
* 「3D非線形弾性解析K」の紹介 *

[著者] 黒田 英夫

<プログラム開発環境>

OS : Windows 11NET Framework 4.8が必要

言語 : Visual Basic 2022 (Visual Studio 2022 Community)

<プログラムと本書の著作権>

フリーソフトで、著作権を開放します

「3次元構造解析K (FEM3D)」の構造データと非線形弾性の材料データを用いて、3次元の非線形弾性解析を行なう有限要素法ソフトを提供します。温度歪みを有する熱応力解析も可能で、外力荷重を同時に負荷できます。本ソフトは、ヤング率が一定でない物性に対応するものです。弾塑性に対しては、塑性域で変形速度や断面減少の影響がない場合に適用できます。また、本ソフトでは、降伏評価に利用されるMises応力も算出しています。なお、熱応力解析の温度条件データとして、「3次元熱伝導解析K」の結果データファイルを利用することができます。

本ソフトのFEM方程式計算では、ソルバーとして反復法*、バンドマトリックス法、およびスカイライン法の3種類を組み込んでいます。これら各ソルバーの特質に応じて使い分けできます。また、バンドマトリックス法ソルバーでは大規模構造のメモリー不足に対応できます。

注) *ICCG (Incomplete Cholesky Conjugate Gradient) 法によるもので、大規模構造に対応できます。ただし、一部の固定境界条件では非収束となります。

なお、本書で使用説明のための解析事例は有限要素数の少ないものを取り上げていますので、実用に当たっては必要に応じて要素数を増やしてください。また、解析理論については、算生会の「3次元構造解析」ソフトと重複するところは省略し、本書では非線形弾性解析と熱応力解析に関する部分を説明します。

[備考] 本書の解析事例の計算時間は、下記仕様のパソコンによります。

CPU : 3GHz (64bit、4コア) RAM : 16GB

<目次>

ページ

第1章 有限要素法 -----	2
第2章 プログラムの機能・構成 -----	6
第3章 データの準備 -----	9
第4章 「材料データ」処理プログラム -----	12
第5章 「熱応力条件データ」処理プログラム -----	16
第6章 「計算」プログラム -----	31
第7章 「後処理」プログラム -----	39
第8章 焼き嵌めの計算例 (熱応力解析) -----	51
[参考文献] -----	53

第1章 有限要素法

有限要素法の構造解析については、算生会「3次元構造解析」ソフトの説明書を参照してください。ここでは、非線形弾性解析と熱応力解析を主体に説明します。

1.1 使用要素

本ソフトでは図1-1の六面体2次要素（20節点）を使用します。同図のように、面(1)～(6)の六面で、頂点節点と中間節点とがあります。各面は平面でも曲面でも構いません。曲面の場合は、辺の3節点が直線上でなく、曲線上の点となります。図1-1の節点の番号は、ちょうど六面体要素を定義する順番に付番しています。この要素定義の節点順序は非常に重要で、必ずこの順序を厳守しなければなりません。

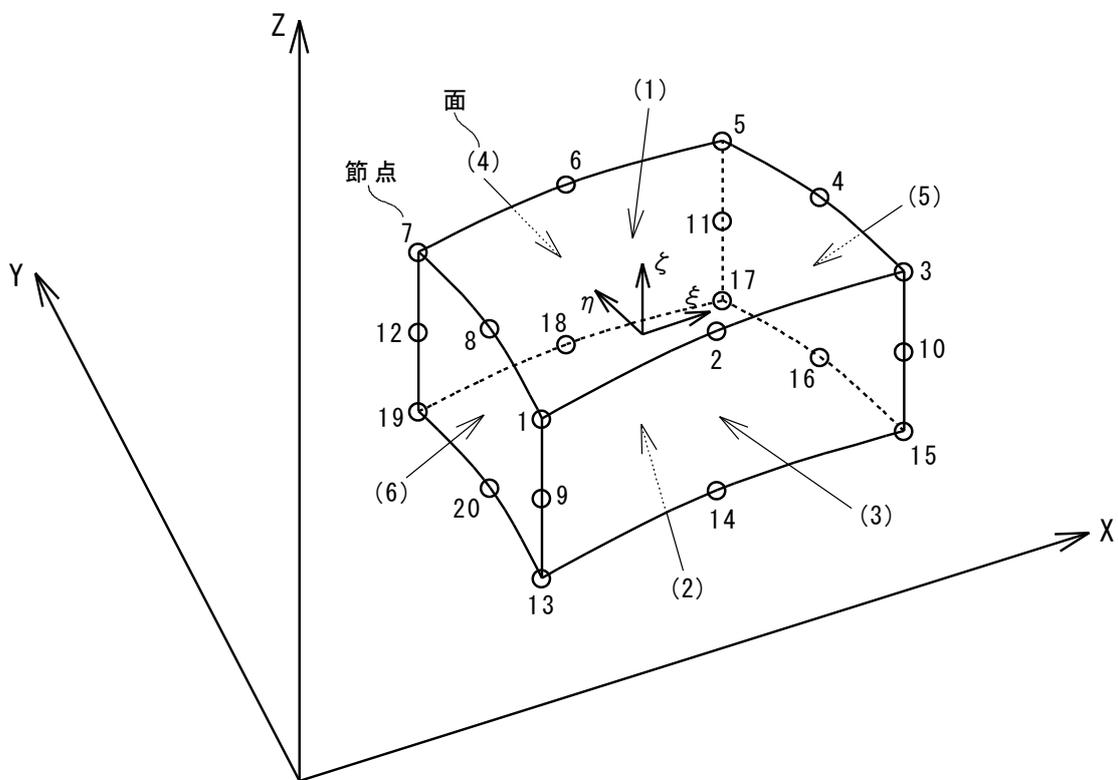


図1-1 六面体20節点要素

図1-1に示す無次元化された局所座標 ξ η ζ を用いて、20節点の形状関数 N_i が定義されます。そして、要素内の任意位置の変数値が、20節点の変数値と形状関数の合成式により表わされます。

1.2 非線形弾性解析

本ソフトでは、ヤング率だけを非線形に変化させます。ただし、ヤング率の物性データを直接与えるのではなく、後述の歪み・応力グラフを設定し、各積分点の相当歪みに応じたヤング率を算出するようにしています。このようにヤング率が相当歪みによって変化するため、解析計算は解が収束するまでの繰り返し計算となります。

注) 初回の計算に使用するヤング率は、「3次元構造解析」の構造データに設定された値を用います。

まず、図1-2に非線形弾性の説明図を示します。同図のように、歪み ε と応力 σ の関係が一直線でないグラフで与えられているとします。そして、ある積分点の相当歪み ε_a が求まったとき、グラフから ε_a に対応する応力 σ_a を求め、その原点からの勾配を次式のように計算してヤング率 E とします。

$$E = \sigma_a / \varepsilon_a \quad (1-1)$$

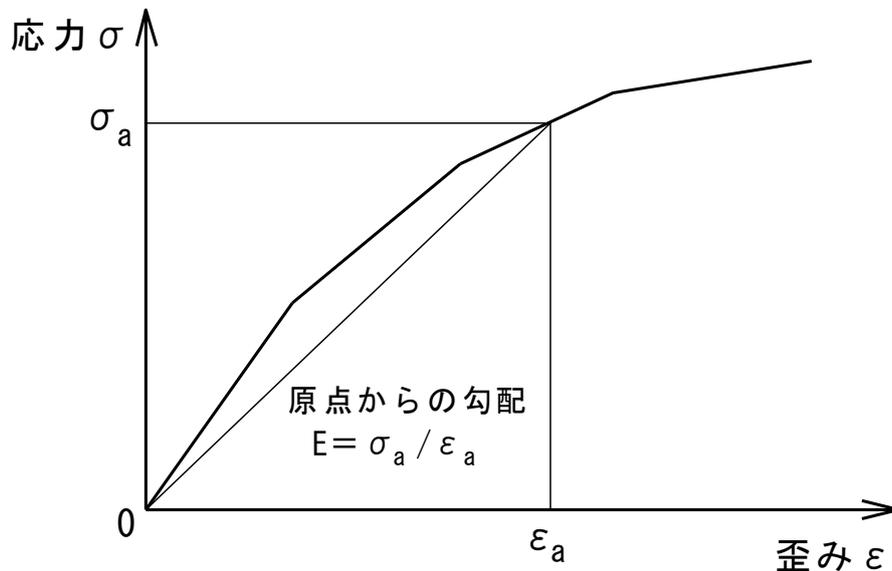


図1-2 非線形弾性の説明図

ここで、相当歪み ε_a は次式で計算します。

$$\varepsilon_a = \sqrt{\frac{2}{9} \left\{ (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + \frac{3}{2} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \right\}} \quad (1-2)$$

最終的に解が収束した後、各節点のMises応力 σ_{Mises} は次式により計算します。

$$\sigma_{Mises} = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right\}} \quad (1-3)$$

1.3 3次元熱応力の解析

構造の温度が変化すると、熱膨張の差によって熱歪みが生じ、熱応力が発生します。有限要素法では、この熱歪みを初期歪みとして扱い、それによって生じる力を節点荷重に換算して作用させます。

まず、3次元構造における初期歪みは次の式で表わされます。

$$\{\varepsilon_0\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \varepsilon_{z0} \\ \gamma_{xy0} \\ \gamma_{yz0} \\ \gamma_{zx0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha T \\ -\alpha T \\ -\alpha T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

ただし、 $\{\varepsilon_0\}$: 初期歪み

α : 熱膨張係数

T : 初期温度に対する温度差。

ここで初期温度とは、歪みのない状態の温度を意味する。

次に、上記の初期歪みによって生じる初期応力は次式で表わされます。

$$\{\sigma_0\} = \begin{bmatrix} \sigma_{x0} \\ \sigma_{y0} \\ \sigma_{z0} \\ \tau_{xy0} \\ \tau_{yz0} \\ \tau_{zx0} \end{bmatrix} = [D] \{\varepsilon_0\}$$

$$= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\alpha T \\ -\alpha T \\ -\alpha T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -a \\ -a \\ -a \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1-5)$$

ただし、 $\{\sigma_0\}$: 初期応力

$[D]$: 弾性マトリックス

$$\begin{aligned}
& E : \text{ヤング率} \\
& \nu : \text{ポアソン比} \\
& a = \frac{E\alpha T}{1-2\nu} \tag{1-6}
\end{aligned}$$

(1-5) 式の初期応力から等価節点荷重は次式で計算できます。

$$\begin{aligned}
\{F_{e0}\} &= - \int [B]^T \{\sigma_0\} dV \\
&= \int \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial X} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial Y} & 0 & \frac{\partial}{\partial Z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial Y} & 0 & \frac{\partial}{\partial X} & \frac{\partial}{\partial Z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial Z} & 0 & \frac{\partial}{\partial Y} & \frac{\partial}{\partial X} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ a \\ a \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} dV \\
&= \int \begin{bmatrix} \frac{\partial a}{\partial X} \\ \frac{\partial a}{\partial Y} \\ \frac{\partial a}{\partial Z} \end{bmatrix} dV \tag{1-7}
\end{aligned}$$

ただし、 $\{F_{e0}\}$: 初期歪みによる要素の荷重ベクトル（各節点のX, Y, Z方向）。

添え字eは要素を示す。

$[B]$: 歪マトリックス。右上付き文字Tは転置を意味する。

dV : 積分体積

従って、(1-7)式による節点荷重を外力として作用させ、その後は通常の構造解析を行います。

また、物体の内部応力は、初期応力分を補正して次式で計算します。

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} + \{\sigma_0\} \tag{1-8}$$

ただし、 $\{\sigma\}$: 応力ベクトル

$\{\varepsilon\}$: 歪みベクトル

第2章 プログラムの機能・構成

[VBプロジェクト名] FEM3NL

本ソフトでは3次元の非線形弾性の構造解析を行ないます。また、熱応力解析と大変形問題も可能です。

本ソフトの立ち上げ画面は図2-1のメニュー画面です。同図のように、基本メニューは「材料データ」、「熱応力条件データ」、「計算」、「後処理」、「終了」の5つです。「材料データ」メニューでは、非線形弾性の材料データを作成します。「熱応力条件データ」メニューでは、使用する構造データファイルを指定し、かつ温度条件を設定したデータを作成します。「計算」メニューでは解析計算を実行し、「後処理」メニューでは計算結果の図を作画します。そして、ソフトを終了させる際は、「終了」をクリックします。

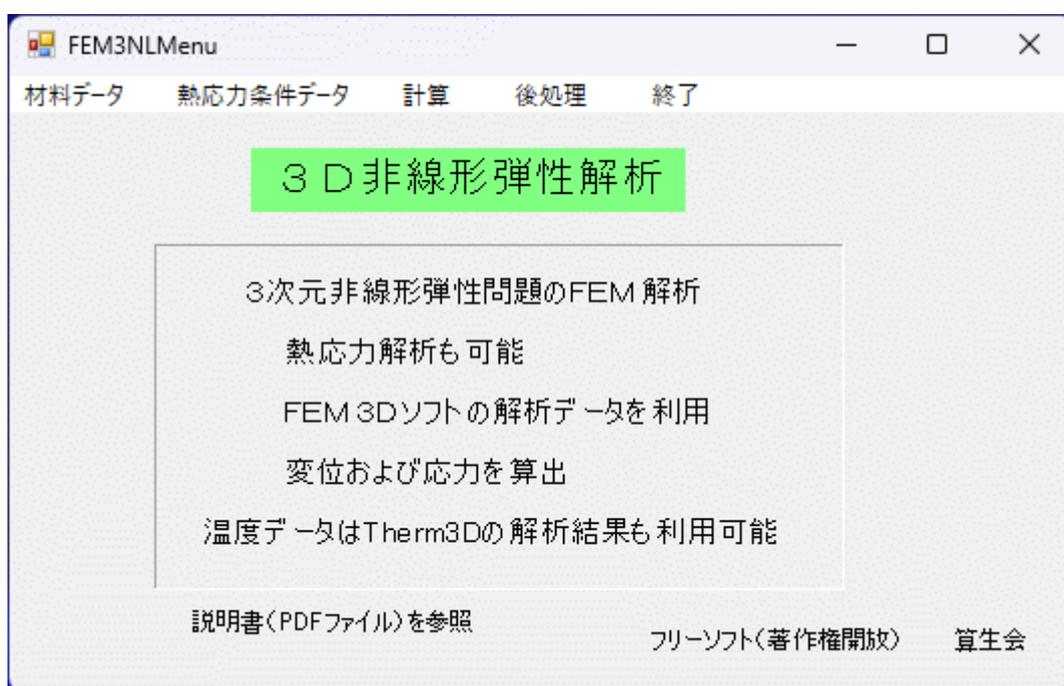


図2-1 「FEM3NL」ソフトのメニュー画面

次に、図2-2にプログラム構成を示します。同図のように、全体を「メニュー」のFEM3NLMenuモジュール*で制御し、その下に「材料データ」、「熱応力条件データ」、「計算」、「後処理」の4つのプログラム群に分かれています。

注) *モジュール名や各フォーム名は、ファイル名と名前を一致させてあります。

データファイルは、「構造データファイル」、「材料データファイル」、「熱応力条件データファイル」、「結果データファイル」の4種類を使用します。「構造データファイル」は、あらかじめ3次元構造解析(FEM3D)で作成しておく必要があります。また、3次元熱伝導解析(Therm3D)の結果データファイルも「熱応力条件データファイル」の温度条件設定に利用できます。その他に、本図には示していませんが、いくつかのプログラム部分で一時記憶ファイル(ファイル拡張子「.tmp」)も使用しています。これらデータ

ファイルはいずれもテキスト形式であり、エディターや表計算ソフトで閲覧・印刷することができます。

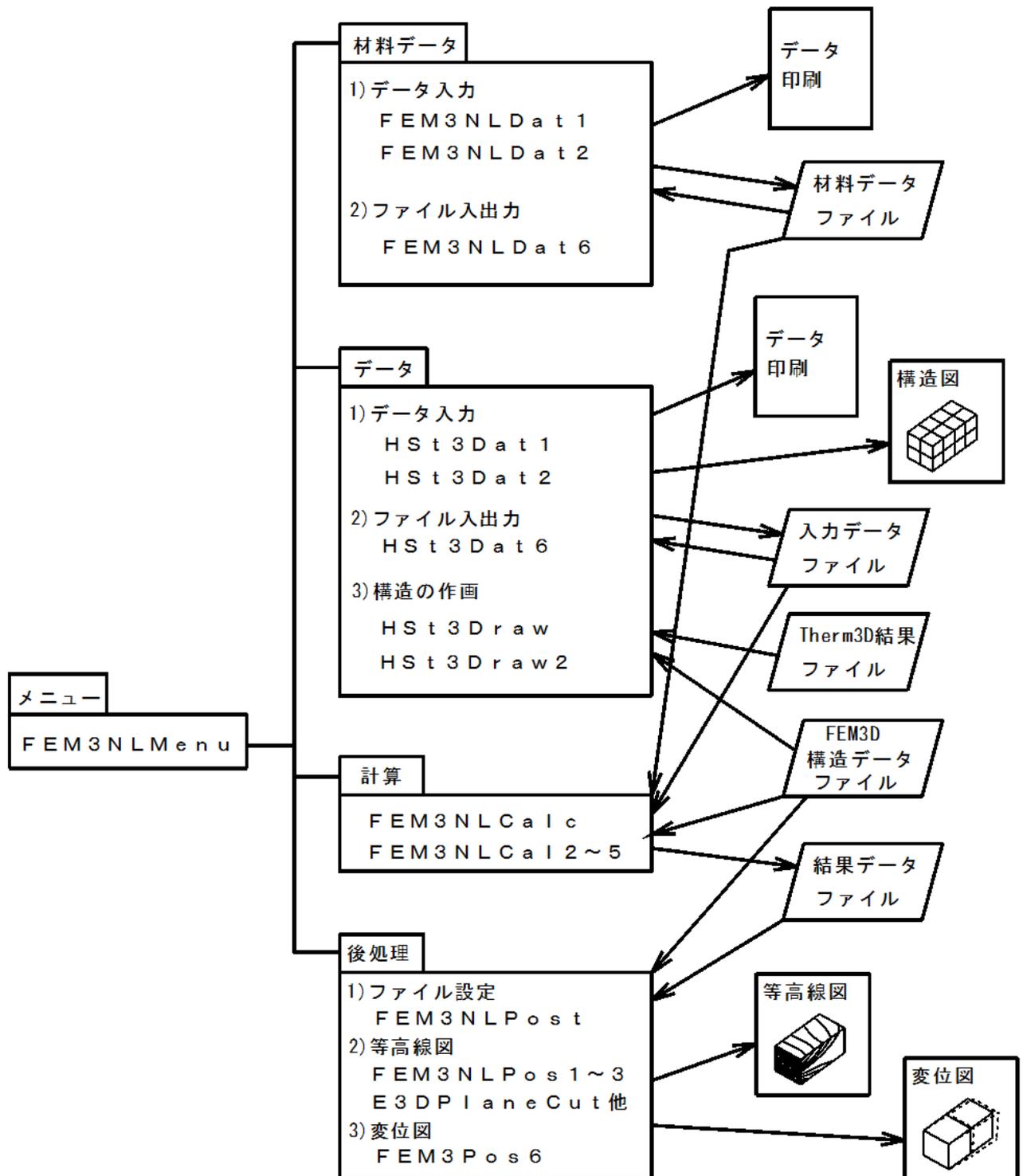


図2-2 「FEM3NL」ソフトのプログラム構成

表2-1に本ソフトのファイルリストを示します。同表で、[材料データ]のFEM3NLDat1と

FEM3NLDat2、および「熱応力条件データ」のHSt3Dat1とHSt3Dat2は、各種データを画面入力するためのものです。特にFEM3NLDat2とHSt3Dat2では、1つのフォームモジュールで、複数種類のデータをグリッド切替えにより入力できるようにしています。

表2-1 「FEM3NL」ソフトのファイルリスト

[全般]

ファイル名	内容
FEM3NLCom. vb	共通変数の宣言とサブルーチンの定義
FEM3NLMenu. vb	メニューの提示・選択

[材料データ]

ファイル名	内容
FEM3NLDat1. vb	データ仕様の入力
FEM3NLDat2. vb	各データの入力
FEM3NLDat6. vb	データファイルの入出力

[熱応力条件データ]

ファイル名	内容
HSt3Dat1. vb	データ仕様の入力
HSt3Dat2. vb	各データの入力
HSt3Dat6. vb	データファイルの入出力
HSt3Draw. vb	構造の作画
HSt3Draw2. vb	構造図でデータの入力

[計算]

ファイル名	内容
FEM3NLCalc. vb	計算に使用するファイルの設定
FEM3NLCal2. vb	計算条件の設定
FEM3NLCal3. vb	解析計算の実行（反復法）
FEM3NLCal4. vb	解析計算の実行（バンドマトリックス法）
FEM3NLCal5. vb	解析計算の実行（スカイライン法）

[後処理]

ファイル名	内容
FEM3NLPost. vb	後処理に使用するファイルの設定
FEM3NLPos1. vb	等高線図作画の変数の設定
FEM3NLPos2. vb	等高線図の仕様設定
FEM3NLPos3. vb	等高線図の作画実行
E3DPlaneCut. vb	3次元構造の面切断の設定（各3次元図に共通）
MouseShift. vb	マウス回転操作の説明（各3次元図に共通）
FEM3Pos6. vb	変位図の作画実行

第3章 データの準備

構造データについては、「3次元構造解析 (FEM3D)」ソフトで準備してください。その際、構造の拘束条件を正しく設定しておく必要があります。

- ◇非線形弾性の初回計算で使用するヤング率は、上記の構造データのものを用品います。従って、構造データのヤング率も適切なものに設定しておいてください。通常、非線形弾性の最大のヤング率にしておけば問題ありません。

3.1 非線形弾性解析のデータ

非線形弾性解析では、さらに非線形弾性の材料データを準備する必要があります。

- ◇材料データの数、構造データのものと一致していなければなりません。

1つの材料について、非線形弾性の材料データの項目を説明します。図3-1に本ソフトで使用する歪み・応力グラフを示します。同図のように、歪み ε の区分数は m (1以上) とします。そして、各区分では、歪み ε と応力 σ が直線関係とし、各区分端の物性値 (ε_i, σ_i) を与えます。

