの経験が必要になります。

## 応答の選択

パラメータに関する応答の選択は主としてアプリケーションによって導かれます。最適化設計のための情報を望む場合、その目標の挙動は、例えば、共振周波数とか質量のような構造的な応答を選択します。

一般に、目的がモデルアップデートの場合には、実験によって得られた全ての適切な応答値を選択します。その場合、次の注意を考慮に入れてください。

- 信頼性の低い実験データは、含むべきではありません。
- 実験応答は、解析による応答とペアリングされなければなりません。

実験データがデータベースに存在しない場合、解析結果を応答として選択するか、解析結果データテーブルを実験データベースにコピーしておく必要があります。実験データがデータベースにない場合には、相関係数がゼロになるため、モデルアップデートは行えません。

## 感度結果

### 相対感度と正規化感度

FEMtools は、次の 4 タイプの感度値をサポートします。

- 絶対感度 (Absolute sensitivities)
- 相対感度 (Relative sensitivities)
- 正規化感度 (Normalized sensitivities) (デフォルト)
- 密度正規化感度 (Density normalized sensitivities)

ローカル・パラメータに関する感度は、絶対感度値として計算され、それらの絶対感度 ( $S_a$ ) はレスポンスとパラメータで使用された単位を反映します。グローバル・パラメータにおいては、それぞれ異なる単位値のパラメータを指定することができるため絶対感度として計算されません。即ち、グローバル・パラメータを選択した場合、絶対感度による感度解析は計算されません。

$$dR = S_a dP$$

相対感度 ( $S_r$ ) は、ローカルおよびグローバルのパラメータ値に使用された単位に依存しません。そのため、この感度はそれぞれのパラメータ間との感度を比較するのに有効です。

$$dR = S_r \left( \frac{dP}{P} 100 \right)$$

正規化感度 ( $S_n$ ) は、レスポンス値に使用された単位に依存しない相対感度から計算することができます。また、正規化感度はパラメータ値を 1 パーセント変更するのに必要な変更レスポンス値のパーセンテージを示します。そのため、正規化感度は無次元であり、レスポンスとパラメータの関係を比較するとき使用します。

$$\frac{dR}{R} = S_n \frac{dP}{P}$$

密度正規化感度は、ローカルおよびグローバルのパラメータと密度 (要素サイズ) に関する正規化感度 ( $S_d$ ) が計算されます。これは、各要素ボリューム (容積) で除算された正規化感度が計算され、FE メッシュのサイズが不規則で、それらの要素サイズの差が大きい場合に有効です。

## 検証例

あるプレートのモード解析において、パラメータ (P) としてヤング率を選択する場合、以下のように計算されます。

ヤング率  $E=210000$  において、

$$f1 = 51.79 \text{ Hz}$$

$$\text{normalized sensitivity} = 0.4739$$

$$\text{relative sensitivity} = 0.245490$$

ヤング率  $E = 212100$  において、

$$f2 = 52.04 \text{ Hz}$$

$$\text{normalized sensitivity} = 0.4738$$

$$\text{relative sensitivity} = 0.2465$$

以上より、次の関係が得られます。

$$dP/P = 1\% = 0.01$$

$$df = f2 - f1 = 0.25 \quad \sim \text{relative sensitivity}$$

$$df/f = (f2 - f1)/f1 = 0.0048 = 0.48\% \quad \sim \text{normalized sensitivity } S_n$$

