
* 「2D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

「2次元構造解析K」の構造データと非線形弾性の材料データを用いて、軸対称を含む2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、「2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、スカイライン法ソルバーを採用しています。スカイライン法は、バンドマトリックス法よりも使用メモリー容量が少なく済みます。

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、「2次元構造解析K」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 -----	8
第3章 データの準備 -----	12
第4章 「材料データ」処理プログラム -----	16
第5章 「熱応力条件データ」処理プログラム -----	21
第6章 「計算」プログラム -----	35
第7章 「後処理」プログラム -----	42
第8章 板の曲げの計算例 -----	59
第9章 軸対称体の計算例 -----	66
[参考文献] -----	78

第1章 有限要素法

有限要素法の構造解析については、「2次元構造解析K」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に示す四角形8節点のアイソパラメトリック要素を使用します。同図で節点2、4、6、8は各辺の midpoint にあり、中間節点と呼ばれます。各辺は直線でも曲線（円弧）でも構いません。ガウス積分点は図の9点を使用します。なお、同図では平面問題として全体座標をXY座標で示していますが、軸対称問題ではRZ座標となります（以下同様）。

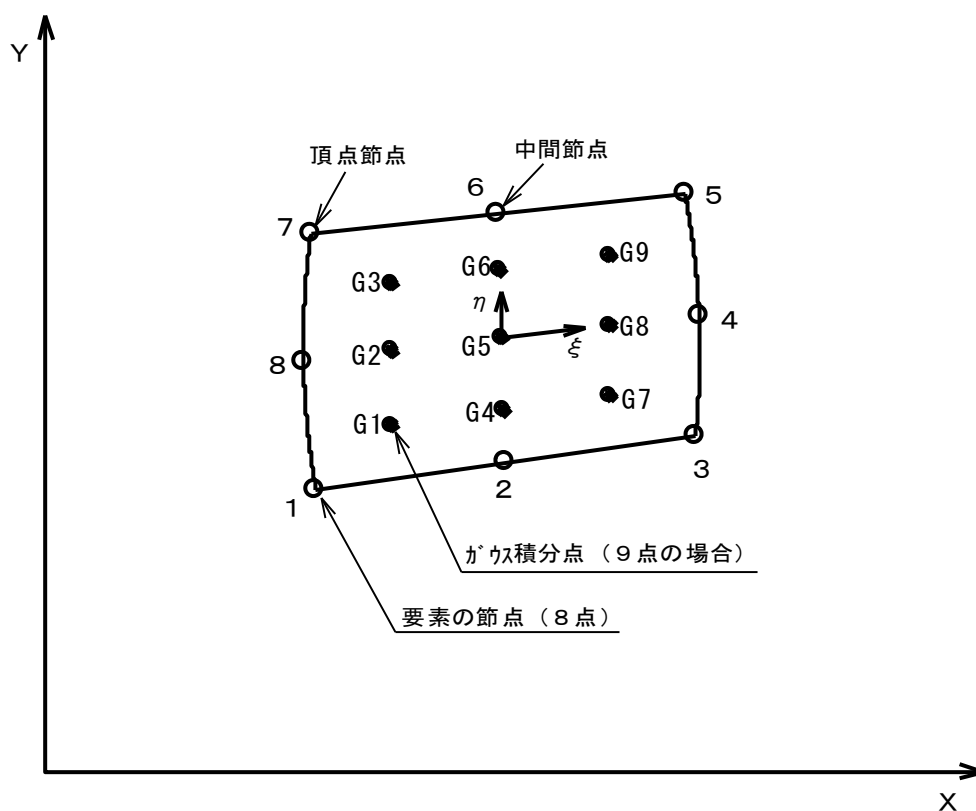


図1-1 四角形8節点要素

図1-1に示す無次元化された局所座標 ξ η を用いて、8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、8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、「2次元構造解析K」の構造データに設定された値を用います。