- ◇計算時に、相当歪み ε_a が区分 m をはみ出した場合は区分 m の延長線上になります。

- ◇最左端の物性値 (ε_0, σ_0) は、原則として (0, 0) です。ただし、ユーザー責任で他の値に設定することは可能です。

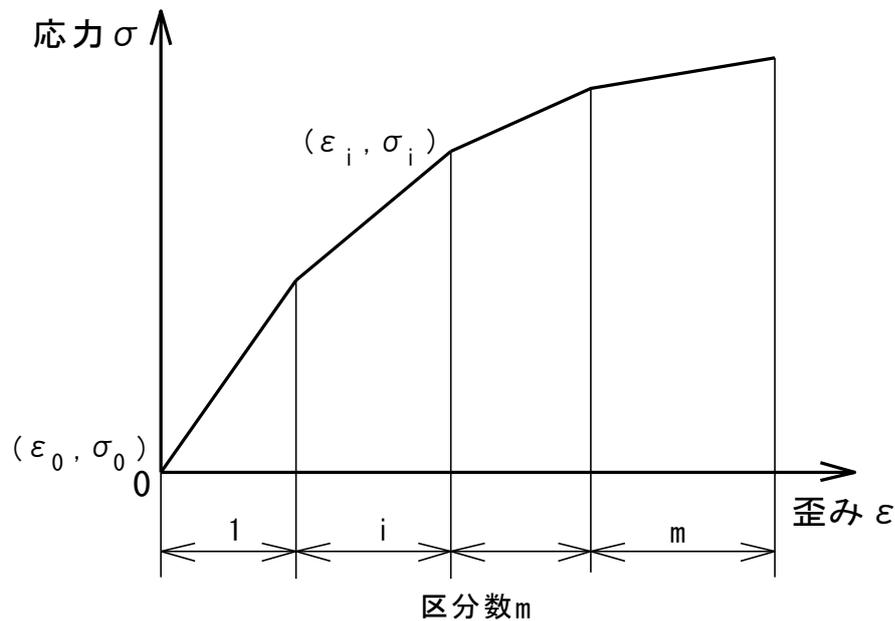
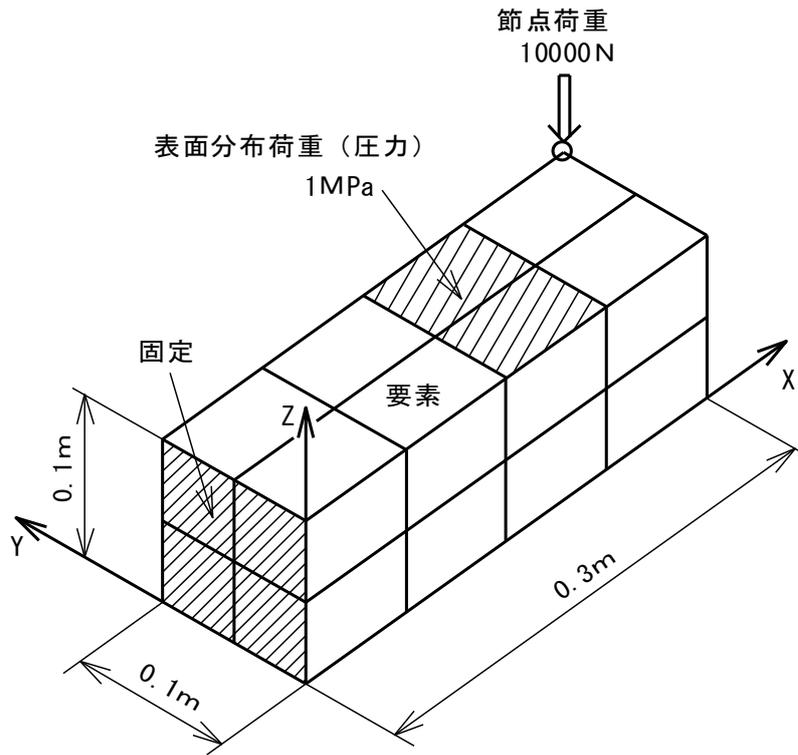


図3-1 非線形弾性の歪み・応力グラフ

以降では、図3-2に示すテスト用構造モデルを例にとって説明します。同図のように、 $0.1\text{m} \times 0.3\text{m}$ の正方形棒で、16要素から成ります。そして、左端の面がX, Y, Z各軸方向に固定され、図示のような節点荷重、表面圧分布荷重、および自重が作用します。同図に示すヤング率は初回計算用のもので、非線形弾性は図3-3の歪み・応力グラフによります。



[材料] ヤング率 (初期) : 2.1×10^5 MPa ポアソン比 : 0.3
 比重量 : 78000 N/m^3 (自重有り)

図3-2 テスト用構造モデル

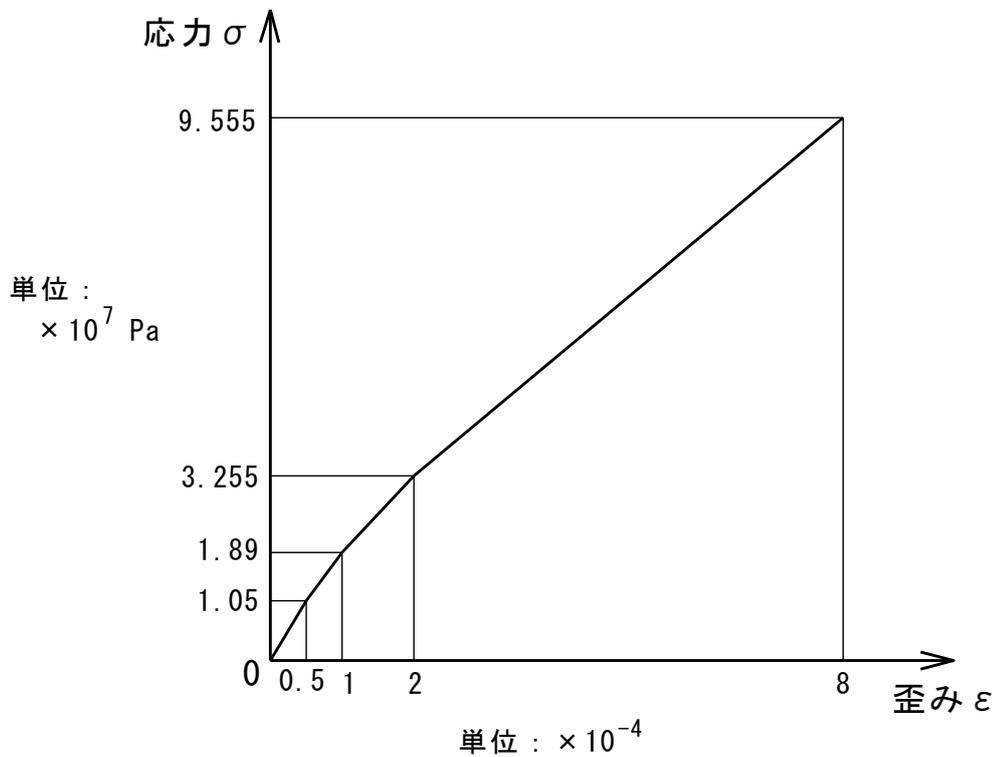


図3-3 テスト用歪み・応力グラフ

3.2 熱応力解析のデータ

熱応力解析では、構造データの外部荷重が同時に負荷されます。従って、外部荷重を掛けたくない場合は、構造データの外部荷重を削除したファイルを使用する必要があります。

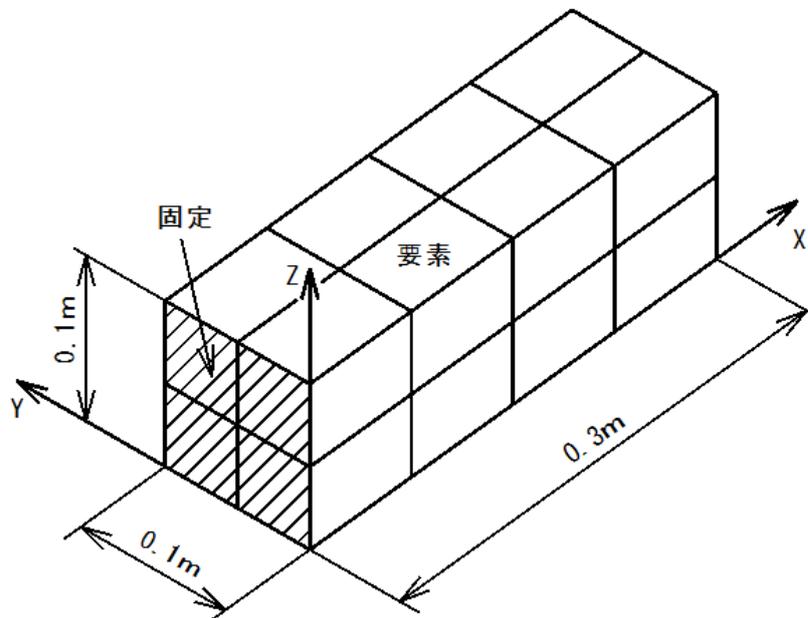
熱応力解析では、さらに表3-1のデータを準備する必要があります。同表の節点温度データについては、全節点を同一温度に設定する場合は問題ありませんが、各節点温度を変える場合はそれぞれの節点温度の値を準備します。また「3次元熱伝導解析 (Therm 3D)」の結果データファイルを直接読み込むこともできます。

表3-1 熱応力解析用に準備するデータ

データ項目	内容	備考
①線膨張係数	使用材料の線膨張係数	単位温度当りの伸び率
②初期節点温度	歪みのない状態の全節点の個別温度	Therm3Dの解析結果も利用可能
③負荷節点温度	熱歪みのある状態の全節点の個別温度	Therm3Dの解析結果も利用可能

注) 節点温度の代わりに、材料毎の一定温度設定も可能。

以降では、図3-4に示すテスト用構造モデルを例に取って説明します。同図は先の図3-2と同じ構造で、熱応力の条件が記載されています。同モデルは、一律の初期節点温度100℃に対して一律に200℃まで上昇させたときに、どのような弾性挙動を示すかを解析する問題です。ただし、図3-2の外部荷重が同時に作用します。



[材料] ヤング率 : 2.1×10^5 MPa ポアソン比 : 0.3
 線膨張係数 : 1.07×10^{-5}

[基準温度] 100℃一律

[節点温度] 200℃一律

図3-4 熱応力解析テストモデル

第4章 「材料データ」処理プログラム

4.1 サブメニュー画面

「メニュー」プログラムにおける「材料データ」のサブメニュー選択画面を図4-1に示します。同図に示すように、5つのサブメニューがあります。全く新たにデータを作成する場合は「データ入力・修正」を選択しますが、既存ファイルを修正して新たなファイルを作成する場合は先に「ファイル読み込み」を行ないます。

また、「オプション」→「バックアップファイル作成」にチェックを入れると、データ読み込み時にバックアップファイル（.bak）が自動作成されます。チェックを外すと作成されなくなります。

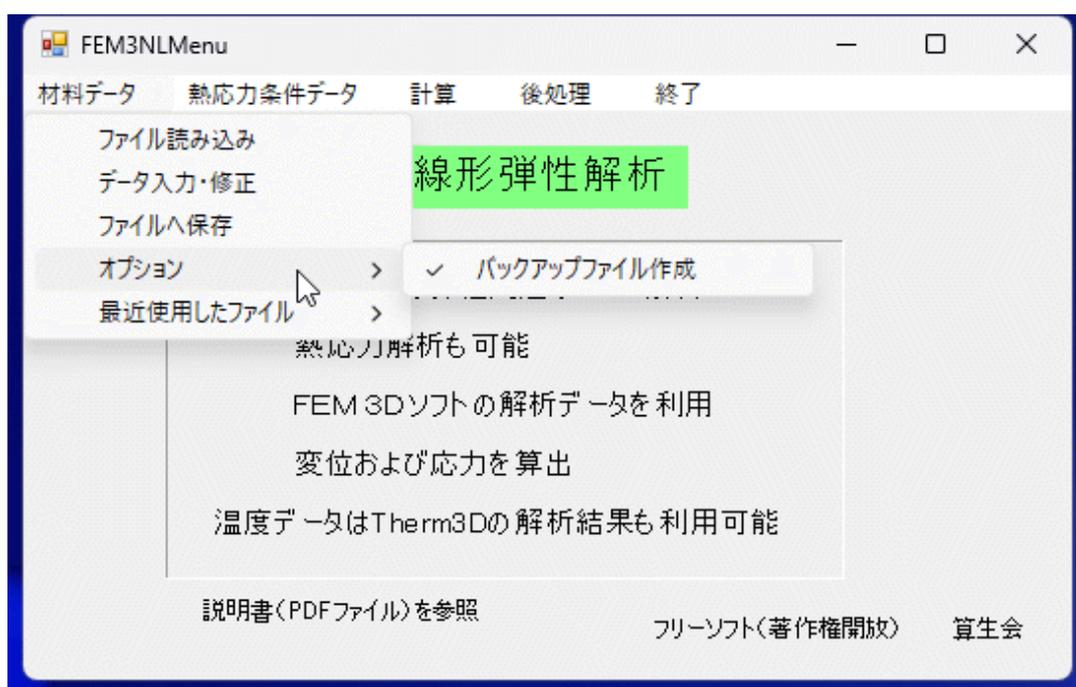


図4-1 「材料データ」サブメニュー画面

4.2 ファイル読み込み

サブメニューの「ファイル読み込み」を選択すると、コマンドダイアログでファイルを開く画面となり、入力データファイルを選定して読み込みます。なお、入力データファイルのデフォルトの拡張子は、「.dat」です。

4.3 データ入力・修正

サブメニューの「データ入力・修正」を選択すると、図4-2のデータ仕様入力画面となります。同図では図3-2、3-3のテストモデルを取り上げており、以降も同じです。本画面の入力について、以下に補足説明します。

- ①タイトルは、任意の題名を入力できます。
- ②次に材料データ数を入力します。

◇材料データ数は、計算で使用する構造データのものと同じでなければなりません。

- ③本画面の「設定」ボタンをクリックすると、各データの入力画面に移ります。

- ④各データ入力が終了すると、本画面に戻るので、そこで「すべて確定」ボタンをクリックすると入力データが確定します。

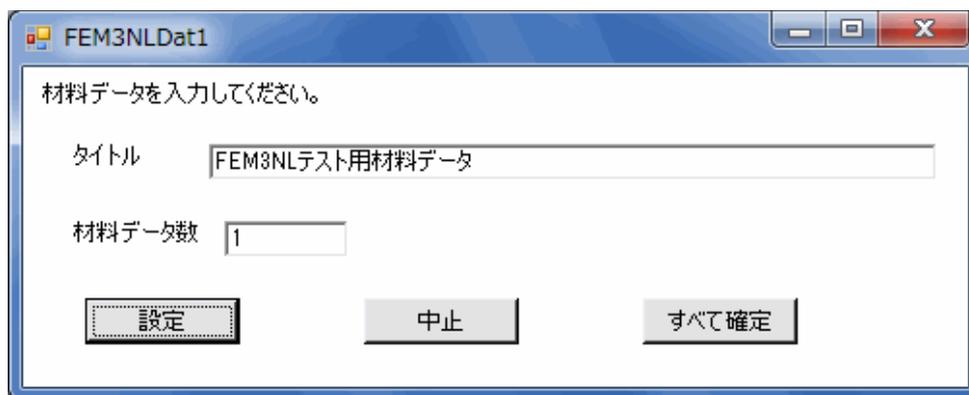


図4-2 データ仕様入力画面

4.4 物性区分数の入力画面

図4-3に物性区分数の入力画面を示します。

- ①各材料毎に物性区分数を入力します。

◇物性区分数は、歪み ε による応力 σ の変化区分数です。そして、各区分において、それらの関係は直線変化となります。

- ②物性区分数を入力し終ったなら、「設定」ボタンをクリックして次の画面に移ります。

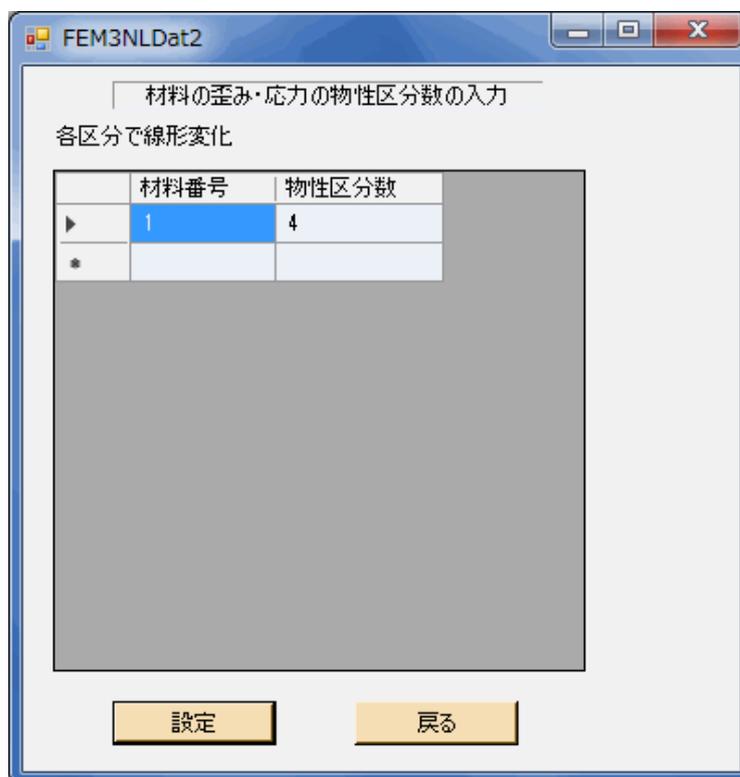


図4-3 物性区分数の入力画面

4.5 歪み・応力データの入力画面

図4-4に歪み・応力データの入力画面を示します。本画面は材料毎に表示されます。

①各区分端番号毎に、歪みと応力を入力します。

◇区分端番号は0から始まります。

◇各区分における歪みと応力の関係は、区分両端の点を結ぶ直線関係となります。

なお、計算時に相当歪み ε_a が最大区間をはみ出した場合は、最大区間を延長した線上になります。

②「コピー」、「貼り付け」ボタンにより、通常のクリップボード利用ができます。

◇「取り消し」ボタンを押すと直前の貼り付けを取り消せます。

③歪み・応力データを入力し終わったなら、「設定」ボタンをクリックして次の画面に移ります。

◇データ数だけの歪み・応力データを入力し終わった場合は、図4-2のデータ仕様入力画面に戻ります。

区分端番号	歪み	応力
0	0	0
1	5E-05	1.05E+07
2	.0001	1.89E+07
3	.0002	3.255E+07
4	.0008	9.555E+07
*		

図4-4 歪み・応力データの入力画面

4.6 ファイルへの保存

サブメニューの「ファイルへの保存」を選択すると、コマンドダイアログでファイルを保存する画面となり、材料データファイルを設定すると、データが書き出されます。

データファイルの拡張子は「.dat」です。これは、3次元構造解析の構造データと同じ拡張子なので、注意してください。もちろん、他のファイル名に変更しても構いません。

新たなファイル名を入力すると新ファイルが作成されます。先に材料データファイルを読み込んである場合に、同ファイルを選定すると上書きとなります。

◇保存ファイルの文字コードはUTF-8です。

◇1行内の複数データは、「,」（コンマ）で区切られます。

図4-5に材料データファイル例を示します。

```
プログラム名, FEM3NL
FEM3NLテスト用材料データ
材料データ数, 1
各材料の物性区分数（材料番号、区分数）
  1, 4
各材料の歪み・応力データ
材料番号, 1
  区分番号、歪み、応力
    0, 0, 0
    1, 5E-05, 1.05E+07
    2, .0001, 1.89E+07
    3, .0002, 3.255E+07
    4, .0008, 9.555E+07
```

図4-5 材料データファイル例

4.7 最近使用したファイルの選択

サブメニュー「最近使用したファイル」のポップアップで、ファイルリストから選択できます。

注) 新版ソフトでファイルが使用されないとリスト表示されません。

第5章 「熱応力条件データ」処理プログラム

5.1 サブメニュー画面

「メニュー」プログラムにおける「熱応力条件データ」のサブメニュー選択画面を図5-1に示します。同図に示すように、5つのサブメニューがあります。全く新たにデータを作成する場合は「データ入力・修正」を選択しますが、既存ファイルを修正して新たなファイルを作成する場合は先に「ファイル読み込み」を行ないます。

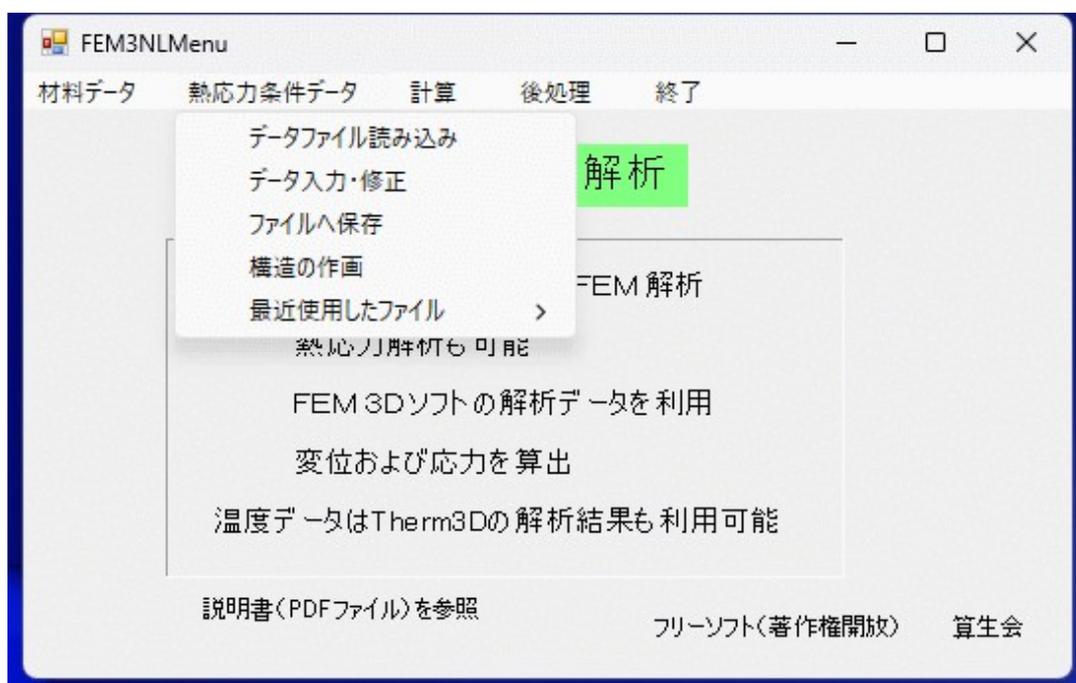


図5-1 「熱応力条件データ」サブメニュー画面

5.2 ファイル読み込み

サブメニューの「ファイル読み込み」を選択すると、コモンダイアログでファイルを開く画面となり、入力データファイルを選定して読み込みます。なお、入力データファイルのデフォルトの拡張子は、「.dat」です。