これより、正規化感度  $S_n$  の関係式は次のとおりです。

$$df/f = S_n (dP/P)$$

$$0.0048 \quad 0.474 \times 0.01 \quad (\text{相対値})$$

$$0.48 \quad 0.474 \times 1 \quad (\text{パーセント})$$

相対感度  $S_r$  の関係式は、次のとおりです。

$$df = S_r (dP/P) 100$$

$$0.25 = 0.245 \times 0.01 \times 100$$

感度解析結果から、ヤング率  $E$  を 1% 増加することによって、周波数が 0.474% あるいは、0.245Hz 増加すると結論付けられます。

## 感度とゲインのテーブルの観察

感度とゲインのテーブルデータをカーブ、マトリックスおよびカラーコード、ベクトルコードのメッシュなどのグラフィック表示によって観察することができます。

### 曲線（カーブ）

感度マトリックスとゲイン・マトリックスの1行または1列を曲線で視覚化することができます。

感度またはゲインの値を曲線として表示するには、

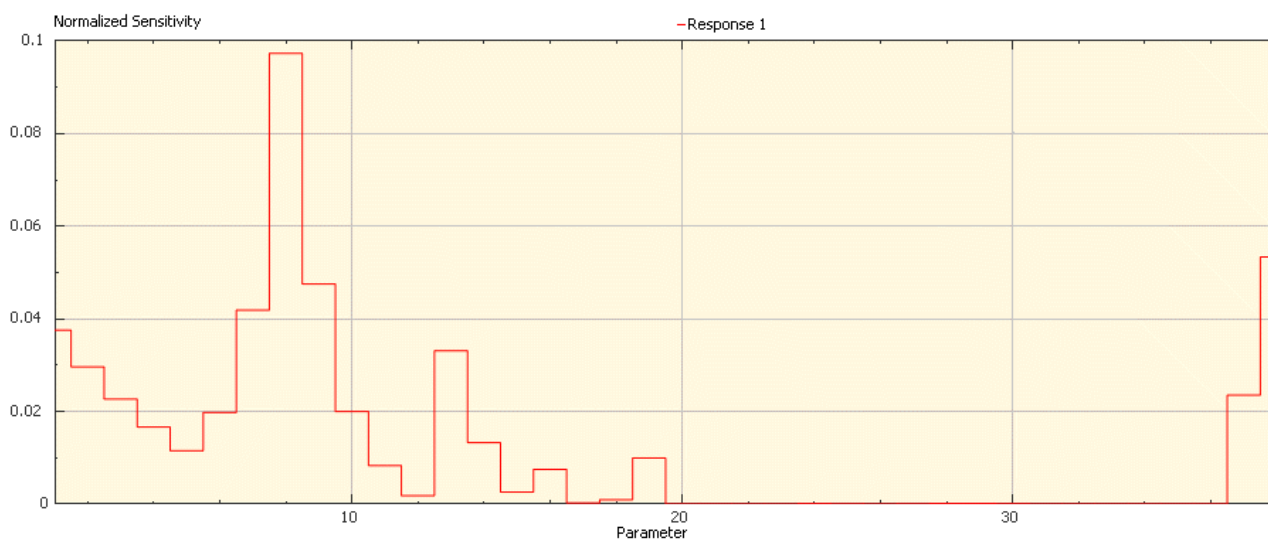
- エクスプローラ・ウィンドウの **Graphics** タブから **XY-Curve** を選択し、さらに、**Sensitivity=f** (パラメータ)、**Sensitivity=f** (応答)、**Gain = f** (パラメータ) または、**Gain=f** (応答) をドロップダウン・メニューから選択してください。

あるいは、

- コンソールから **CURVE** コマンドと一緒にラベル **SENSITIVITY** または、**GIAN** を使用し、応答またはパラメータの番号を指定してください。以下にその例を示します。