5.3 データ入力・修正

サブメニューの「データ入力・修正」を選択すると、図5-2のデータ仕様入力画面となります。同図では図3-4のテストモデルを取り上げており、以降も同じです。本画面の入力について、以下に補足説明します。

- ①タイトルは、任意の題名を入力できます。
- ②次に「FEM3D構造ファイル名」を設定します。
 - ◇「FEM3D構造ファイル名」とは、3次元構造解析（FEM3D）による構造データファイルのことで、事前に作成しておきます。
 - ◇「FEM3D構造ファイル名」ボタンをクリックすると、コモンダイアログでファイルを開く画面となり、既存のFEM3Dデータファイルを選択できます。
- ③温度設定方式は、節点か材料かを選択します。

- ◇節点を選択すると、全節点の温度を設定できます。
- ◇材料を選択すると、材料毎に一定温度を設定できます。
- ④本画面の「設定」ボタンをクリックすると、各データの入力画面に移ります。
- ⑤各データ入力終了すると、本画面に戻るため、そこで「すべて確定」ボタンをクリックすると入力データが確定します。

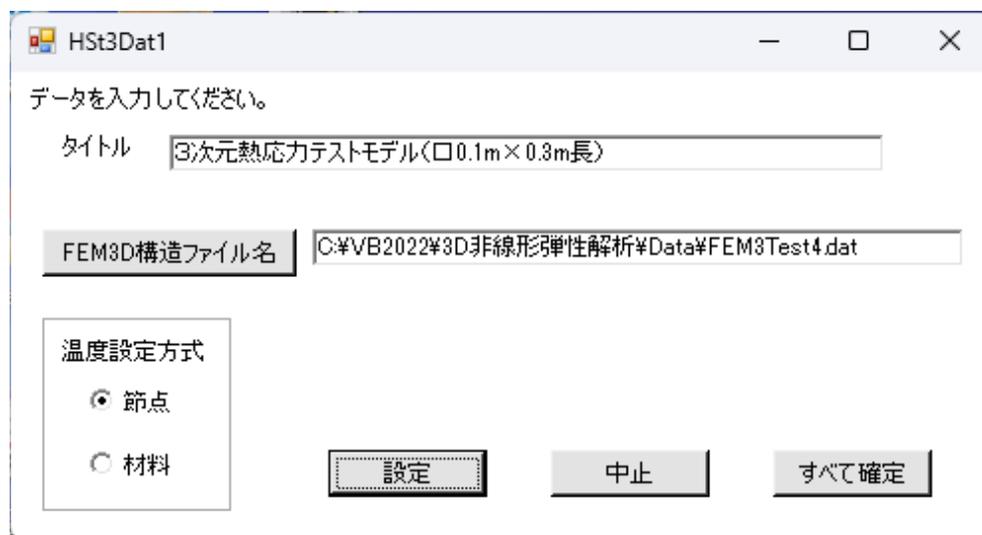


図5-2 データ仕様入力画面

5.4 線膨張係数データ入力画面

図5-3に線膨張係数データ入力画面を示します。

- ①材料の線膨張係数を入力します。
- ②「コピー」、「貼り付け」ボタンにより、通常のクリップボード利用ができます。これは以降の画面でも同様です。
 - ◇「取り消し」ボタンを押すと直前の貼り付けを取り消せます。
- ③データを入力し終ったなら、「設定」ボタンをクリックして次の画面に移ります。

5.5 初期節点温度データ入力画面

温度設定方式で節点を選択した場合は、図5-4の初期節点温度データ入力画面となります。

- ①全節点について、初期温度を入力します。
 - ◇全節点で同一温度を設定する場合は、図5-4で「一括設定」ボタンをクリックします。そうすると、図5-5の一括設定温度の入力画面となりますので、一律の温度を入力し、「OK」ボタンをクリックします。
 - ◇3次元熱伝導解析 (Therm3D) の結果データを利用する場合は、図5-4で「ファイル読み込み」ボタンをクリックします。そうすると、図5-6のコモンダイアログ画面となりますので、Therm3D結果データファイルを選定して開きます。もし非定常解析の結果データであれば、図5-7または図5-8の入力画面が出ます。
 - 図5-7は境界条件のステップ数1の解析結果に対応するもので、同画面で採用する時間メッシュ番号を入力して「OK」ボタンをクリックします。

他方、図5-8はステップ数2以上の解析結果に対応するもので、同画面で採用するサイクル番号を入力して「OK」ボタンをクリックします。そうすると図5-9の入力画面となるので、同画面で採用するステップ番号を入力して「OK」ボタンをクリックします。

- ②すべての節点温度データを入力し終ったなら、「設定」ボタンをクリックして次の負荷節点温度データ入力画面に移ります。



図5-3 線膨張係数データ入力画面

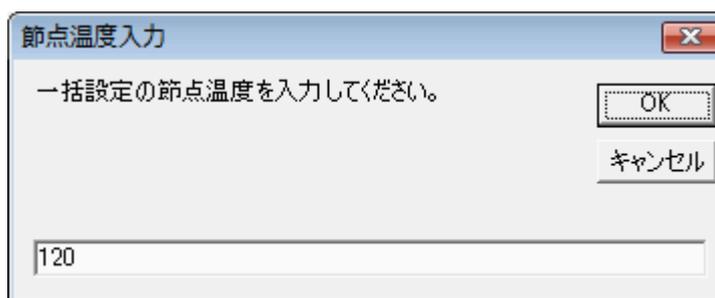


図5-5 一括設定温度の入力画面



図5-4 初期節点温度データ入力画面

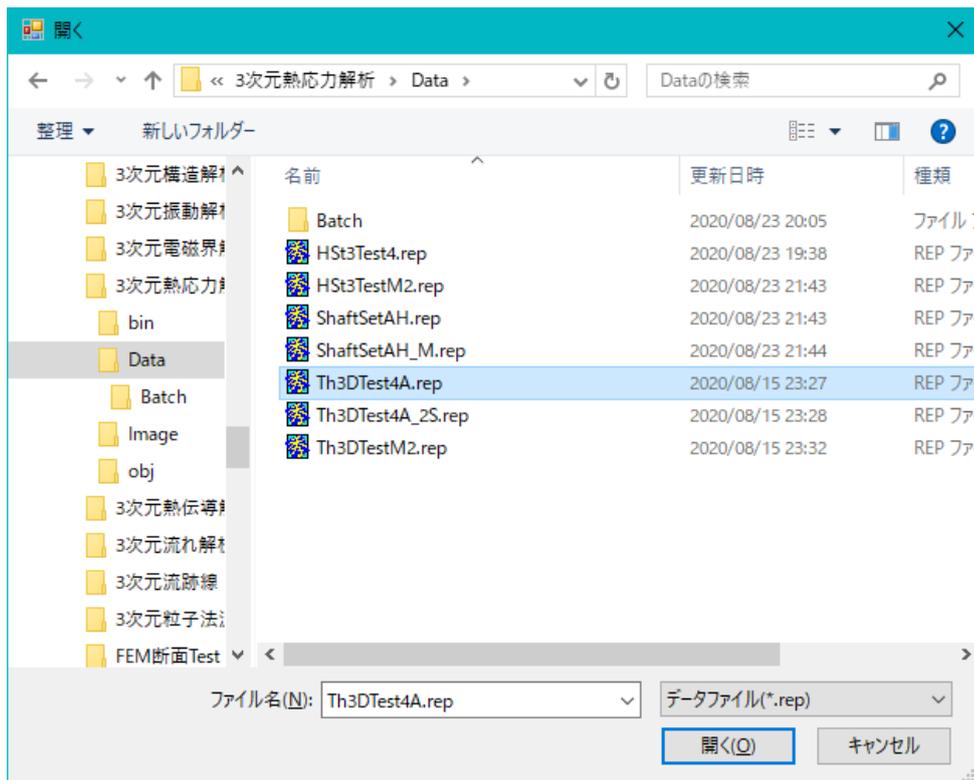


図5-6 Therm3D結果ファイル選択のコモンダイアログ画面

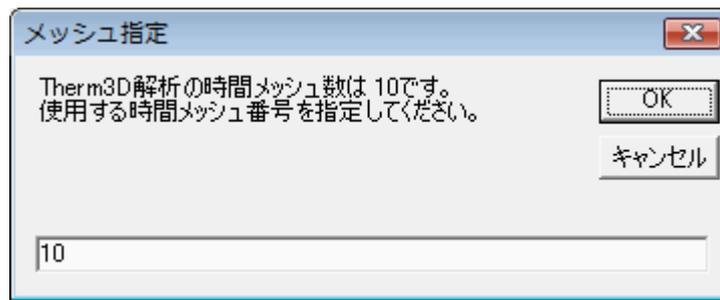


図5-7 非定常温度解析結果の時間メッシュ指定画面（ステップ数1の場合）

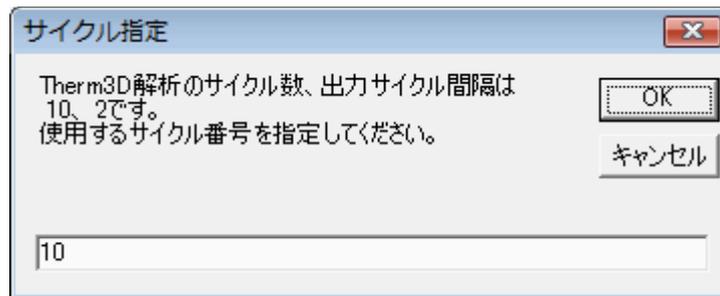


図5-8 非定常温度解析結果のサイクル番号指定画面（ステップ数2以上の場合）

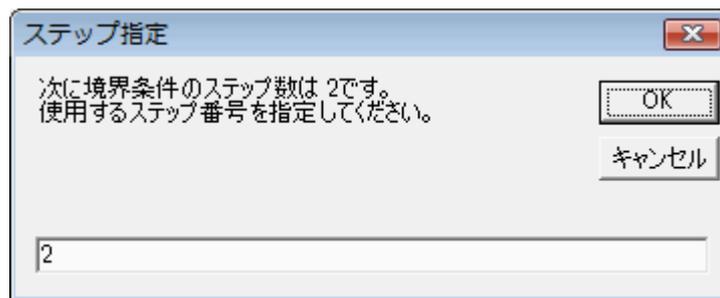


図5-9 非定常温度解析結果のステップ番号指定画面（ステップ数2以上の場合）

5.6 負荷節点温度データ入力画面

図5-10に負荷節点温度データ入力画面を示します。

- ①全節点について、負荷温度を入力します。

◇本画面の操作については、5.5節の初期節点温度データ入力画面と全く同様です。

- ②すべての負荷節点温度データを入力し終わったら、「設定」ボタンをクリックして図4-2のデータ仕様入力画面に戻ります。

5.7 材料温度データ入力画面

温度設定方式で材料を選択した場合は、図5-11の材料温度データ入力画面となります。

- ①材料毎に、初期温度と負荷温度を入力します。

- ②すべての材料温度データを入力し終わったら、「設定」ボタンをクリックして図5-2のデータ仕様入力画面に戻ります。



図5-10 負荷節点温度データ入力画面



図5-11 材料温度データ入力画面

5.8 ファイルへの保存

サブメニューの「ファイルへの保存」を選択すると、コモンダイアログでファイルを保存する画面となり、入力データファイルを設定すると、データが書き出されます。デフォルトのファイル名は、FEM3D構造ファイルのベース名（拡張子を削除した部分）の後に「H」が付加されたもので、拡張子は同じく「.dat」となります。もちろん、他のファイル名に変更しても構いません。

新たなファイル名を入力すると新ファイルが作成されます。先に入力データファイルを読み込んである場合に、同ファイルを選定すると上書きとなります。

図5-12に入力データファイル例を示します。

◇保存ファイルの文字コードはUTF-8です。

◇1行内の複数データは、「,」（コンマ）で区切られます。

```
プログラム名, HeatSt3D
3次元熱応力テストモデル (□0.1m×0.3m長)
[FEM3D構造ファイル], C:¥VB2022¥3D非線形弾性解析¥Data¥FEM3Test4. dat
温度設定方式 (0:節点、1:材料), 0
<材料番号、線膨張係数>
1, 1.07E-05
<節点番号、初期温度、負荷温度>
1, 100, 200
2, 100, 200
3, 100, 200
4, 100, 200
5, 100, 200
6, 100, 200
7, 100, 200
8, 100, 200
9, 100, 200
10, 100, 200
. . . . .
. . . . .
132, 100, 200
133, 100, 200
134, 100, 200
135, 100, 200
136, 100, 200
137, 100, 200
138, 100, 200
139, 100, 200
140, 100, 200
141, 100, 200
```

図5-12 入力データファイル例

5.9 構造の作画

サブメニューの「構造の作画」を選択すると、全体構造の透視図が画面に作画されます。図5-13に本例題の構造作画の画面例を示します。同図は、本画面に移った状態のもので、作画のパラメーターは標準条件になっています。

- 1) 複数材料の場合は、材料別に色分けして表示されます。
- 2) 本画面の上側と左側に、作画の種々のパラメーターを表示してあり、それらを変更することができます。変更した後は、「再描画」ボタンをクリックすると、新しいパラメーター条件による作画画面に変更されます。
- 3) パラメーターの「視点とモデルの距離倍率」は、透視変換の度合を調整するもので、小さくすると中心投影に近づき、大きくすると平行投影に近づきます。
- 4) 「視点の高さ倍率」は、透視の視点の高さを調整するもので、小さくすると視点が下がり、大きくすると上がります。
- 5) 「番号表示の項目」は、「要素番号」、「節点番号」、「面番号」を重複選択できます。
 - ◇上記のいずれかの番号表示を選択した場合に、「番号表示の文字サイズ」が有効になります。
 - ◇面番号は()付きの数字で作画されます(後掲の図4-19参照)。
 - 注) 要素番号は、隠れて見えないことがあります。
- 6) 以上のパラメーターを変更した後、最初の状態に戻すには、「標準条件に設定」ボタンをクリックします。
- 7) 「Shift+マウス」により構造を回転することができます。
 - ◇構造図の任意の場所で、Shiftキーとマウス左ボタンを押したまま、回転したい方向へマウスを移動させ、そこでマウスボタンを離します。そうしますと、回転が実行されます。
 - ◇図5-14にマウスの操作方向と回転方向の関係を示します。同図のように、スクリーンの場所により、Z軸回り、X軸回りの各回転、または構造中心回りの旋回が実施されます。
 - ◇構造図の「説明」ボタンをクリックすると、図5-14と同じ説明図が表示されます。
- 8) 「ホーム」ボタンをクリックすると、初期の回転位置に戻ります。
- 9) 「材料の指定番号」は、作画する材料を選択したい場合に材料番号を入力します。
 - ◇全材料を指定する場合は0を入力します。
 - ◇「-」付きで材料番号を入力すると、その材料だけ除外して作画します。
 - ◇一旦、ある材料番号で作画した後、他の材料番号を選択した場合は、「再描画」ボタンではなく、「全要素描画」ボタンをクリックします。
- 10) 「要素の指定番号」は、作画する要素1個を指定したい場合に要素番号を入力します。
 - ◇要素を指定しない場合は0を入力します。
- 11) 「標準・全画面切替」ボタンをクリックすると、標準画面と全画面を切り換えることができます。また、画面Formの右下コーナー等をマウスドラッグすることにより、標準画面と全画面の間で自由に拡大・縮小できます。
- 12) マウス中ボタン、ホイールにより移動、拡大・縮小を行なうことができます。中ボタン

を押したまま動かせば図形を移動できます。また、ホイールの回転により拡大・縮小ができます。

13) マウสดラッグ矩形により、構造図の一部分を拡大できます。

◇マウสดラッグは、拡大したい部分の左上隅にマウスを移動し、そこでマウスの左ボタンを押し、その左ボタンを押した状態で拡大部分の右下隅までマウスを移動させ、そこで左ボタンを離します。そうしますと、図5-15のようにマウสดラッグ範囲の矩形が表示され、コマンドダイアログで「選択領域を拡大しますか？」と問うてきます。そこで、「はい」を選択すると、選択領域が拡大されて表示されます。

◇上記の選択領域に関しては、要素全体（全節点）が選択領域に入っている要素だけがすべて拡大の対象となります。

◇拡大操作を行なった後、元の全体構造図に戻りたい場合は、「全要素描画」ボタンをクリックします。

◇図5-15の選択領域を拡大した後、番号表示の項目をすべて選択して「再描画」した画面を図5-16に示します。

14) 「等温線図の区分」は、「なし」、「初期温度」、「負荷温度」のいずれかを選択できます。選択後に「再描画」ボタンを押すと画面に反映されます。

◇図5-17と図5-18に「初期温度」と「負荷温度」を選択した場合の等温線図を示します。

◇等温線図はカラーフィルで表示され、右欄には10分割の各等温線における変数値も明示してあります。

15) 任意の要素面を右クリックすると、図5-19のように当該要素面の要素番号・節点番号・面番号が表示されます。

◇ESCキーを押すと上記の番号表示が解除されます。

16) 「データ設定モード」を選択して、任意の要素面を右クリックすると図5-20のように温度入力画面が出て、データ入力・変更を実施できます。同画面で画面で「設定」ボタンをクリックすると、データ変更が実施されます。

◇温度設定が節点の場合は、同要素面の8節点の温度データを入力できます。

◇温度設定が材料の場合は、同要素の材料番号の温度データを入力できますが、同じ材料番号の全要素に適用されますので注意してください。

17) 繰り返して描画を実施した場合、「前の描画」ボタンをクリックすると1つずつ前の描画にさかのぼることができます。

◇さかのぼれる描画の数は最大8つです。

◇回転操作があっても無視され、初期の回転位置で描画されます。

18) 「面切断設定」ボタンをクリックすると、図5-21の面切断設定の画面に移り、面切断の仕方を設定できます。この面切断とは、座標軸に直角な平面で構造を切断し、2分割されたいずれかの構造図を描くものです。図5-21の画面では次のように操作します。

a) 座標軸としてX、Y、Zのいずれかを選択し、その座標値と許容誤差を入力します。

b) さらに、その平面の正側か負側かを選択します。

c) 「設定」ボタンをクリックすると面分割された構造部分が選択されて、構造図に戻

ります。

19) 「Ctrlキー+マウス」で矩形ドラッグすると、図5-22のように一括設定の温度入力画面が出て、データ入力・変更を実施できます。同画面で画面で「設定」ボタンをクリックすると、データ変更が実施されます。なお、「全節点一括設定」ボタンは、温度設定が材料の場合は表示されません。

◇温度設定が節点の場合は、節点が矩形内に入っていなければなりません。また、「全節点一括設定」ボタンをクリックすると、全節点に対してデータ変更が実施されます。

◇温度設定が材料の場合は、要素が矩形内に入っていなければなりません。なお、同じ材料番号の全要素に適用されますので注意してください。

20) 本画面で「コピー印刷」ボタンをクリックすると、プリンターで画面コピーを印刷できます。

◇「通常画面」の作画が印刷されます。

21) 本画面を終了するには、「中止」ボタンをクリックします。

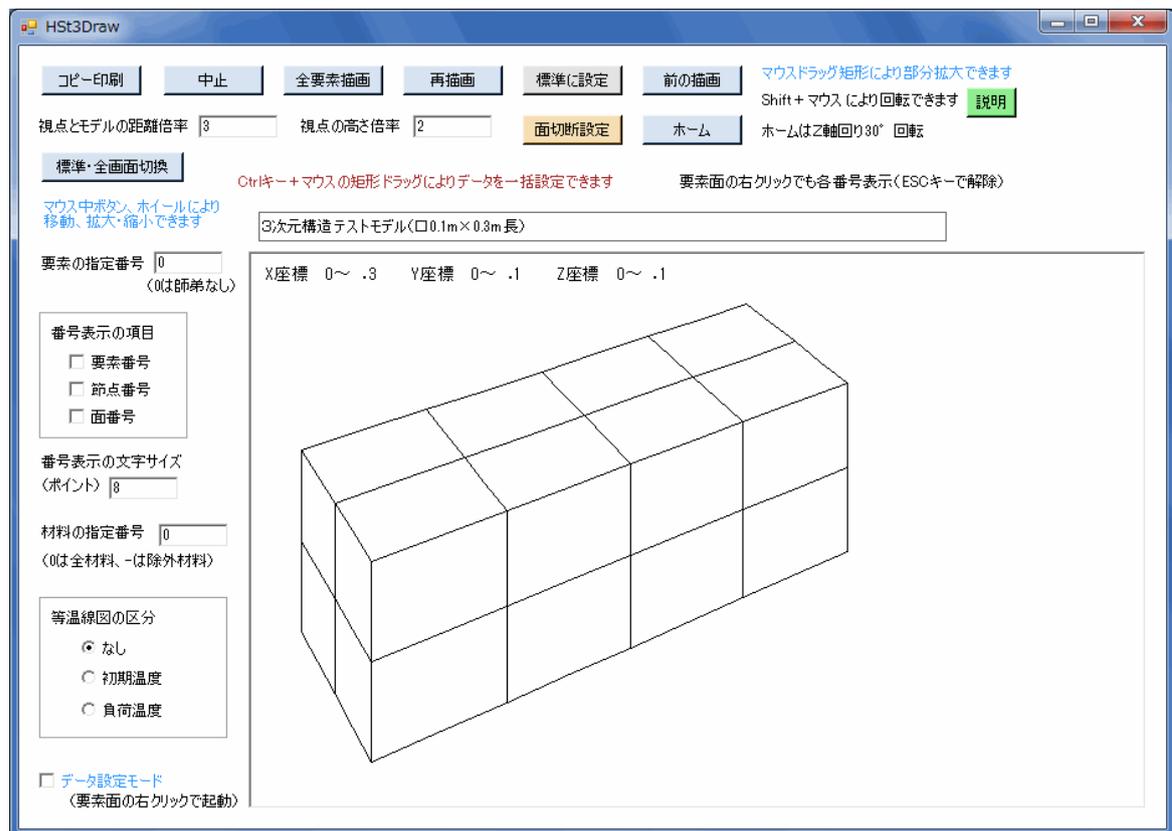


図5-13 構造作画の画面例

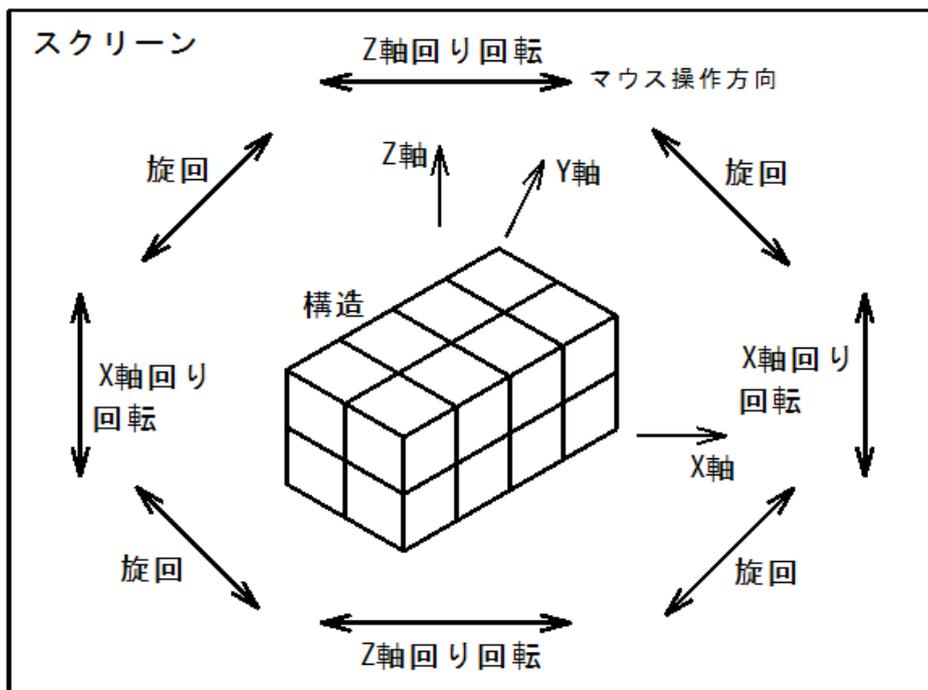


図5-14 マウスの移動方向と回転方向との関係 (Shiftキー併用)

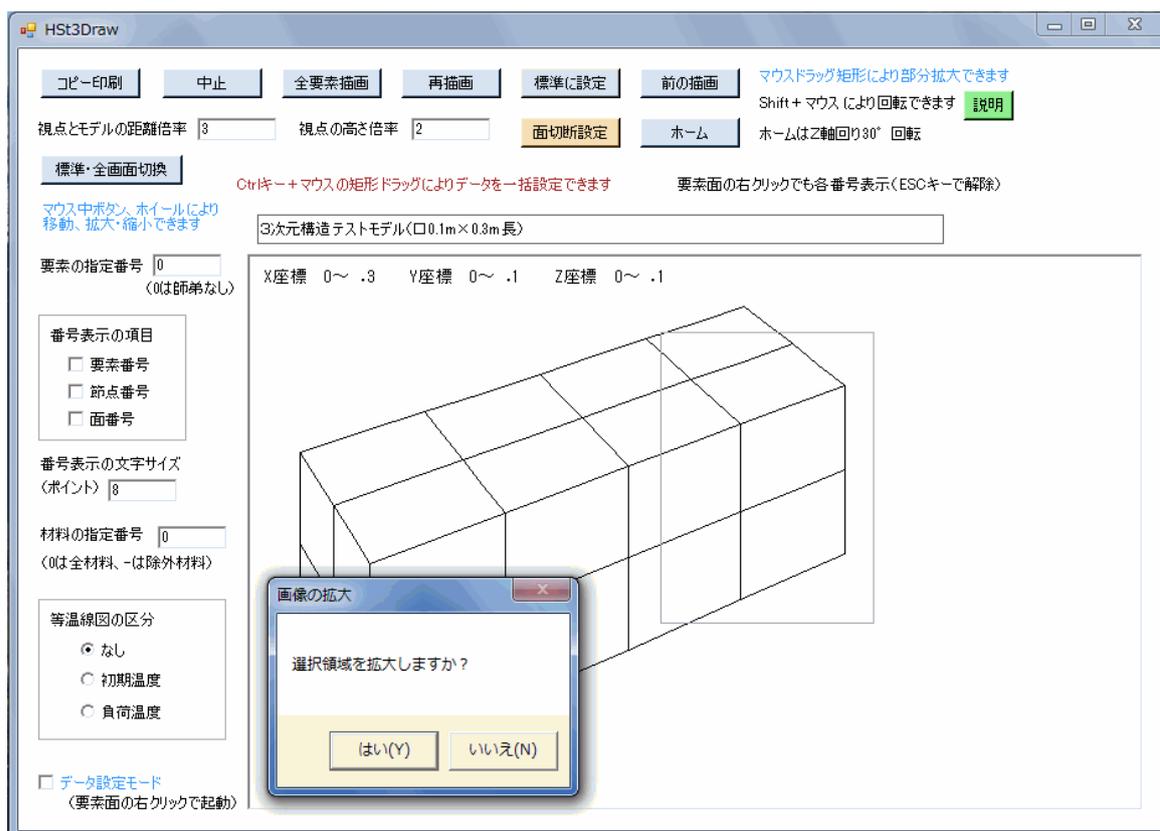


図5-15 構造作画における拡大領域選択例

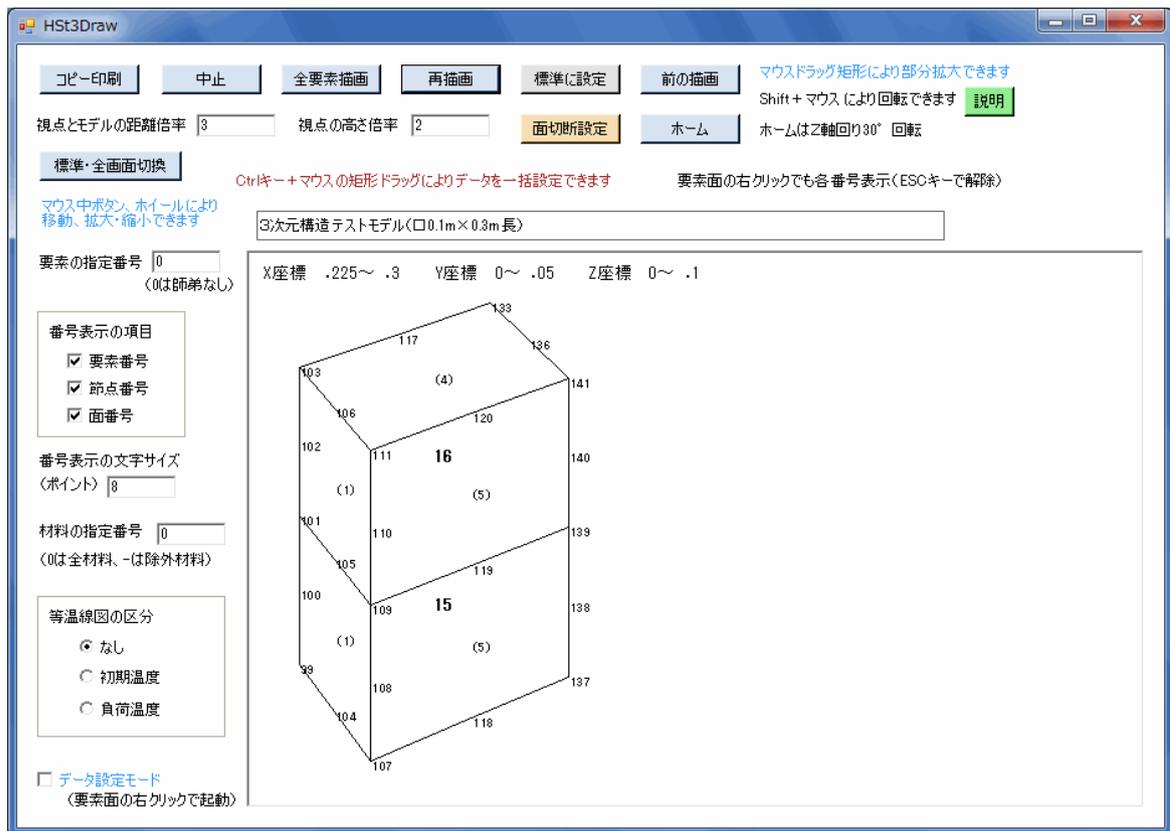


図5-16 構造作画の番号表示有りの部分拡大例

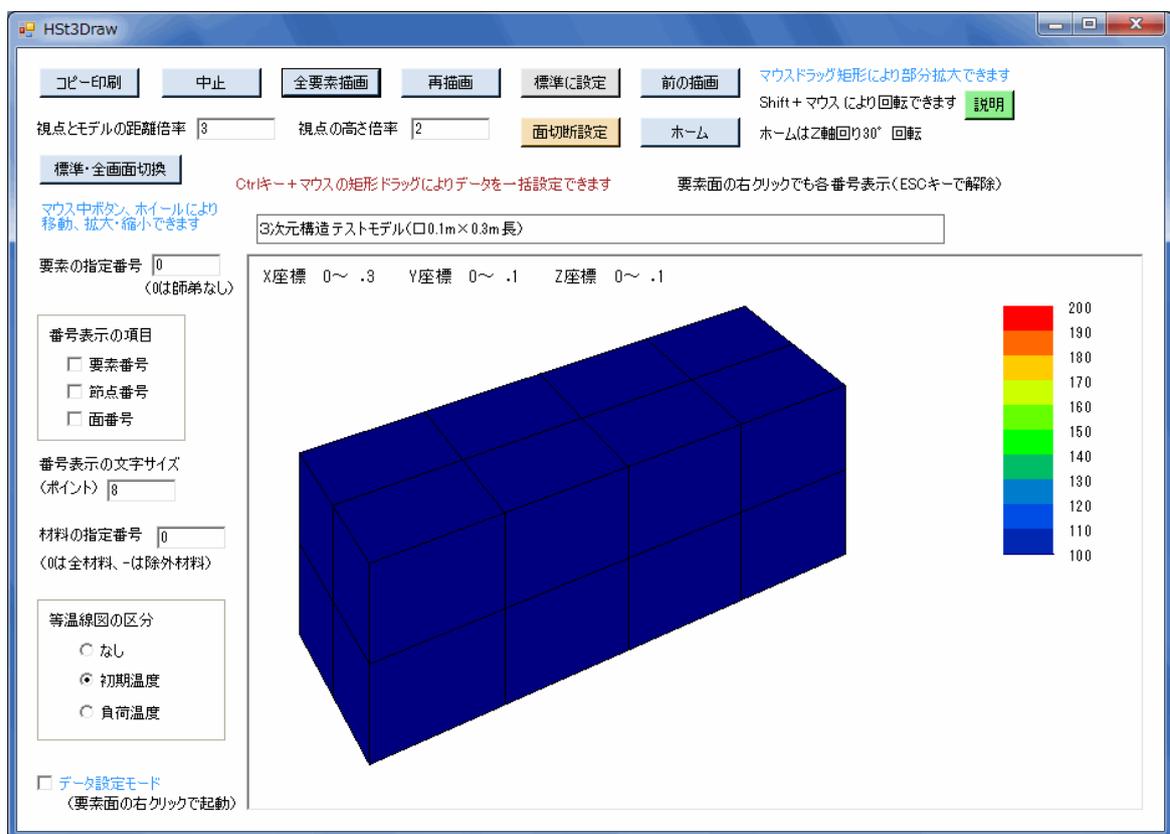


図5-17 構造作画の初期温度の等温線図例

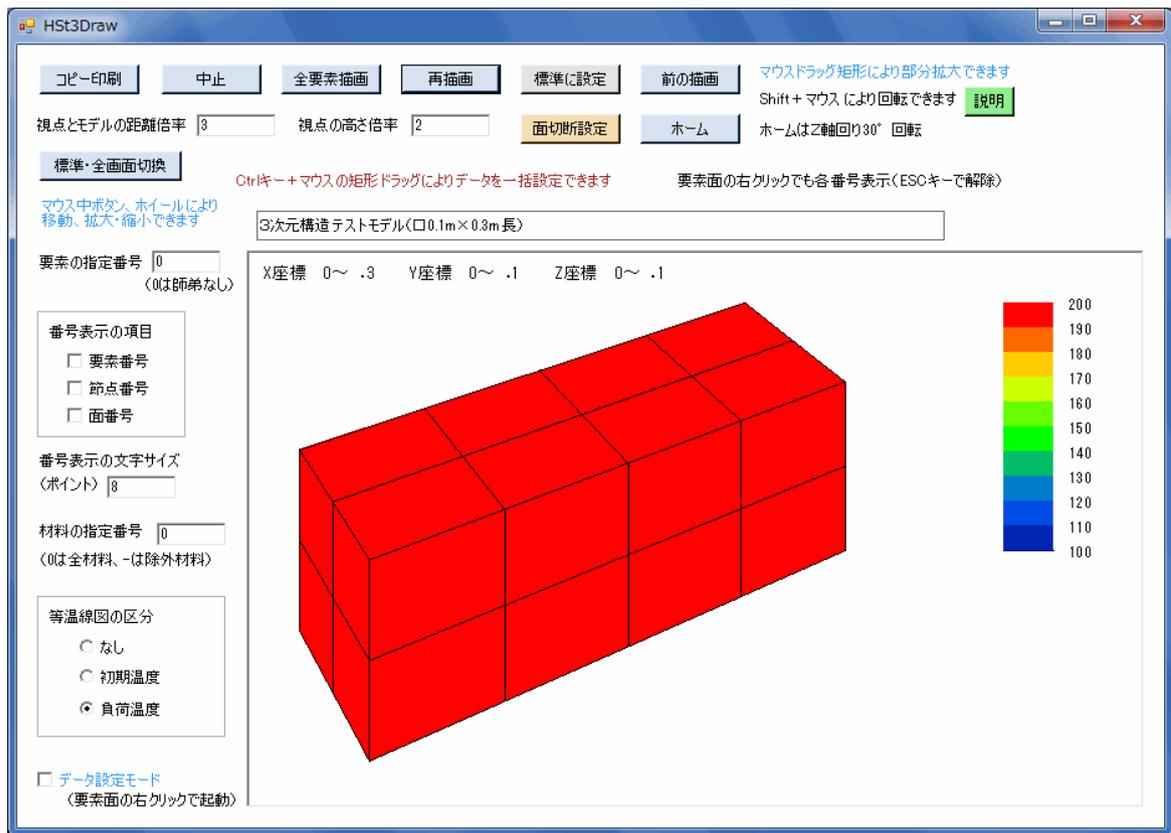


図5-18 構造作画の負荷温度の等温線図例

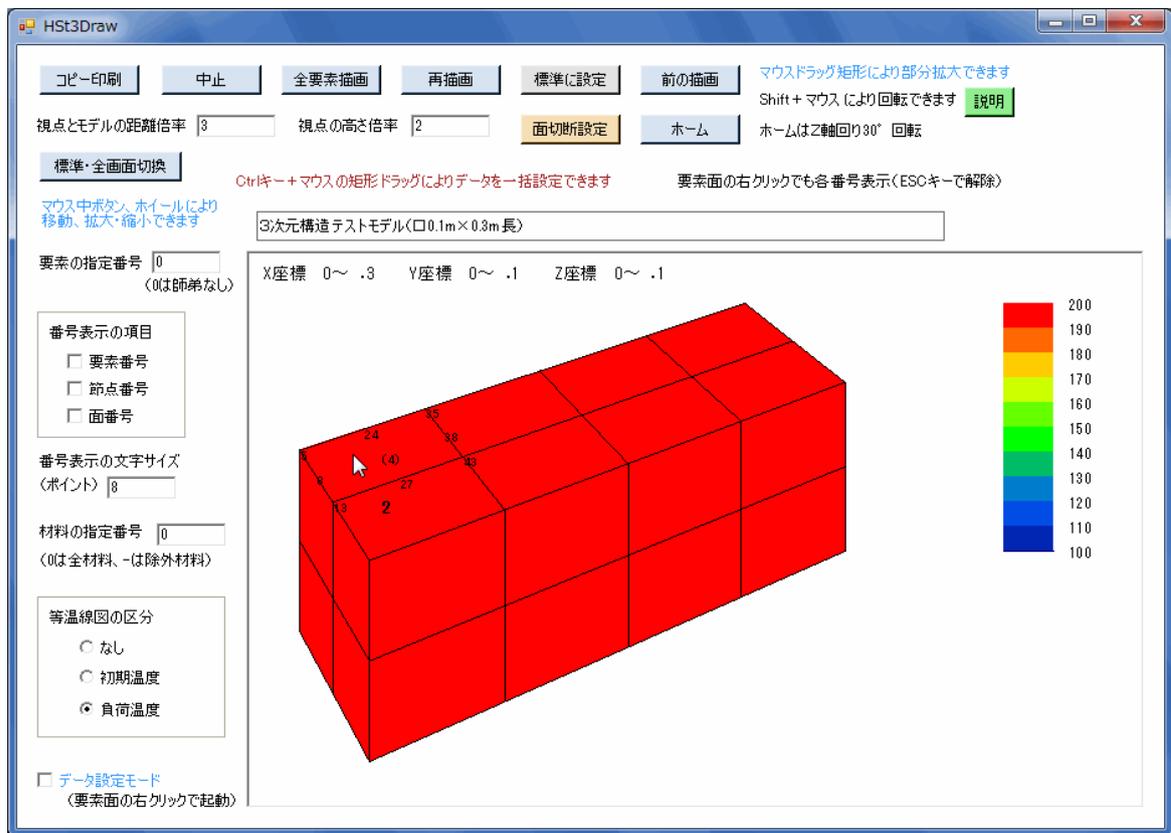


図5-19 構造作画における要素面の右クリック画面例

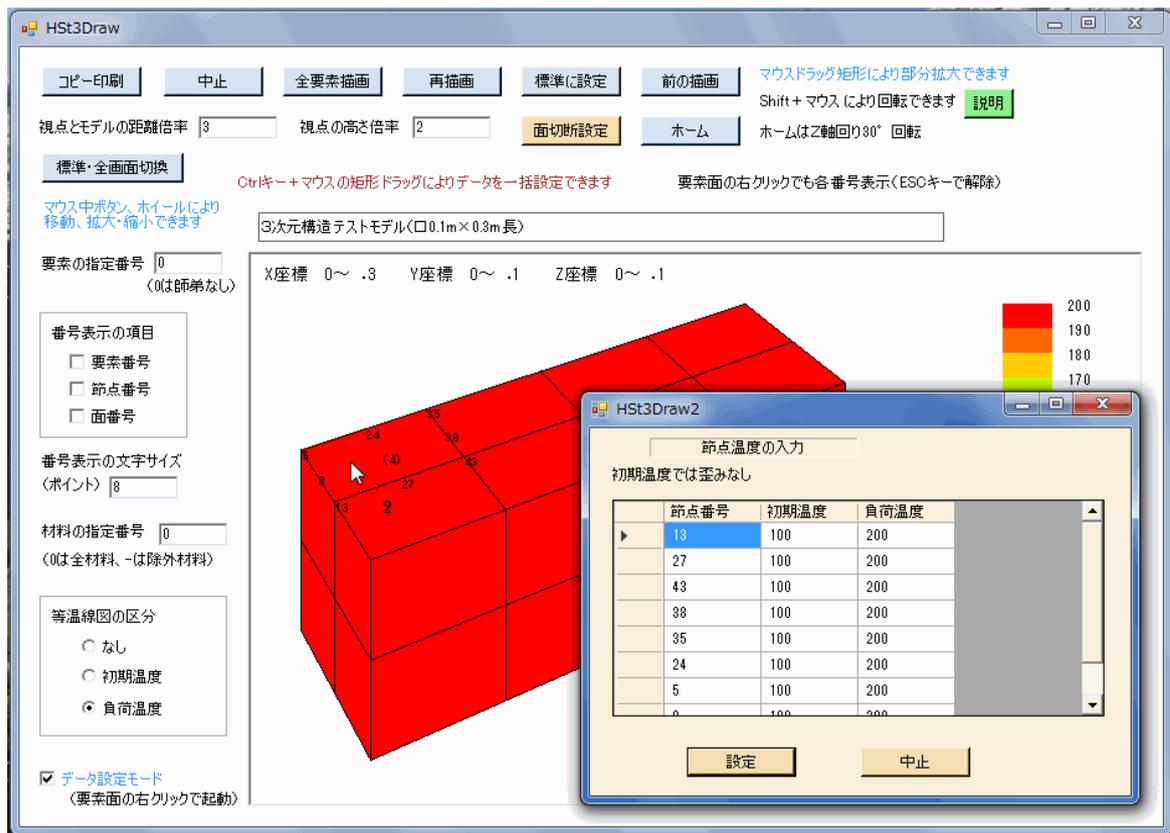


図5-20 構造作画のデータ設定モードにおける温度入力画面

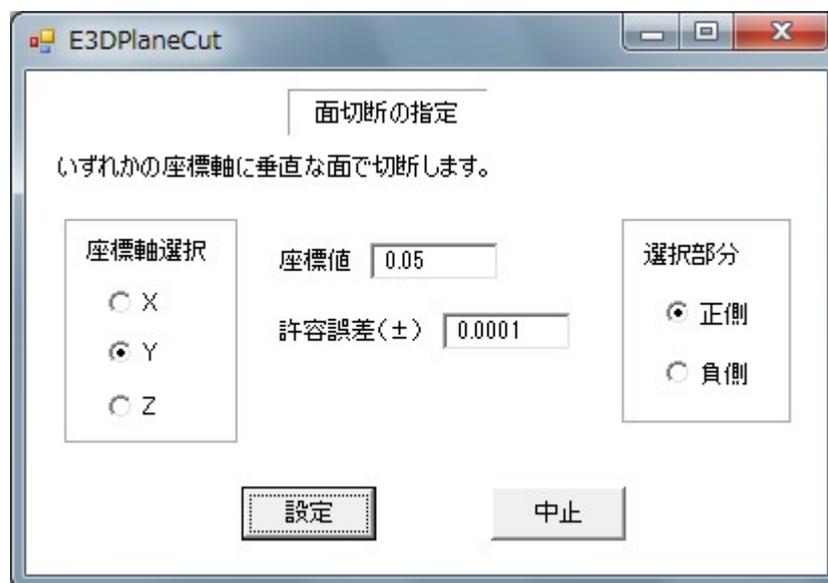


図5-21 面切断設定の画面

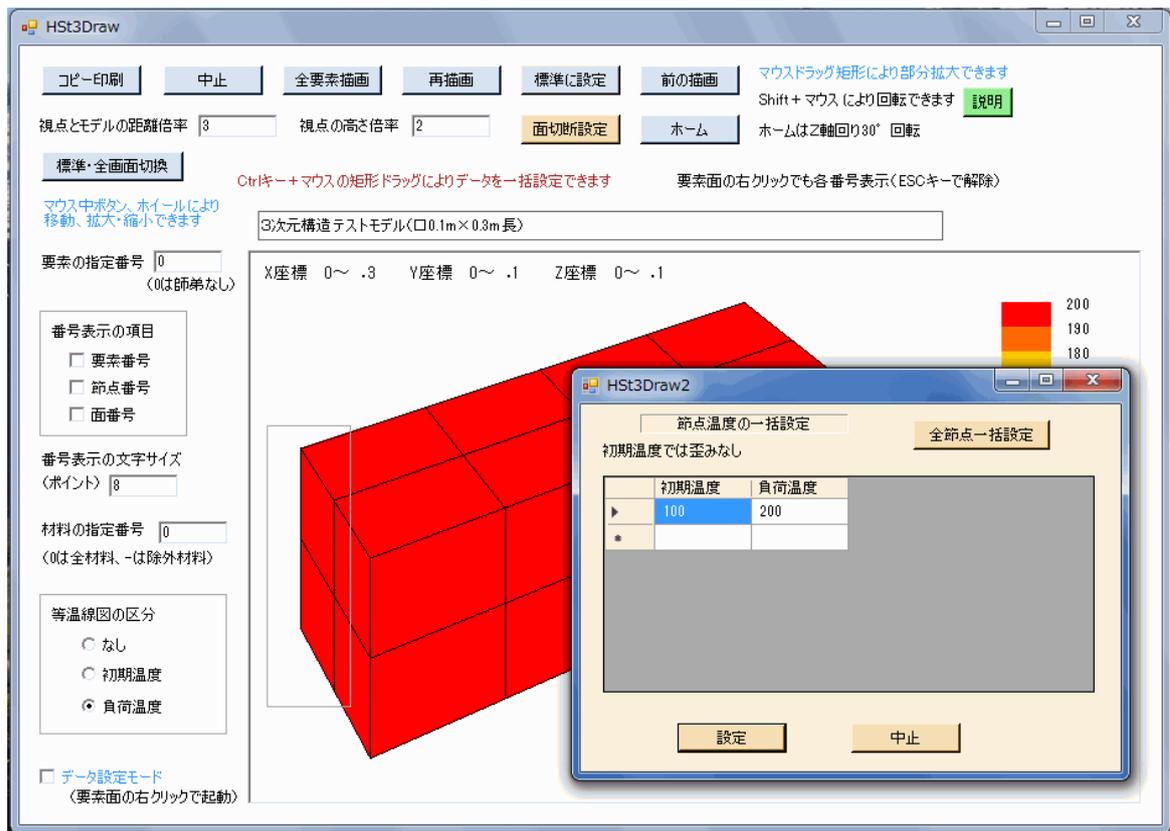


図5-22 構造作画の「Ctrlキー+マウス」ドラッグ矩形による一括設定の温度入力画面

5.10 最近使用したファイルの選択

サブメニュー「最近使用したファイル」のポップアップで、ファイルリストから選択できます。

注) 新版ソフトでファイルが使用されないとリスト表示されません。

第6章 「計算」プログラム

6.1 サブメニュー画面

「メニュー」プログラムにおける「計算」のサブメニュー画面を図6-1に示します。サブメニューの「解析計算の実行」をクリックすると、次の「計算」ファイル設定画面に移ります。