#### CURVE SENSITIVITY RESPONSE 1

このコマンドは、全てのパラメータに対する応答番号1の感度値をトレースします。



感度曲線

## マトリックス

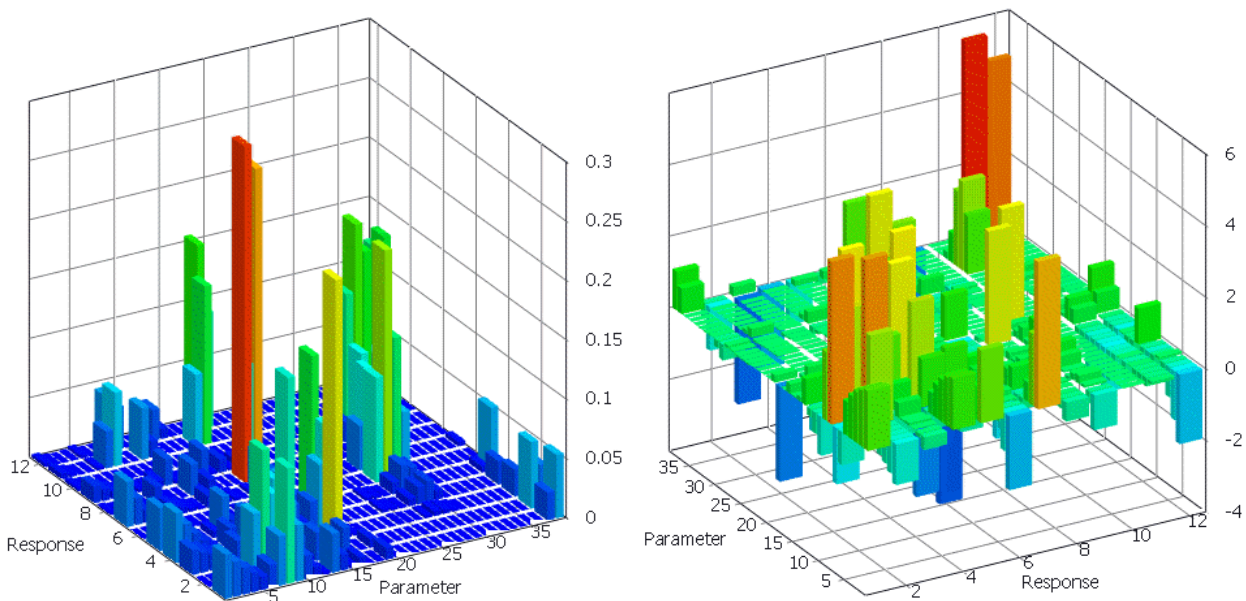
感度テーブルおよびゲイン・テーブルは、実際はマトリックスであり、次のようにして視覚化できます。

感度マトリックスおよびゲイン・マトリックスを表示するには、

- エクスプローラ・ウィンドウの **Graphics** タブから **3D-Matrix** を選択し、さらに、**Sensitivity** または、**Gain** を選択してください。

あるいは、

- コンソールから **MATRIX** コマンドの後にラベル **SENSITIVITY** または、**GIAN** を付け加えてください。  
> Matrix sensitivity  
> Matrix Gain



感度マトリックス (左) とゲイン・マトリックス (右)

## カラーコードまたはベクトルによるメッシュ

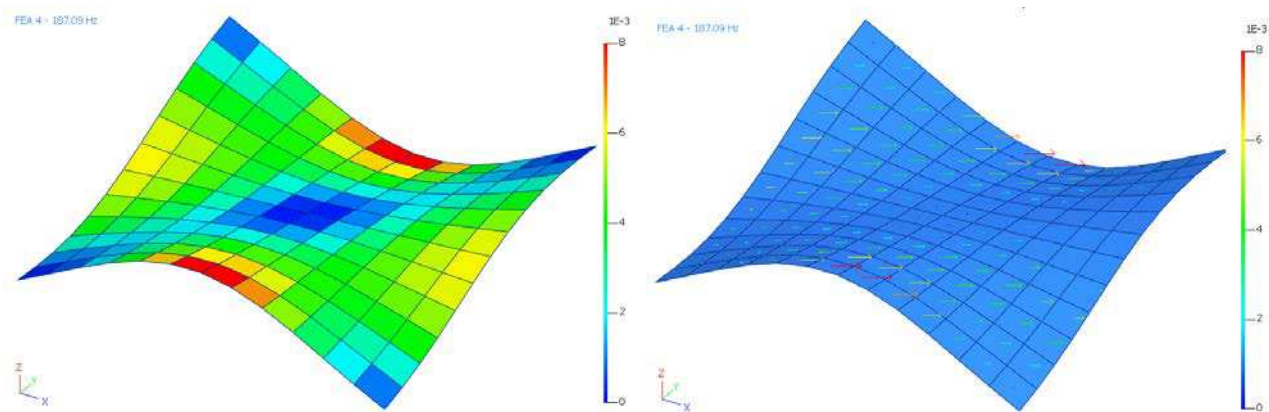
要素は、感度またはゲインの値の関数としてカラーコード化できます。一つの要素に対して複数のパラメータが選択されるので、どのパラメータ・タイプを視覚化するかを指定しなければなりません。

カラーコードまたはベクトルのメッシュを使って感度またはゲインの値を表示するには、

1. エクスプローラ・ウィンドウの **Graphics** タブから **FE Mesh** を選択し、さらに、**Contour** を選択してください。
2. グラフィックス・ウィンドウのツールバーのドロップダウン・リストボックスから応答とパラメータを一つ選択してください。
3. カラーコードの代わりにベクトルコードを使用するには、グラフィックス・ウィンドウ内で右クリックし、ポップアップメニュー から、**Customize** を選び、要素マーカーとして、**Vectors** にチェックマークを入れてください。OK をクリックしてダイアログボックスをクローズしてください。