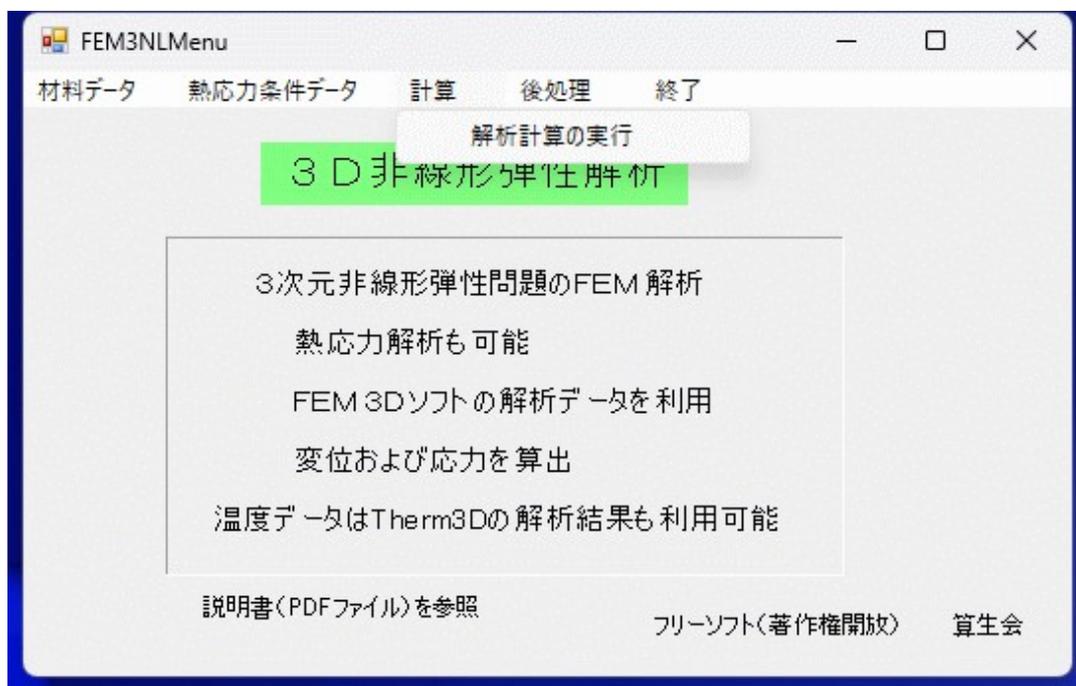


図6-1 「計算」サブメニュー画面

6.2 「計算」ファイル設定

図6-2に「計算」ファイル設定画面を示します。

- ①「FEM3Dファイル指定」ボタンをクリックすると、コモンダイアログで構造データファイルを選定できます。そして、再び「計算」ファイル設定画面に戻ると、「FEM3Dファイル指定」のテキストボックスには選定済み入力ファイル名が、また「出力ファイル指定」の方には入力ファイル名の拡張子を「.rep」に変更したファイル名が表示されます。もし、他のファイル名に変更したい場合は、テキストボックスで修正できます。
- ②同様に、「材料ファイル指定」ボタンをクリックして、材料データファイルを選定できます。
- ③「熱応力の有無」で「有り」を選択すると、図6-3の画面になります。
 - ◇「熱応力条件ファイル指定」には、末尾が「H.dat」のファイル名が表示されます。
 - ◇「出力ファイル指定」には末尾が「NLH.rep」のファイル名が表示されます。
- ④本画面で「設定」ボタンをクリックすると、次の計算条件入力画面に移ります。



図6-2 「計算」ファイル設定画面

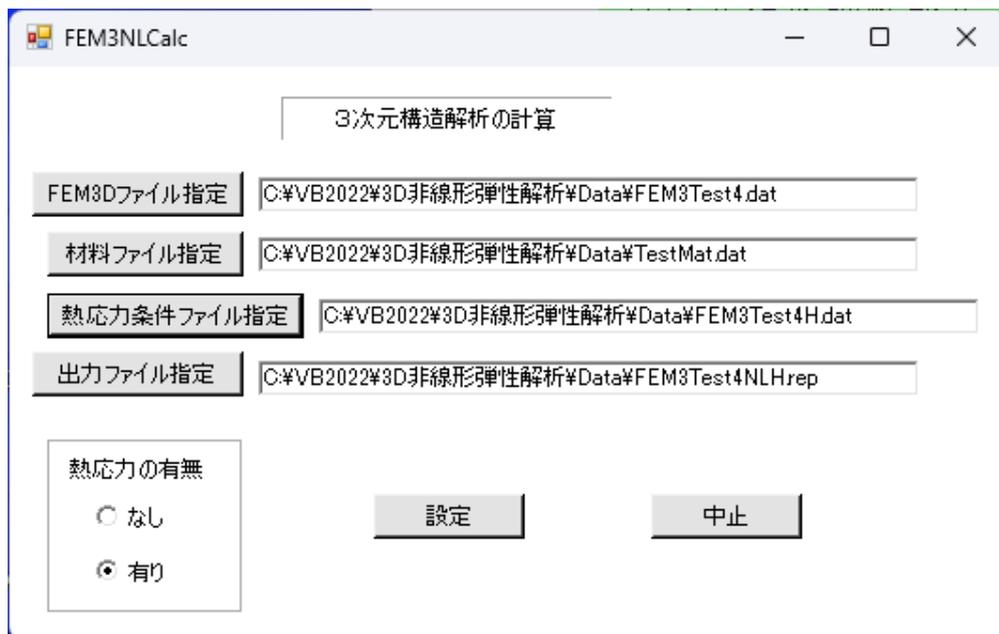


図6-3 「計算」ファイル設定画面（熱応力有り）

6.3 計算条件入力画面

図6-4に計算条件入力画面を示します。

①最大繰返し計算回数と収束誤差率を入力します。

- ◇最大繰返し計算回数は、収束のための繰返し計算の最大回数を設定するもので、デフォルトは20になっています。
- ◇収束基準誤差率は、上記の繰返し計算を終了させるための誤差基準です。基準誤差率とは、各回の繰返し計算において、全節点の変位の最大変化量を最大変位で割ったものです。収束基準誤差率はデフォルトで0.005になっています。
- ◇最大繰返し計算回数や収束基準誤差率は、必要に応じて変更してください。なお、

収束基準誤差率を小さくすると、繰返し計算回数が増えます。

②変形区分で「小変形」か「大変形」を選択できます。

◇通常は「小変形」のままで問題ありません。「大変形」を選択する必要があるのは、長柱の座屈問題のように、変形後の要素形状変化が無視できない場合です。

◇「大変形」の解析計算で、要素積分が負となるエラーが発生したり、収束しないことがあります。その原因は荷重が大きくて変形が大き過ぎるからであり、荷重を減らして再計算してください。

③ソルバー選択で、「反復法（前処理なし）」、「反復法（前処理有り）」、「バンドマトリックス法」、「スカイライン法」のいずれかを選択します。

◇解析種別および構造モデルの規模に応じてソルバーを選択します。その目安を表6-1に示します。

◇「反復法」は大規模マトリックス対応の高速ソルバーです。その「前処理なし」は主配列が1個で使用メモリー容量が最も少なく済みます。「前処理有り」では主配列が2個になり、前処理時間もかかりますが、収束の繰返し計算回数が減少します。

注) 「反復法」は繰返し計算で収束させる解法のため、FEM行列がよい場合に収束しないことがあります。

◇「バンドマトリックス法」は節点数の約3乗で計算時間が増えるため、大規模マトリックスには不向きです。しかし、1変数ずつ掃き出し計算を行なうので、確実に解を求めることができます。

また、FEM行列が必要に応じて分割されます。それにより、大規模構造のメモリー不足を解決できます。

◇「スカイライン法」も確実に解を求めることができます。使用メモリー容量は、反復法が最も少なく、次にスカイライン法が少なく、バンドマトリックス法（分割計算なし）が最も多くなります。

表6-1 ソルバー種類選択の目安

ソルバーの種類		構造の規模		固定境界条件	
		大	中以下	通常	周囲固定
反復法	前処理なし	◎	○	○	×
	前処理有り	◎	○	○	×
バンドマトリックス法	分割計算なし	△	○	○	○
	分割計算有り	□	△	○	○
スカイライン法		○	◎	○	○

注) ◎：推奨 ○：可 △：欠点有り ×：不可（非収束）

□：メモリー(RAM)不足の対策

反復法 1) 対称行列用のCG(Conjugate Gradient)法で、前処理はIC(Incomplete Cholesky)法。

- 2) 対角スケーリングは前処理有無のいずれの場合でも実施。
- 3) 前処理なしの場合は主配列が1個で、使用メモリー容量が最小。
- 4) 前処理有りの場合は主配列が2個で、繰り返し計算の収束性が向上。

④本画面で「設定」ボタンをクリックすると、計算が開始されます。

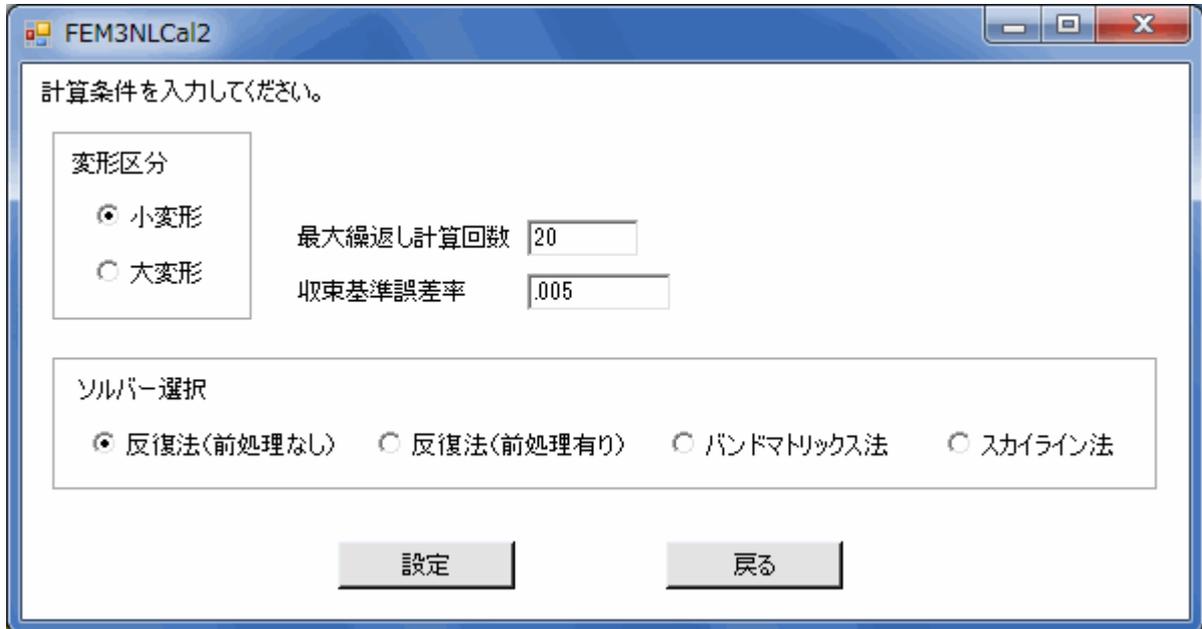


図6-4 計算条件入力画面

6.4 計算終了

図6-5に計算終了画面、図6-6に計算確認ダイアログ画面を示します。図6-5では、かかった計算時間（本例では1s）と空きメモリー容量も表示されます。また、図6-6の計算確認ダイアログ画面では、繰返し計算回数、最大の相当歪み、および最大値データが表示されます。本画面で「OK」ボタンをクリックすると、立ち上げ時のメニュー画面に戻ります。

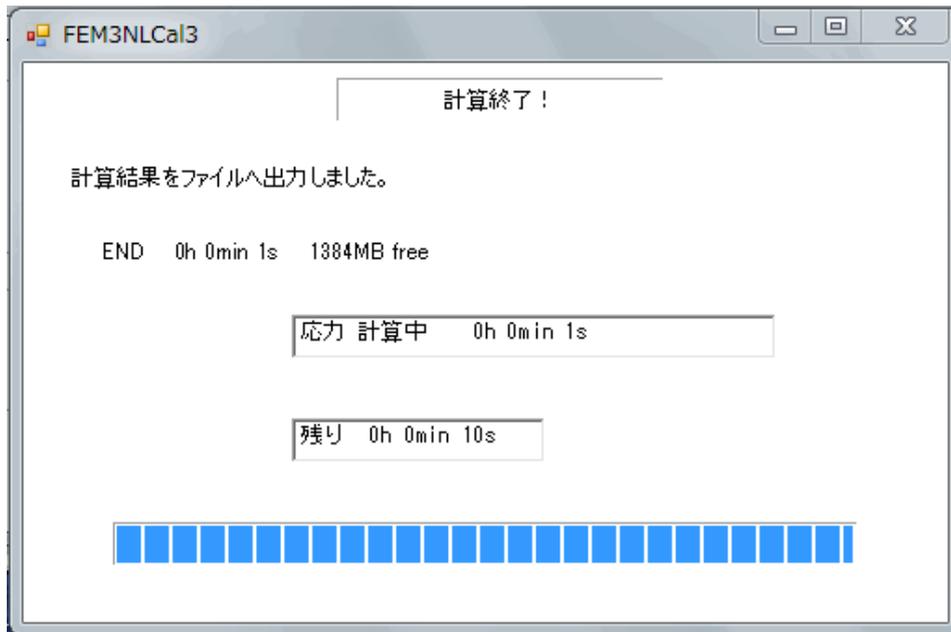


図6-5 計算終了画面

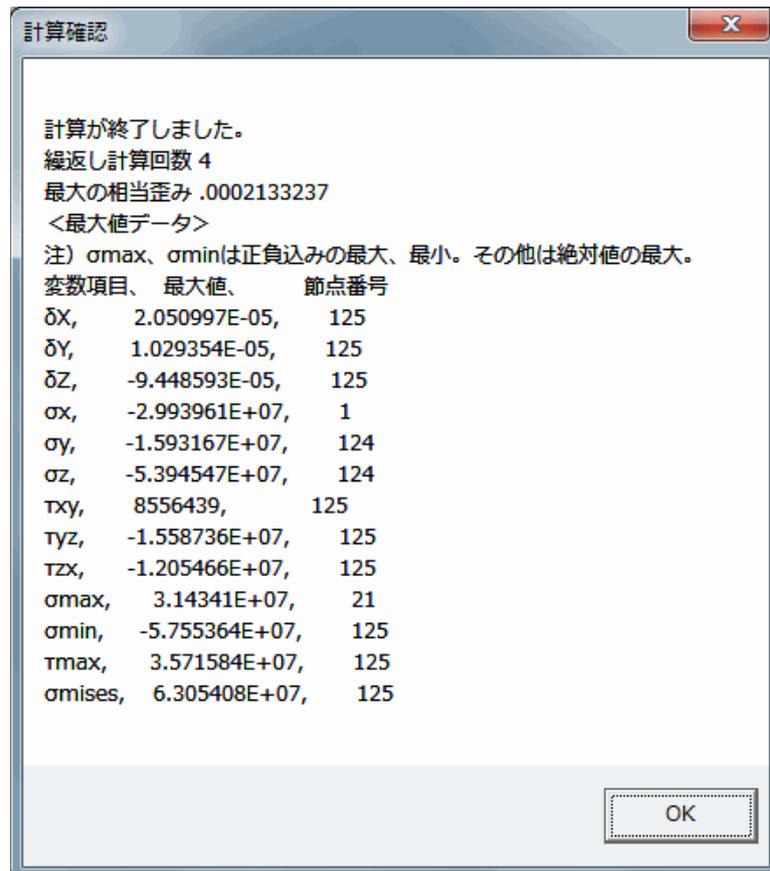


図6-6 計算確認ダイアログ画面

6.5 計算結果

6.2節で指定した出力ファイルに計算結果が書き出されます。図6-7に結果ファイルへの出力例を示します。また、「熱応力有り」の場合は、「熱応力条件データファイル」の名前も表示され、それ以外は同じです。同図の○印を付した数字の部分について補足説明します。

- ①計算結果の () 内にソルバー種類 (反復法の前処理有無を含む) が出力されています。
- ②計算マトリックスの変数個数、ハーフバンド幅、保存インデックス数 (1個) が、それぞれ360、123、17622と出力されています。
 - ◇このインデックス数は、FEMの主配列の要素数です (反復法では1次元配列)。そのメモリー使用量は、インデックス数に8バイトを掛けたものです。本例は反復法で前処理なしの場合のため、このインデックス数を持つ配列は1つだけです。もし反復法で前処理有りの場合は、このインデックス数を持つ配列が2つ使用されます。
- ③収束計算回数は4回です。
- ④収束時の誤差率は.0007725488になっています。
- ⑤最大の相当歪みは.0002133236です。
 - ◇この値が材料の歪み・応力グラフの範囲より大きい場合は、同グラフの最大区間を延長した線上当ります。
- ⑥変位の出力では、すべての節点について、各変位 (δX 、 δY 、 δZ) が出力されています。
- ⑦本例では、節点125における下向き変位 (Z方向で-符号) $9.448593 \times 10^{-5} \text{m}$ が最大の変位となっています。
- ⑧次に、節点応力が出力されています。なお、複数材料の場合は、材料毎に応力が出力されます。
- ⑨出力変数の順序を示しています。
 - ◇ σ の符号は、引張が正で、圧縮が負です。
 - ◇ σ_{\max} 、 σ_{\min} 、 τ_{\max} はすべての応力についてのものです。
 - ◇ σ_{mises} はMises応力です。
- ⑩拘束節点の反力が出力されています。
- ⑪最大値データとして、各変数について最大値、節点番号が出力されています。
- ⑫最後に計算時間 (本例では2s) と空きメモリー容量も出力されます。

<< 3D非線形弾性解析の計算結果 >>

[FEM3Dデータファイル], C:\¥VB2022¥3D非線形弾性解析¥Data¥FEM3Test4. dat

3次元構造テストモデル (□0.1m×0.3m長)

[材料データファイル], C:\¥VB2022¥3D非線形弾性解析¥Data¥TestMat. dat

FEM3NLテスト用材料データ

*** 計算結果 (反復法、前処理なし) ***

計算マトリックスの変数個数、ハーフバンド幅、保存インデックス数 (1個)

360, 123, 17622

収束計算回数, 4

誤差率, .0007725488

最大の相当歪み, .0002133236

** 変位の出力 **

<節点番号、 δX 、 δY 、 δZ >

1, 0, 0, 0

2, 0, 0, 0

3, 0, 0, 0

4, 0, 0, 0

.....

.....

22, -4.195209E-06, 7.618821E-07, -3.25022E-06

23, -1.772442E-09, -5.858656E-10, -2.442154E-06

24, 4.19279E-06, -7.777094E-07, -3.230116E-06

.....

.....

125, 2.050997E-05, 1.029354E-05, -9.448593E-05

126, -1.672836E-05, -5.749502E-06, -7.83463E-05

127, 1.775627E-09, -3.956497E-07, -7.893549E-05

128, 1.88025E-05, 7.725593E-06, -8.159303E-05

129, -1.661788E-05, -5.769184E-06, -7.535362E-05

130, -8.25321E-06, -2.980479E-06, -7.534624E-05

131, 5.725767E-08, -2.669019E-07, -7.529075E-05

132, 8.395258E-06, 2.731761E-06, -7.524183E-05

133, 1.649322E-05, 6.077779E-06, -7.482215E-05

134, -1.647256E-05, -5.768008E-06, -7.224672E-05

135, 3.717762E-08, -1.363329E-07, -7.221121E-05

136, 1.634082E-05, 5.893804E-06, -7.193674E-05

137, -1.643137E-05, -5.795131E-06, -6.933706E-05

138, -8.224085E-06, -2.891677E-06, -6.931142E-05

139, -2.498589E-08, -5.415116E-08, -6.925459E-05

140, 8.211195E-06, 2.898185E-06, -6.919973E-05

141, 1.649814E-05, 5.858172E-06, -6.934236E-05

①

②

③

④

⑤

⑥

⑦

図6-7 (1/2) 結果ファイルへの出力例

```

** 節点応力の出力 **                                     ⑧
<節点番号、σx、σy、σz、τxy、τyz、τzx、σmax、σmin、τmax、σmises> ⑨
1, -2.993961E+07, -1.289313E+07, -1.287977E+07, 3229742, 14930.41, -3544151,
-1.188947E+07, -3.119631E+07, 9653422, 1.896807E+07
2, -1.488374E+07, -6303963, -6316345, 1763848, -14190.89, -2201981, -5556522,
-1.572783E+07, 5085653, 9868473
3, -15245.39, -6384.668, -6439.659, -2492.307, 20480.14, -958621.4,
948066.4, -969641, 958853.7, 1660789
4, 1.487938E+07, 6301844, 6314364, -1762316, -14184.77, -2191491,
1.571864E+07, 5567236, 5075702, 9858633
.....
139, -291992.1, -347450.4, 757488.5, 301816.6, -60119.15, -155652,
790055.8, -625533.1, 707794.4, 1232677
140, -1290952, -1904235, -1327169, -188529.7, 459072.8, -383658.2, -741497,
-2158410, 708456.6, 1239222
141, -1097692, -1494626, -2805284, -1111956, 1663686, -806895.8, 692051.1,
-3938788, 2315420, 4044967
-----
** 拘束境界の節点反力 **                                     ⑩
<節点番号、Fx、Fy、Fz>
1, -264.9245, -1543.393, 1945.457
2, 9262.346, -2279.181, -2279.508
3, -8.611816, -17.36076, 1757.43
.....
19, -4.387451, -2.633392, 1883.908
20, -10465.74, -3532.793, -3813.446
21, 268.003, -1317.085, 2147.891
-----
<最大値データ>                                             ⑪
注) σmax、σminは正負込みの最大、最小。その他は絶対値の最大。
変数項目、 最大値、      節点番号
"変数項目、 最大値、      節点番号"
δX,      2.050997E-05,      125
δY,      1.029354E-05,      125
δZ,      -9.448593E-05,      125
σx,      -2.993961E+07,      1
σy,      -1.593167E+07,      124
σz,      -5.394547E+07,      124
τxy,      8556439,      125
τyz,      -1.558736E+07,      125
τzx,      -1.205466E+07,      125
σmax,      3.14341E+07,      21
σmin,      -5.755364E+07,      125
τmax,      3.571584E+07,      125
σmises,      6.305408E+07,      125
END      0h 0min 2s      5525MB free                                     ⑫

```

図6-7 (2/2) 結果ファイルへの出力例

第7章 「後処理」プログラム

7.1 サブメニュー画面

「メニュー」プログラムにおける「後処理」のサブメニュー画面を図7-1に示します。同図のように4つのサブメニューがあります。いずれのサブメニューをクリックしても次の使用ファイル設定画面となります。なお、「等高線図の作画」は応力について行ないません。

「解析結果の端数処理」とは、解析結果ファイルのデータに対して、微小な端数を丸めた実用的な数値に変更してファイル出力するものです。これは必要があれば実施してください。

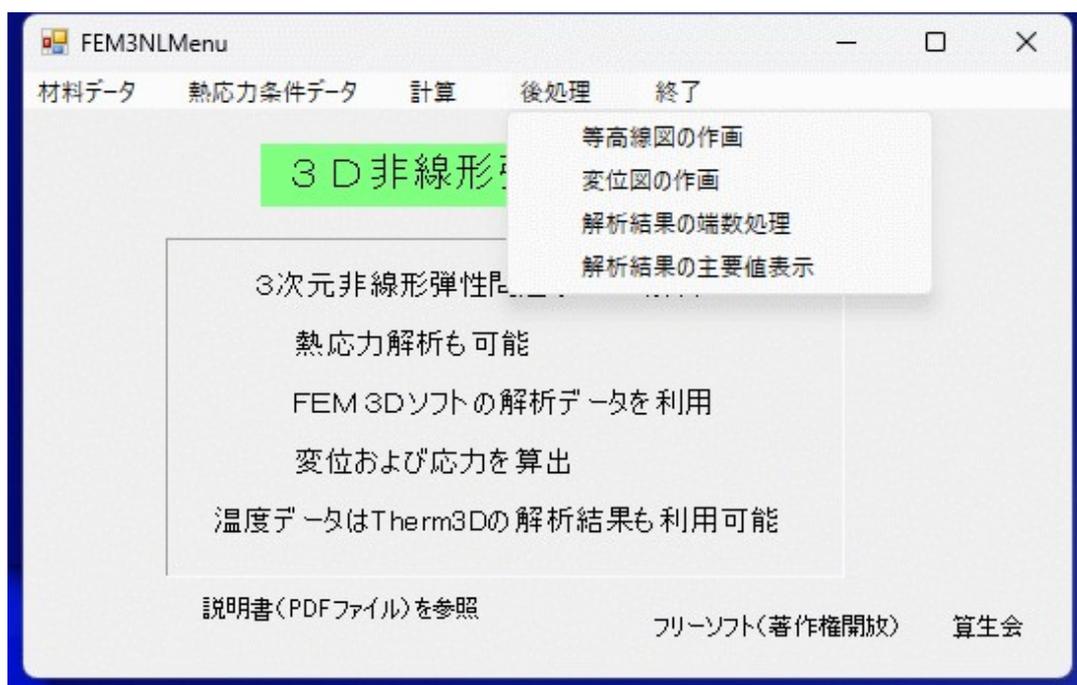


図7-1 「後処理」サブメニュー画面

7.2 使用ファイルの設定

図7-2に使用ファイル設定画面を示します。同画面で、表題が「等高線図の作成」になっていますが、他のサブメニューの場合は表題が入れ替わります。

本画面で、「入力データファイル指定」ボタンをクリックすると、コマンドダイアログで入力データファイルを選定できます。そして、再び使用ファイル設定画面に戻ると、「入力データファイル指定」のテキストボックスには選定済み入力ファイル名が、また「解析結果ファイル指定」の方には入力ファイル名の拡張子を「.rep」に変更したファイル名が表示されます。もし、結果データファイル名が他の名前であった場合は、テキストボックスで修正できます。

本画面で、「設定」ボタンをクリックすると、等高線図の場合は同図の指定画面に、変位図の場合は作画画面に移ります。また、解析結果の端数処理の場合は、コマンドダイアログで保存ファイル名を設定した後、端数処理が実行されます。さらに、解析結果の主要値表示の場合は、すぐに表示が実行されます。

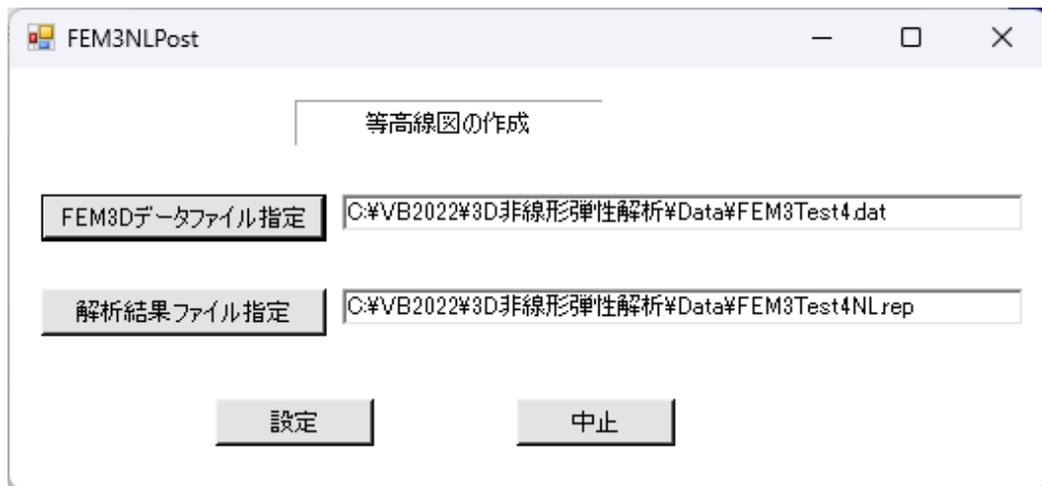


図7-2 使用ファイル設定画面

7.3 等高線の指定画面

図7-3に等高線指定画面を示します。

①本画面で、作画したい変数項目を選択します。

◇「最大値データ」のボタンをクリックすると、最大値データが表示されます。

図7-4に最大値データの表示例を示します。

②本画面で、「設定」ボタンをクリックすると、次の仕様設定画面に移ります。

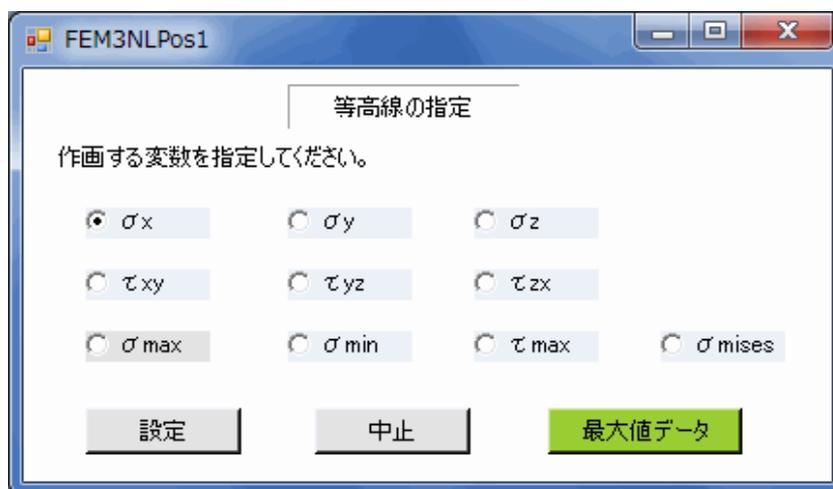


図7-3 等高線指定画面

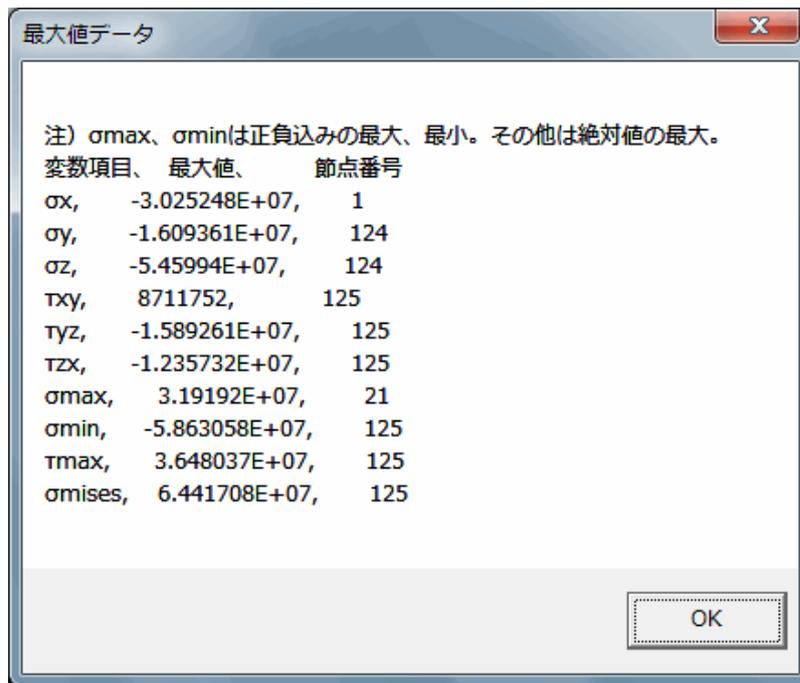


図7-4 最大値データの表示例

7.4 等高線図の仕様設定画面

図7-5に等高線図の仕様設定画面を示します。本画面の入力について、以下に補足説明します。

- ①まず、等高線の表示MIN、MAX、分割数を入力します。その際、入力の便のため、解析結果データの最小値と最大値を画面表示しています。
 - ◇分割数を21以上とすると、自動的にグラデーションとなります。グラデーションはカラー256階調で作画されます。なお、グラデーションの作画は処理時間が1桁増加しますので注意してください。
- ②また、チェックボックスで「カラーフィル」、「場所・数値表示」を指定できます。
 - ◇初期設定では両者とも指定されています。
 - ◇「カラーフィル」を指定すると、各等高線の間が色塗りされ、全面カラー図となります。なお、グラデーションの場合は無条件でカラーフィルになります。
 - ◇「場所・数値表示」を指定すると、対象変数の最大の場所と数値が等高線図に表示されます。ただし、対象変数が σ_{min} の場合のみ、最小のものが表示されます。
- ③本画面で、「設定」ボタンをクリックすると、次の等高線図作画画面に移ります。

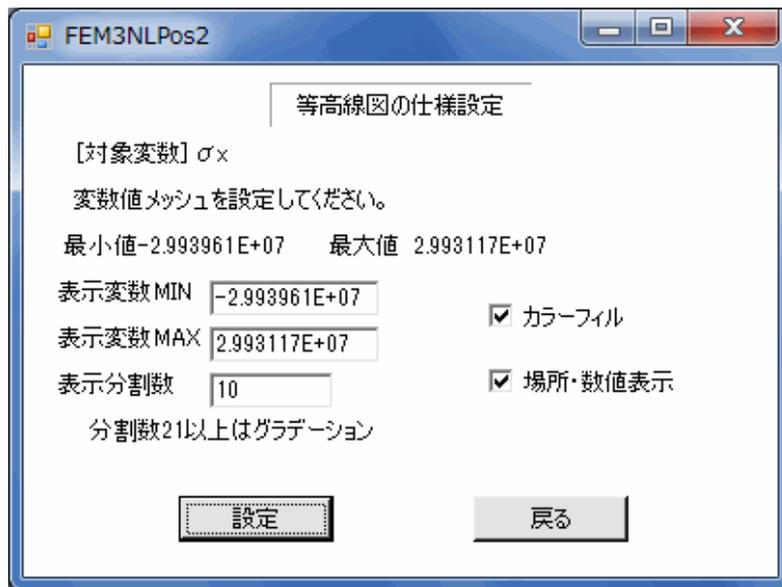


図7-5 等高線図の仕様設定画面

7.5 等高線図の作画画面

図7-6に等高線図の作画画面を示します。

- ①同画面のように、変形後の図上に等高線がカラー表示され、右欄には各等高線における変数値も明示してあります。
- ②本画面の左側の「変位作画の倍率」は、構造寸法に対する変位の作画倍率を示します。本数値を任意に変更して「更新」ボタンをクリックすると、変更が反映されます。
 - ◇0を設定すると、変位なしの構造図の上に等高線が作画されます。
- ③本画面左側の「共通辺の表示」は、「なし」か「有り」を選択できます。選択した後に「再描画」ボタンをクリックします。
 - ◇「共通辺の表示」を「有り」にした等高線図を図7-7に示します。同図では、要素どうし共有する辺が表示されています。
- ④本画面の上側に表示されている作画パラメーター、マウสดラッグによる部分拡大、回転操作等は、5.9節の構造図と同じです。
 - ◇ただし、本画面では必ず隠面処理を行ない、また番号表示はありません。
 - ◇外側表面で背後にある隠面は、モデルを適当に回転させることにより、画面表示できます。
 - ◇六面体要素どうしが接する共通面は、全要素描画では隠面となりますが、「標準モード」でマウสดラッグ矩形によりどちらかの要素だけを領域選択すれば、画面表示できます。
 - ◇等高線図の「説明」ボタンをクリックすると、マウスによる回転操作（Shiftキー併用）の説明図が表示されます。
- ⑤マウス右クリックで任意の節点を選択すると、図7-8のように同節点の変数値が表示されます。
 - ◇本機能を使用中は、描画保存がありません（描画のさかのぼりが無効）。
 - ◇ESCキーを押すと節点選択が解除されます。

- ⑥「標準・全画面切換」ボタンをクリックすると、標準画面と全画面を切り換えることができます。また、画面Formの右下コーナー等をマウスドラッグすることにより、標準画面と全画面の間で自由に拡大・縮小できます。
- ⑦マウス中ボタン、ホイールにより移動、拡大・縮小を行なうことができます。中ボタンを押したまま動かせば図形を移動できます。また、ホイールの回転により拡大・縮小ができます。
- ⑧マウスドラッグ矩形により、等高線図の一部分を拡大できます。操作方法は5.9節の構造図と同じです。
- ⑨繰り返して描画を実施した場合、「前の描画」ボタンをクリックすると1つずつ前の描画にさかのぼることができます。
- ◇さかのぼれる描画の数は最大8つです。
 - ◇回転操作があっても無視され、初期の回転位置で描画されます。
- ⑩「面切断設定」ボタンをクリックすると、面切断設定の画面に移り、面切断の仕方を設定できます。操作方法は構造図の作画と同じです。
- ⑪本画面で「コピー印刷」ボタンをクリックすると、プリンターで画面コピーを印刷できます。
- ◇「通常画面」の作画が印刷されます。
- ⑫本画面を終了するには、「戻る」ボタンをクリックして、仕様設定画面に戻ります。また、もし等高線図の出来栄えに不満があれば、「戻る」ボタンで仕様設定画面に戻って仕様変更し、再度、等高線図を作画することができます。