あるいは、

- コンソールから **MESH** コマンドの後にラベル **SENSITIVITY** または、**GAIN** を付け加えてください。カラーコード化メッシュではなくベクトルコード化メッシュを表示するには、ラベル **Vector** を使用してください。



カラーコード分布（左）とベクトル分布（右）のメッシュ表示

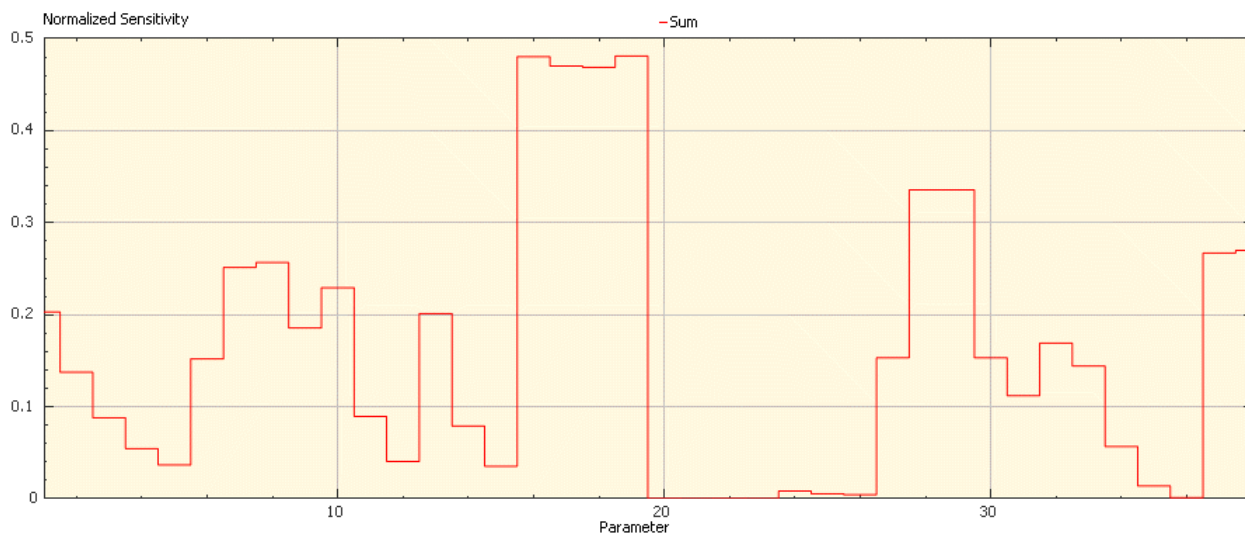
感度またはゲインの値が有効な要素だけがカラーコード化され、他の要素は中立カラー（灰色）で表示されます。応答が共振振動数で、そのモードシェープがデータベース内に存在すれば、そのモードシェープは自動的に表示されます。

## 感度とゲインのエンベロップ・カーブ

感度やゲインのエンベロップ・カーブとして視覚化するのに使用されます。これらのエンベロップ・カーブは全ての応答およびパラメータに関する感度およびゲインを観察することを可能にします。即ち、エンベロップ・カーブはマトリックスの全行または全列の和を示します。

### > MESH GAIN ENVELOPE PARAMETER

このコマンドは、全ての応答 (=列) に対応する全てのゲイン値の和が計算され、次図はパラメータ番号の関数としてのゲインのエンベロップ・カーブを示します。



感度値エンベロップ・カーブ

エンベロップ・カーブは、非常に敏感な応答が存在しない場合のパラメータを特定するのに役立ちます。応答エンベロップ・カーブは全応答の寄与率と見なされ、低い感度のエンベロップ・カーブ値は、パラメータの変化に対してどの応答も敏感でなかったことを示します。これは、すべての応答に対してパラメータの効果がなく、モデルアップデートの際の選択に含めるべきでないことを意味しています。

注意：エンベロップ・カーブは、感度またはゲイン・マトリックスの列または行の和であり、異なるタイプの応答とパラメータが組み合わせられた場合、エンベロップ・カーブ値を評価するには、正規化感度の使用を推奨します。