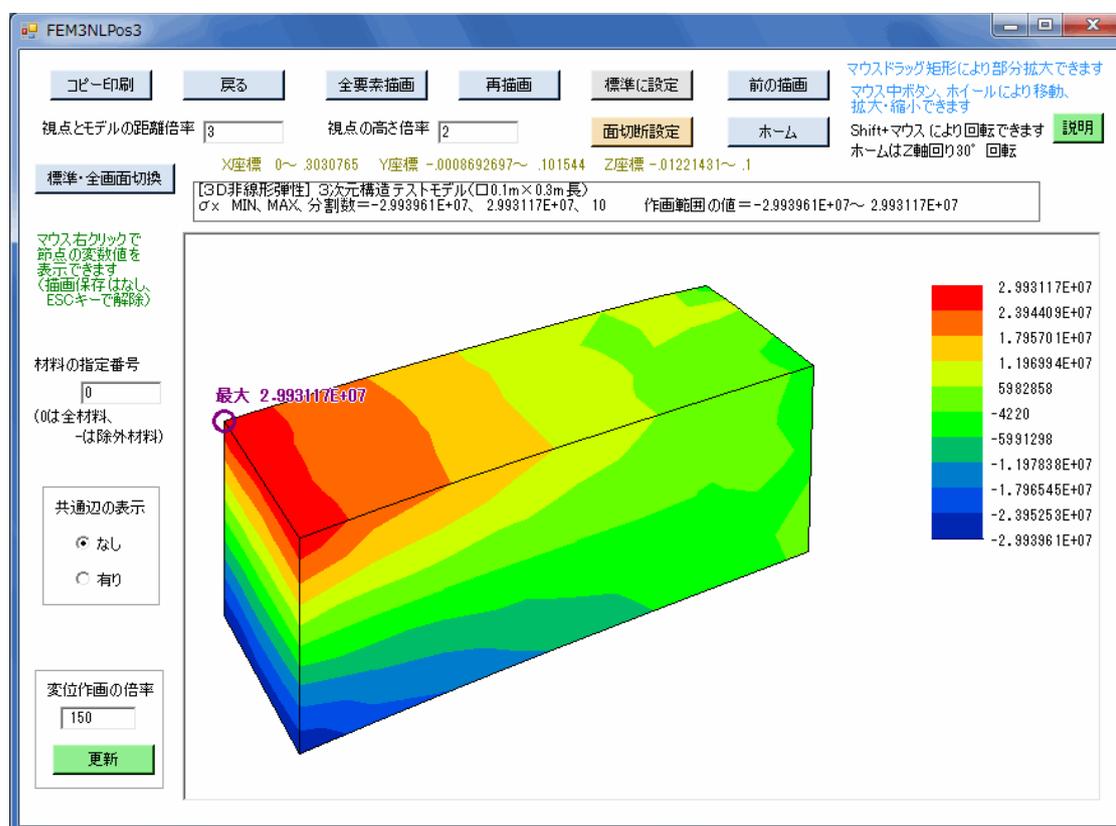


図7-6 等高線図の作画画面

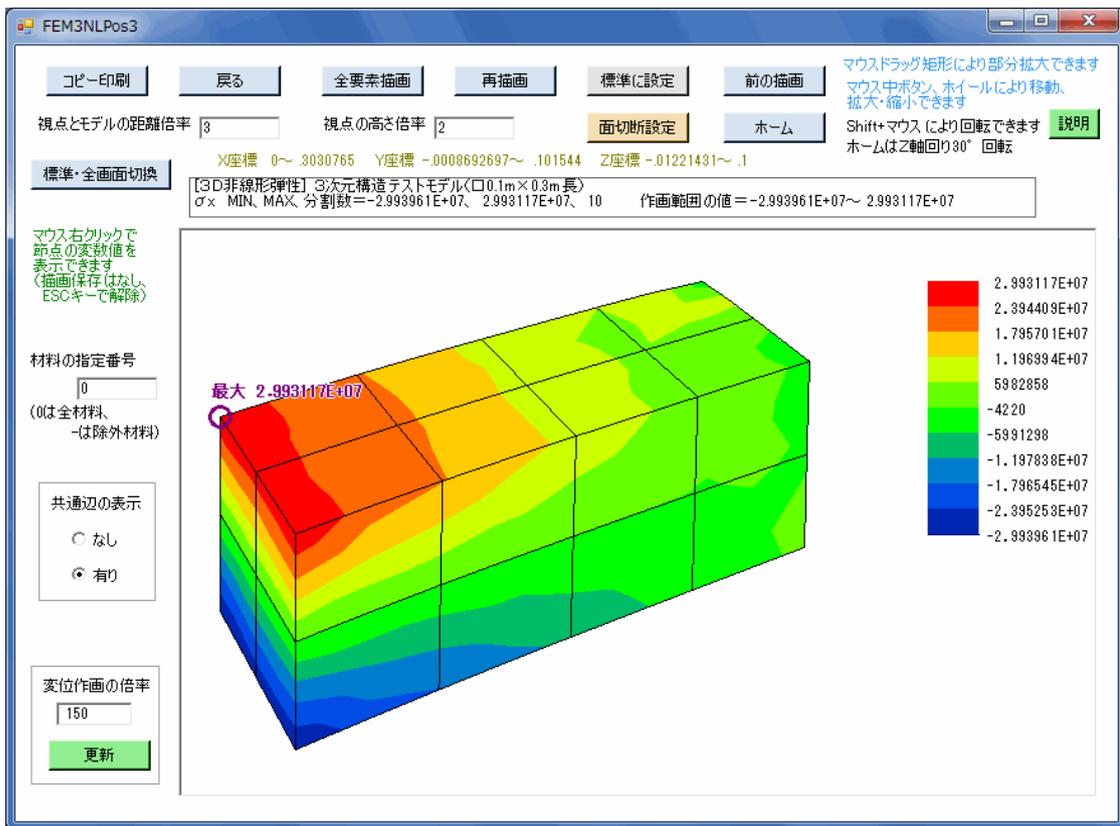


図7-7 等高線図の作画画面（共通辺の表示有り）

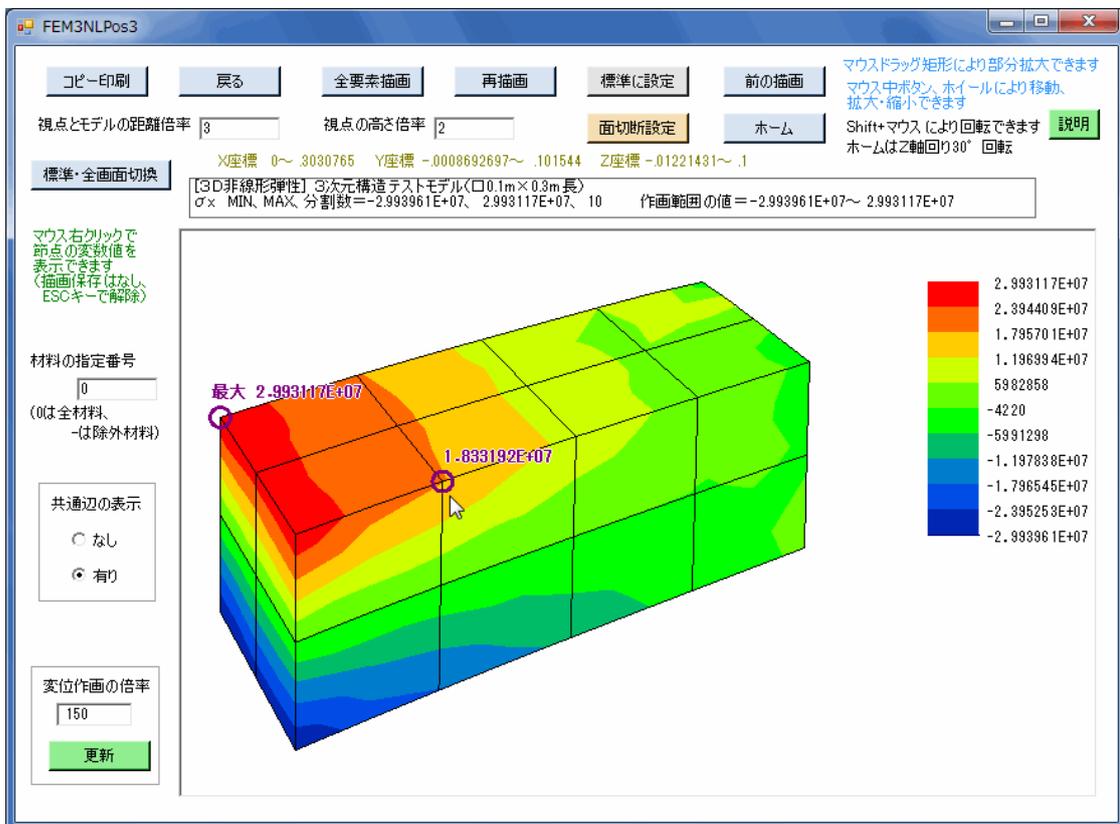


図7-8 等高線図の作画画面（マウス右クリックの節点の変数値表示）

また、図7-9にグラデーシヨンの等高線図の画面例を示します。グラデーシヨンの場合、

画面右側のカラーゲージに4等分の5つの変数値が示されます。

さらに、図7-10に熱応力解析結果の等高線図の作画画面を示します。

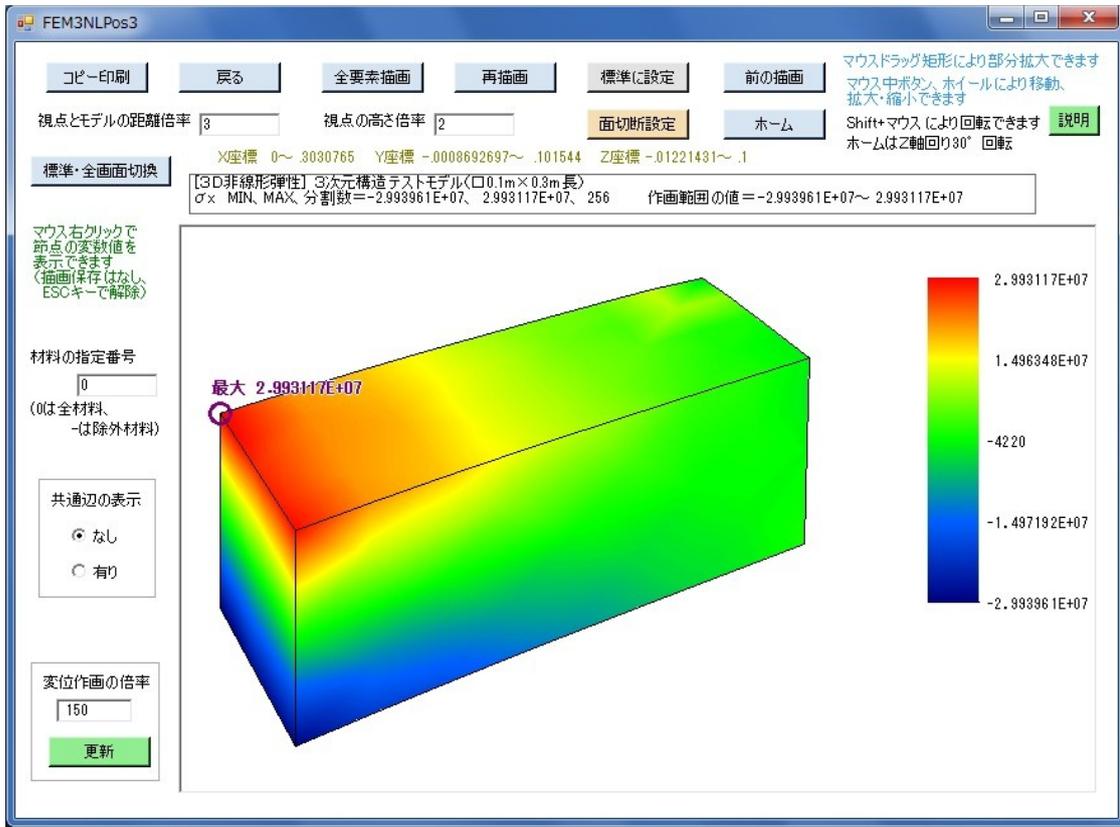


図7-9 等高線図のグラデーションの作画画面

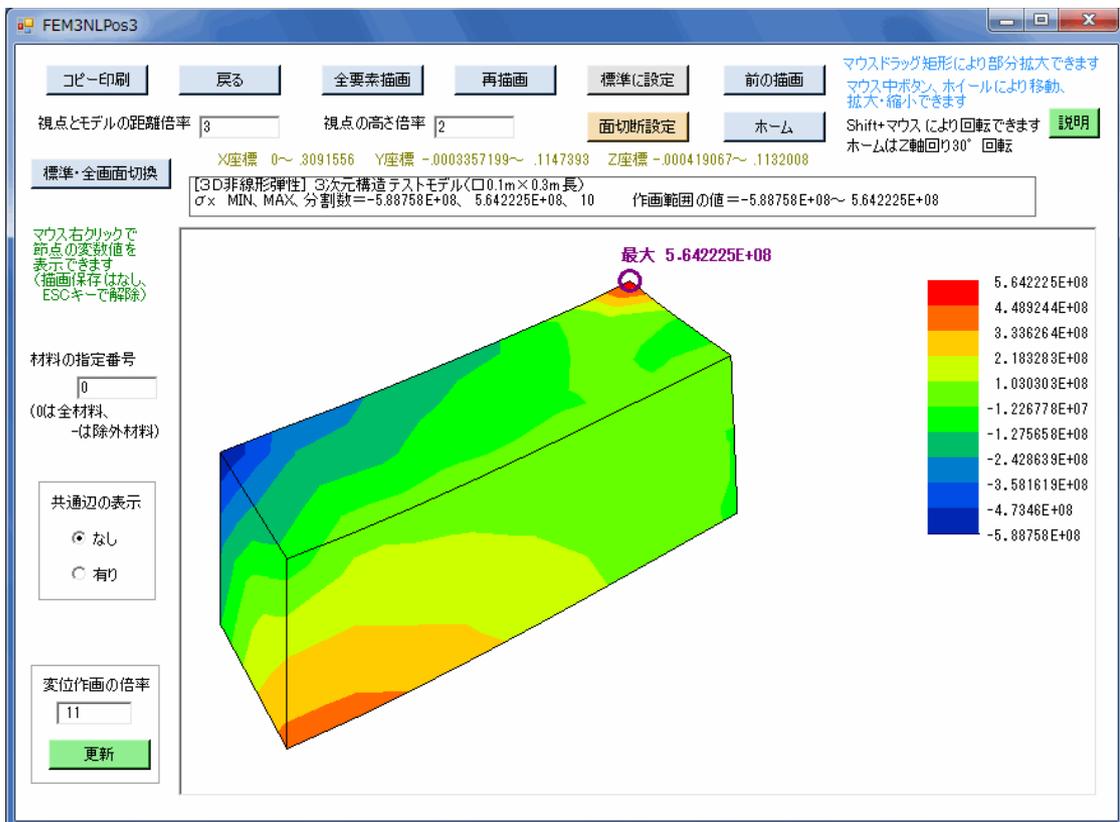


図7-10 等高線図の作画画面 (熱応力解析結果)

7.6 変位図の作画画面

図7-11に変位図の作画画面を示します。

- ①同画面のように、元の構造図に対して、青色で変位図が表示されています。
 - ◇最大変位の節点位置に、変位値が表示されます。最大変位の表示の有無は、オプションボタンの「最大変位の表示」をクリックして「再描画」ボタンをクリックすれば切り替わります。
 - ◇グラフィック処理の特性上、構造部と重なる変位が一部作画されないことがあります。
- ②本画面の左側の「変位作画の倍率」は、構造寸法に対する変位の作画倍率を示します。本数値を任意に変更して「更新」ボタンをクリックすると、変更が反映されます。
- ③本画面の左側に「変位線の幅」のパラメーターを表示してあり、それを変更できます。変更した後は、「再描画」ボタンをクリックすると作画画面が変更されます。
 - ◇「変位線の幅」は1~3が可能で、初期値は1にしてあります。
- ④本画面の左下側の「構造図消去」ボタンをクリックすると、図7-12のように構造図なしの変位図だけになります。同図で「構造図作画」ボタンをクリックすると元の画面に戻ります。
- ⑤本画面の上側に表示されている作画パラメーター、マウストラッグによる部分拡大、回転操作等は、等高線図の作画と同じです。
 - ◇「隠面処理」の「有り」でも、六面体要素間の共通辺の表示は残ります（変位を把握しやすくするため）。
 - ◇「隠面処理」の「なし」を選択すると、要素辺がすべてその変位と共に表示されます。図7-13に隠面処理なしの場合の変位図を示します。
 - ◇外側表面で背後にある隠面は、モデルを適当に回転させることにより、画面表示できます。
 - ◇六面体要素どうしが接する共通面は、全要素描画では隠面となりますが、後述の「部分拡大モード」でマウストラッグ矩形によりどちらかの要素だけを領域選択すれば、画面表示できます。
 - ◇変位図の「説明」ボタンをクリックすると、マウスによる回転操作（Shiftキー併用）の説明図が表示されます。
- ⑥マウス右クリックで任意の節点を選択すると、図7-14のように同節点の変位値が表示されます。
 - ◇本機能を使用中は、描画保存がありません（描画のさかのぼりが無効）。
 - ◇ESCキーを押すと節点選択が解除されます。
- ⑦「標準・全画面切替」ボタンをクリックすると、標準画面と全画面を切り換えることができます。また、画面Formの右下コーナー等をマウストラッグすることにより、標準画面と全画面の間で自由に拡大・縮小できます。
- ⑧マウス中ボタン、ホイールにより移動、拡大・縮小を行なうことができます。中ボタンを押したまま動かせば図形を移動できます。また、ホイールの回転により拡大・縮小ができます。

- ⑨マウスドラッグ矩形により、変位図の一部分を拡大できます。操作方法は前述の等高線図と同じです。
- ⑩繰り返して描画を実施した場合、「前の描画」ボタンをクリックすると1つずつ前の描画にさかのぼることができます。
- ◇さかのぼれる描画の数は最大8つです。
 - ◇回転操作があっても無視され、初期の回転位置で描画されます。
- ⑪「面切断設定」ボタンをクリックすると、面切断設定の画面に移り、面切断の仕方を設定できます。操作方法は等高線図の作画と同じです。
- ⑫本画面で「コピー印刷」ボタンをクリックすると、プリンターで画面コピーを印刷できます。
- ◇「通常画面」の作画が印刷されます。
- ⑬本画面を終了するには、「中止」ボタンをクリックします。

また、図7-15に熱応力解析結果の変位図の作画画面を示します。

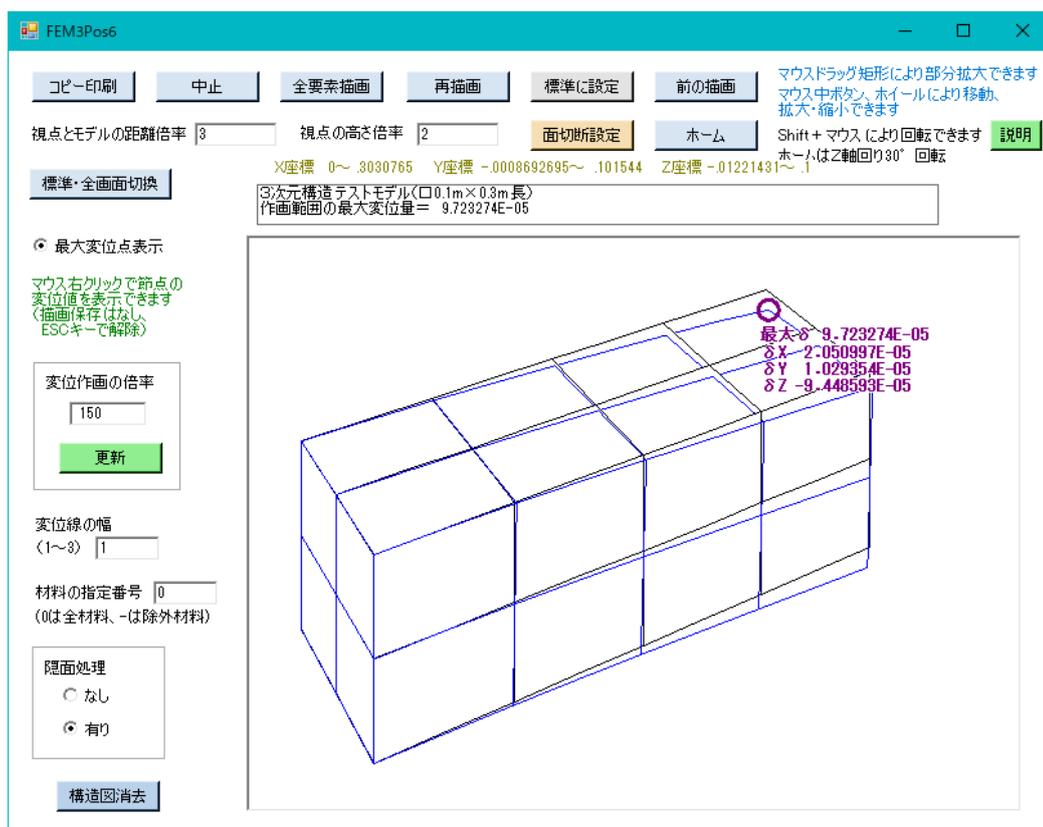


図7-11 変位図の作画画面（隠面処理有り）

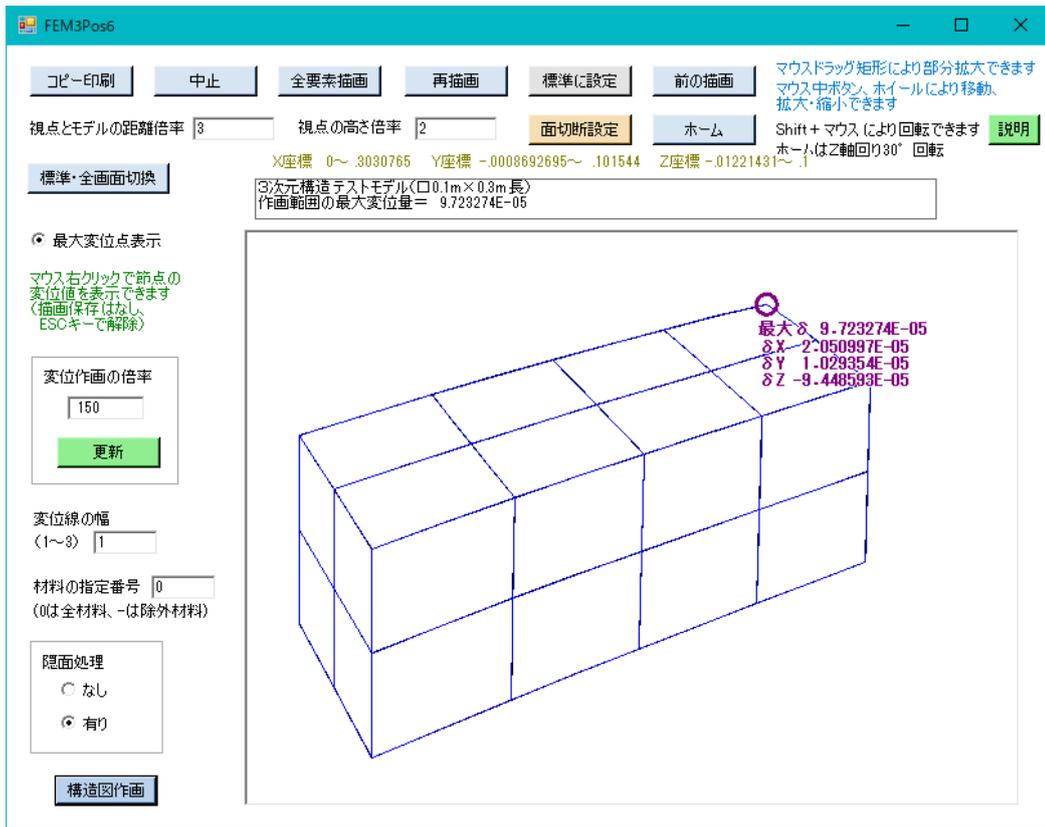


図7-12 変位図の作画画面（隠面処理有り、構造図消去）

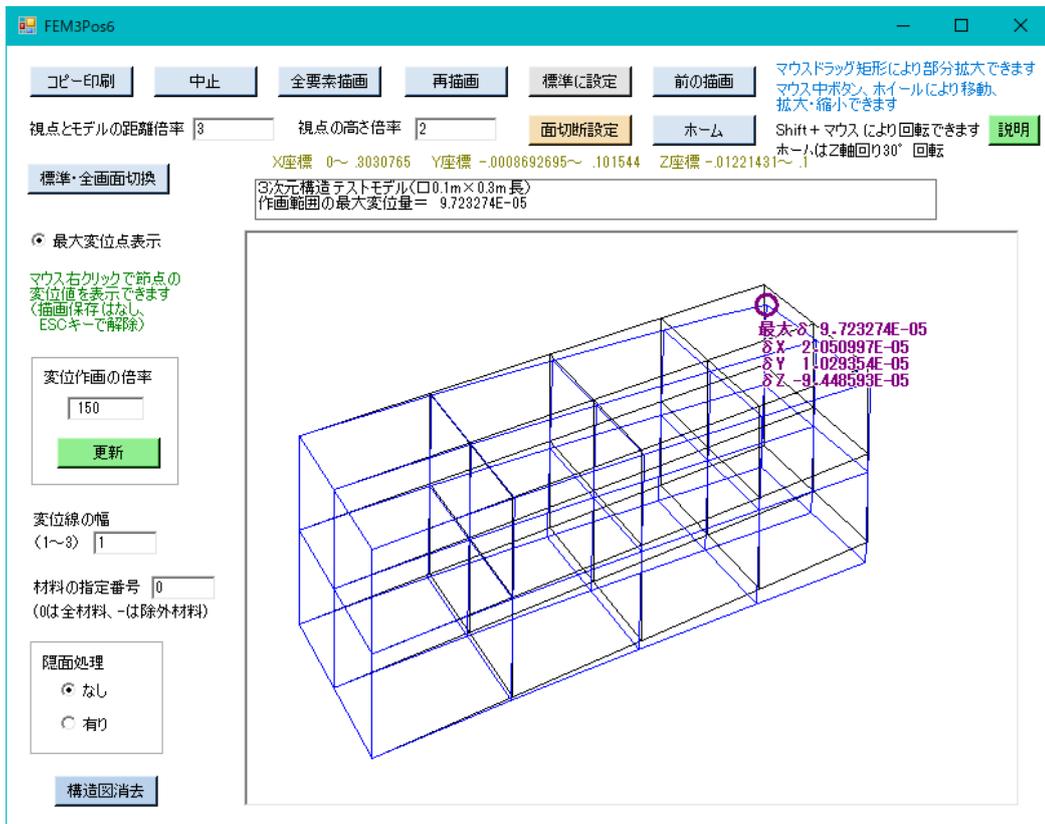


図7-13 変位図の作画画面（隠面処理なし）

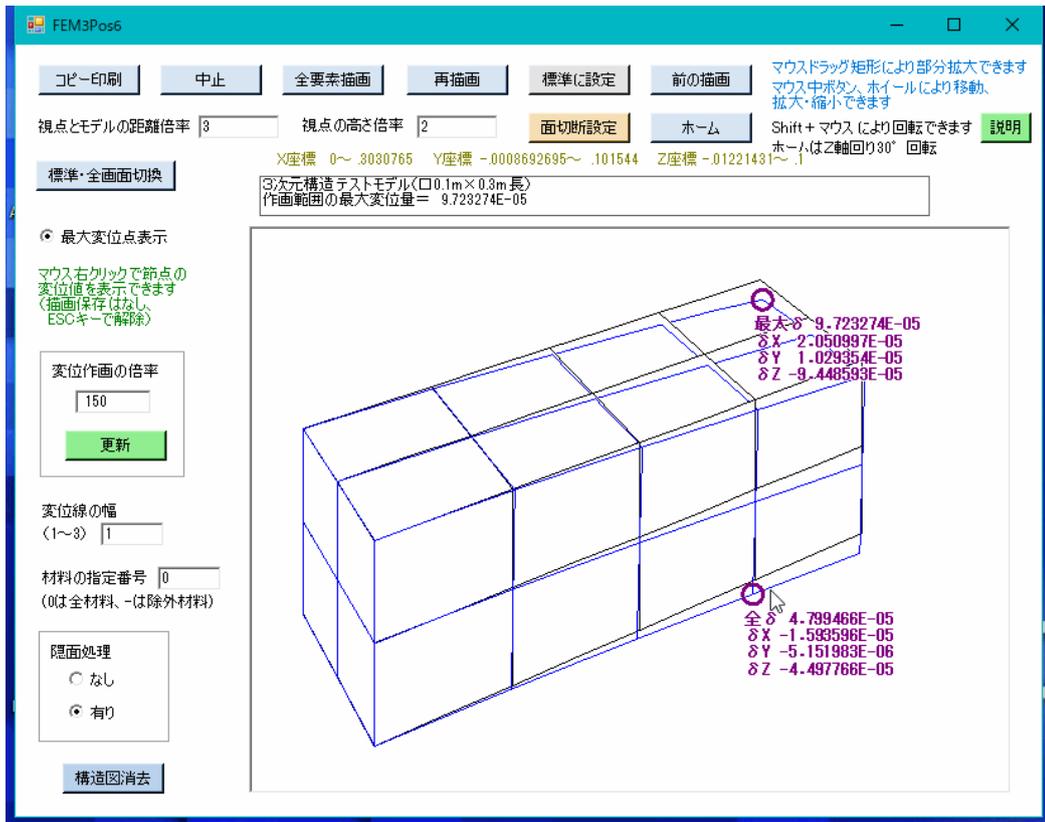


図7-14 変位図の作画画面（マウス右クリックの節点の変位値表示）

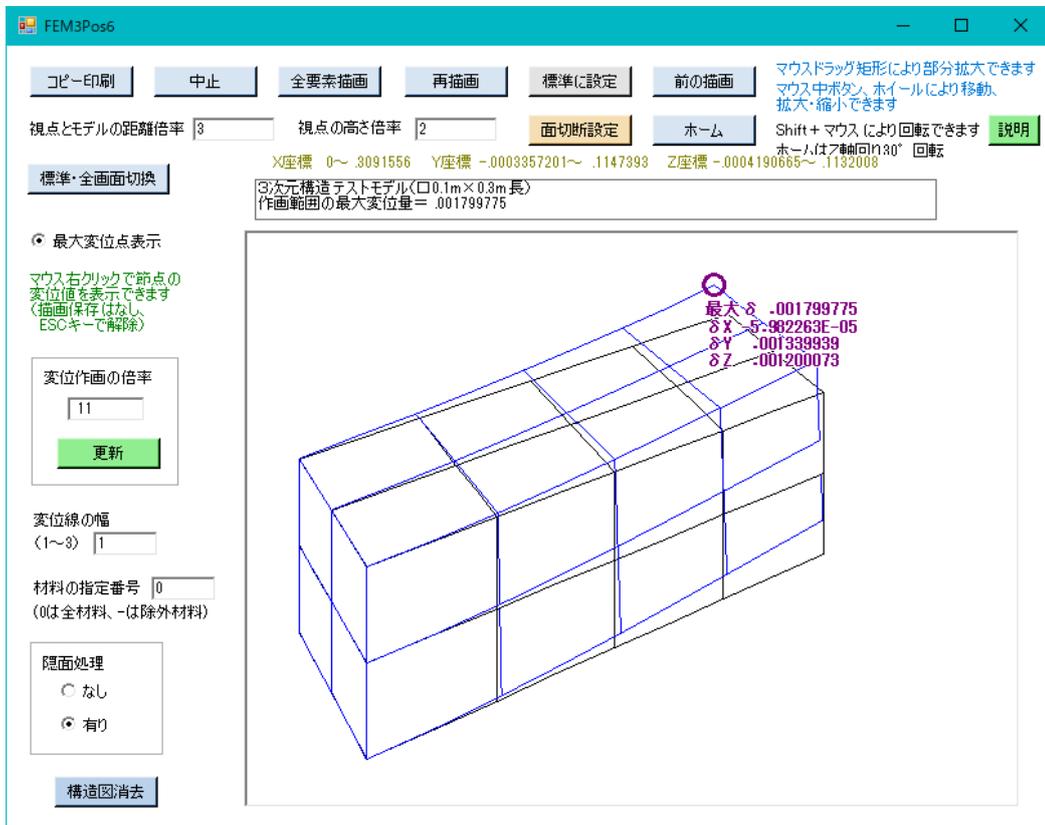


図7-15 変位図の作画画面（熱応力解析結果）

7.7 解析結果の主要値表示

図7-16に主要値表示の画面を示します。主要値データをクリップボードにコピーするかどうかは、「はい」または「いいえ」をクリックします。その後は立ち上げ時のメニュー画面に戻ります。

◇クリップボードにコピーされたデータは、他のソフトで貼り付け利用できます。

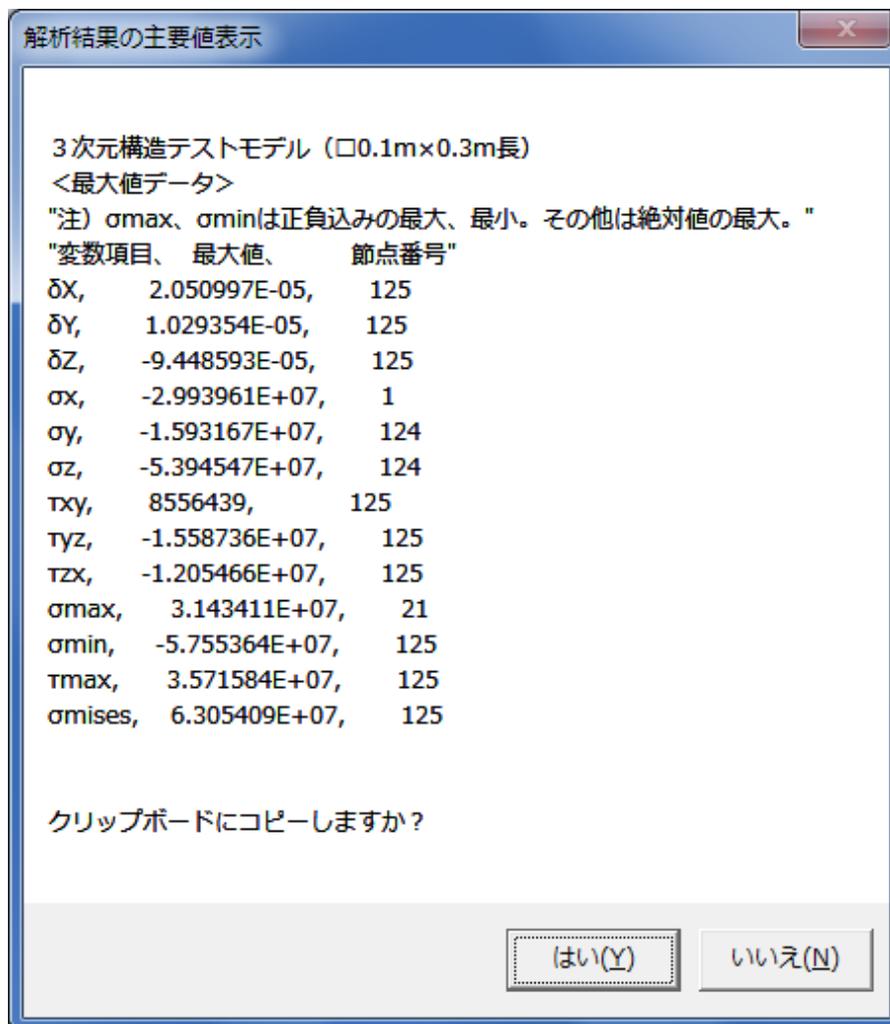


図7-16 解析結果の主要値表示の画面

第8章 焼き嵌めの計算例（熱応力解析）

軸にフランジを焼き嵌めするモデルについての計算例を示します。焼き嵌めは、外側の穴明き部品を加熱して軸に嵌める結合方法ですが、逆に軸を冷やす方法の冷やし嵌めは温度関係が逆になるだけで同様に計算できます。

8.1 構造モデル

図8-1に構造モデルを示します。同図のように、焼き嵌めするフランジ（材料2）はちょうど隙間なく軸に接触する寸法でモデル化します。また、X, Y軸に関して対称なので、1/4部分を用いることにします。そして、フランジの初期温度を上記の軸に接触する状態の温度（ここでは80°C）とします。そして、軸の初期温度、および軸とフランジの負荷温度は、すべて常温の20°Cとします。ただし、フランジの初期温度における歪みは無視します。また、2つの材料共、非線形弾性は図3-3と同じです。

注）解析データの温度設定方式は材料を選択しています。なお、本モデルは要素数480、節点数2471です。

8.2 計算結果

図8-2に等高線図（ σ_{max} ）、図8-3に変位図を示します。なお、計算時間は18sでした（反復法、前処理なし）。

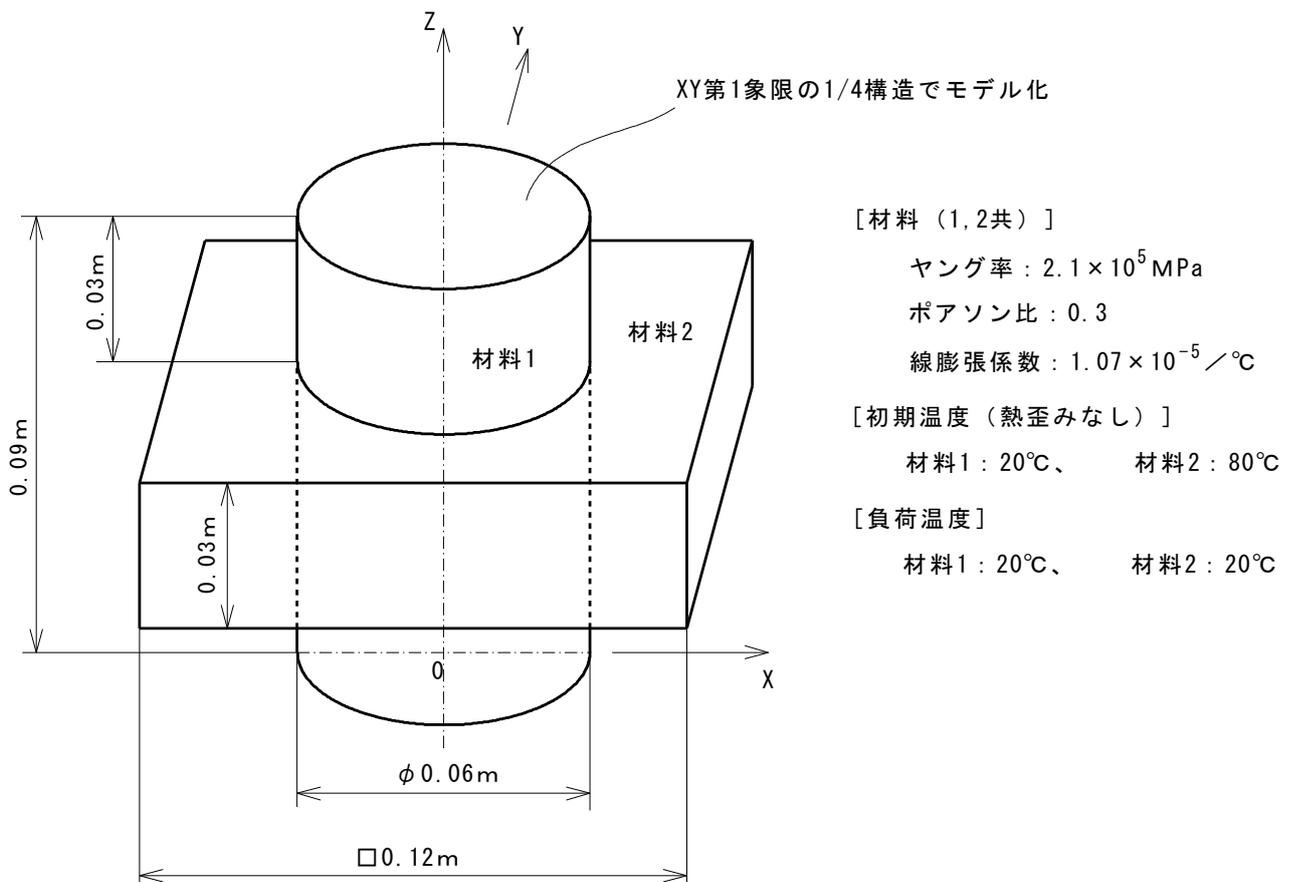


図8-1 焼き嵌めの構造モデル

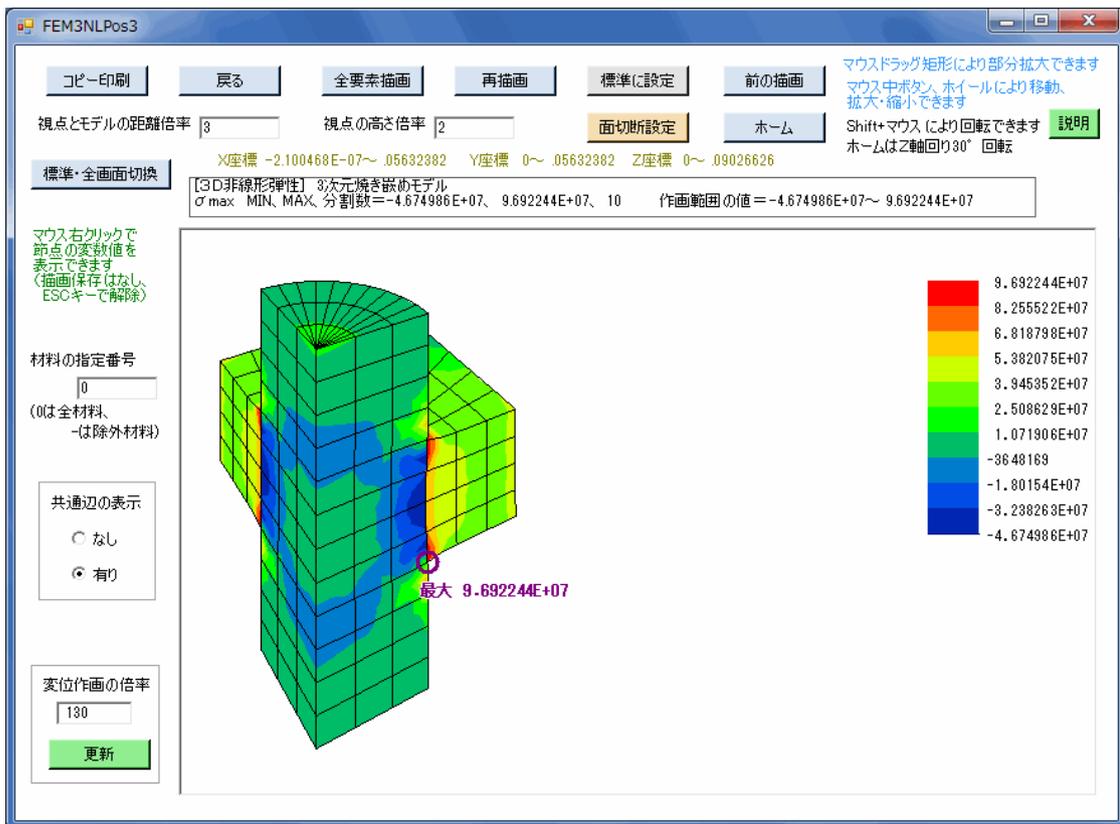


図8-2 焼き嵌めの等高線図 (σ_{max})

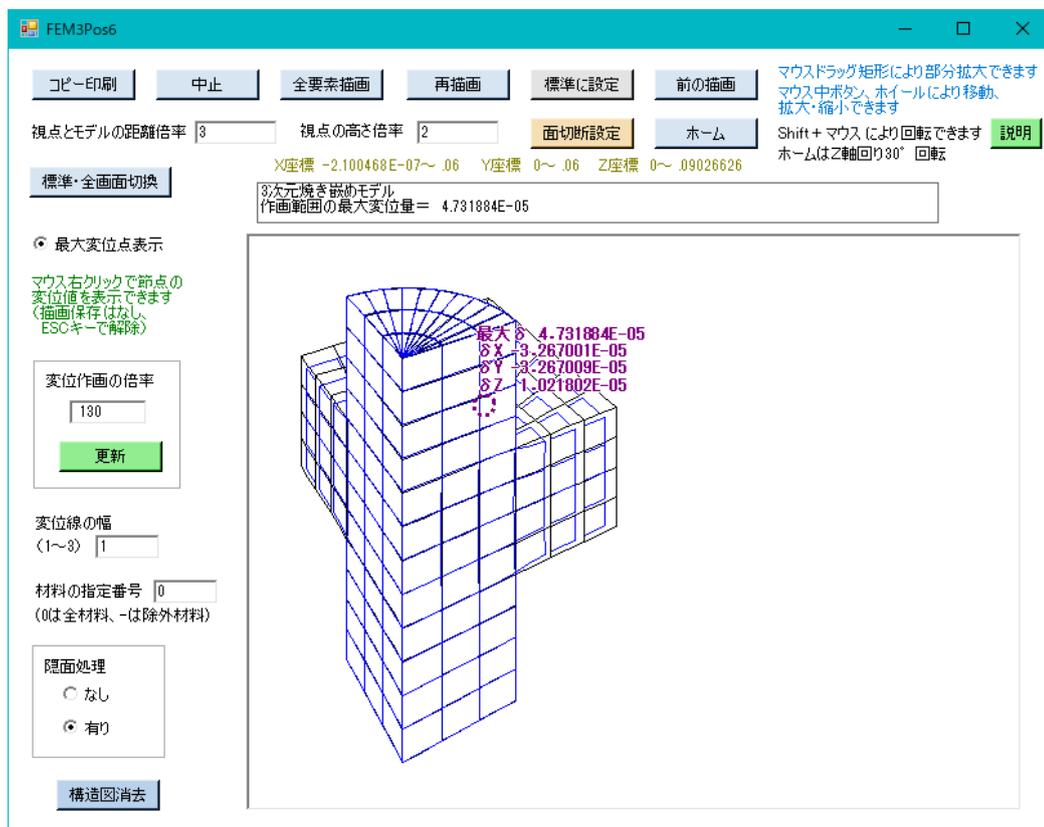


図8-3 焼き嵌めの変位図

[参考文献]

<A> BASIC言語

- A1) 「Microsoft Visual Basic プログラミング ガイド」、
マイクロソフト (株)、1997
- A2) 「実力アップ Visual Basic.NET 基礎編」、川口 輝久、
(株) 技術評論社、2003
- A3) 「Visual Basic 応用プログラミング」、林 晴比古、
ソフトバンク (株)、1997
- A4) 「Visual Basic for Windows プログラミング・パーツ」、河西 朝雄、
(株) ナツメ社、1994
- A5) 「かんたんプログラミング Visual Basic.NET 応用編」、田中 亨、
(株) オーム社、2002
- A6) 「Visual Basic リファレンス・ブック」、相沢 文雄、
(株) ナツメ社、1994
- A7) 「プログラミング Visual Basic.Net Vol.2 活用編」、Francesco Balena、
(株) ドキュメントシステム 訳、日経BPソフトプレス、2002
- A8) 「Visual Basic 2005 [実践]プログラミングテクニック」、谷尻 かおり、
技術評論社、2007

 数値計算・統計解析・グラフィックス

- B1) 「数学公式・数表ハンドブック」、スピーゲル 著、氏家 勝巳 訳、
マグローヒル ブック (株)、1984
- B2) 「数値解析とその応用」、名取 亮、
コロナ社、1992
- B3) 「線形計算」、名取 亮、
朝倉書店、1993
- B4) 「コンピュータグラフィックス講義」、青木 由直、
コロナ社、2000
- B5) 「新数値計算」、福井 義成 他、
共立出版 (株)、2001
- B6) 「Visual Basicによる工学計算プログラム」、黒田 英夫、
CQ出版社、2001
- B7) 「Visual Basicによる数値解析プログラム」、黒田 英夫、
CQ出版社、2002
- B8) 「Web用3D-CG言語 X3D XML版」、赤間 世紀、
工学社、2007
- B9) 「Blender 3DCG パーフェクトバイブル2013」、近藤 一貴、
(株) 晋遊舎、2013
- B10) 「基礎からのFreeCAD」、坪田 遼、
工学社、2016

<C> 有限要素法・差分法・工学一般

- C1) 「材料力学 (下巻)」、鶴戸口 英善 他、
裳華房、日本機械学会、1966
- C2) 「マトリックス有限要素法」、O. C. Zienkiewicz 他、吉識 雅夫 監訳、

- (株) 培風館、1970
- C3) 「有限要素プログラミング」、E.Hinton 他、川井 忠彦 監訳、丸善(株)、1981
- C4) 「マイコンによる有限要素解析」、戸川 隼人、(株) 培風館、1982
- C5) 「流れと熱伝導の有限要素法入門」、矢川 元基、(株) 培風館、1983
- C6) 「有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析」、矢川 元基 他、(株) サイエンス社、1987
- C7) 「The Finite Element Method (Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis)」、Thomas J.R.Hughes、Dover Publications、2000
- C8) 機械工学便覧A5「材料力学」、日本機械学会編、日本機械学会、2001
- C9) 「The Finite Element Method in Electromagnetics」、Jianming Jin John Wiley & Sons、2002
- C10) 「Visual Basicによる3次元熱伝導解析プログラム」、黒田 英夫、CQ出版社、2003
- C11) 「弾塑性力学の基礎」、吉田 総仁、共立出版(株)、2005
- C12) 「基本からわかる有限要素法」、邵 長城、森北出版(株)、2008