先ず、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。

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

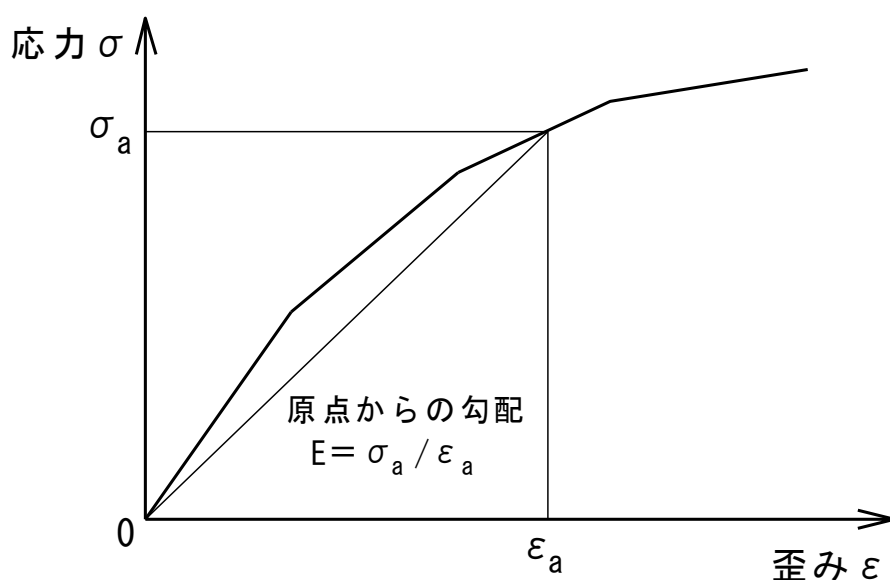


図1-2 非線形弾性の説明図

1.3 相当歪みの計算式

各問題タイプの相当歪み ε_a の計算式を以下に示します。

1) 平面応力問題

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

2) 平面歪み問題

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

3) 板の曲げ問題

$$\varepsilon_a = \sqrt{\frac{2}{9} \left\{ (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \frac{3}{2} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \right\}} \quad (1-4)$$

4) 軸対称問題

$$\varepsilon_a = \sqrt{\frac{2}{9} \left\{ (\varepsilon_r - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_\theta)^2 + \frac{3}{2} \gamma_{xy}^2 \right\}} \quad (1-5)$$

1.4 Mises応力の計算式

最終的に解が収束した後、各節点のMises応力 σ_{Mises} を計算します。各問題タイプのMises応力の計算式を以下に示します。

1) 平面応力問題

$$\sigma_{\text{Mises}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_z^2 + 3 \tau_{xy}^2} \quad (1-6)$$

2) 平面歪み問題

$$\sigma_{\text{Mises}} = \sqrt{\frac{1}{2} \{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 6 \tau_{xy}^2 \}} \quad (1-7)$$

3) 板の曲げ問題

$$\sigma_{\text{Mises}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)} \quad (1-8)$$

4) 軸対称問題

$$\sigma_{\text{Mises}} = \sqrt{\frac{1}{2} \{ (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + 6 \tau_{rz}^2 \}} \quad (1-9)$$

1.5 平面応力問題における熱応力の解析

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。ここでは、平面応力問題について説明します。

まず初期歪みは次の式で表わされます。

$$\{\varepsilon_0\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \gamma_{xy0} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\alpha T \\ -\alpha T \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1-10)$$

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。

$$\begin{aligned} \{\sigma_0\} &= \begin{Bmatrix} \sigma_{x0} \\ \sigma_{y0} \\ \tau_{xy0} \end{Bmatrix} = [D] \{\varepsilon_0\} \\ &= \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\alpha T \\ -\alpha T \\ 0 \end{Bmatrix} \\ &= \begin{Bmatrix} -a \\ -a \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (1-11)$$

ただし、 $\{\sigma_0\}$ ：初期応力
 $[D]$ ：弾性マトリックス
 E ：ヤング率
 ν ：ポアソン比

$$a = \frac{E \alpha T}{1 - \nu} \quad (1-12)$$

(1-11) 式の初期応力から等価節点荷重は次式で計算できます。

$$\begin{aligned} \{F_{e0}\} &= - \int [B]^T \{\sigma_0\} dV \\ &= \int \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial X} & 0 & \frac{\partial}{\partial Y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial Y} & \frac{\partial}{\partial X} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a \\ a \\ 0 \end{Bmatrix} dV \\ &= \int \begin{Bmatrix} \frac{\partial a}{\partial X} \\ \frac{\partial a}{\partial Y} \end{Bmatrix} dV \end{aligned} \quad (1-13)$$

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、(1-13) 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ないます。

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。

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} + \{\sigma_0\} \quad (1-14)$$

ただし、 $\{\sigma\}$ ：応力ベクトル

$\{\varepsilon\}$ ：歪みベクトル

1.6 平面歪み問題における熱応力の解析

前節の平面応力問題における(1-10) 式～(1-12) 式の替わりに次の式を使用します。それ以外は同じです。

$$\{\varepsilon_0\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \gamma_{xy0} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -(1 + \nu) \alpha T \\ -(1 + \nu) \alpha T \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1-15)$$

$$\begin{aligned}
\{\sigma_0\} &= \begin{Bmatrix} \sigma_{x0} \\ \sigma_{y0} \\ \tau_{xy0} \end{Bmatrix} = [D] \{\varepsilon_0\} \\
&= \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -(1+\nu)\alpha T \\ -(1+\nu)\alpha T \\ 0 \end{Bmatrix} \\
&= \begin{Bmatrix} -a \\ -a \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{1-16}
\end{aligned}$$

$$a = \frac{E\alpha T}{1-2\nu} \tag{1-17}$$

1.7 軸対称体問題における熱応力の解析

1.5節の平面応力問題における(1-10)式～(1-13)式の替わりに次の式を使用します。それ以外は同じです。

$$\{\varepsilon_0\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{r0} \\ \varepsilon_{z0} \\ \varepsilon_{\theta 0} \\ \gamma_{rz0} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\alpha T \\ -\alpha T \\ -\alpha T \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{1-18}$$

$$\begin{aligned}
\{\sigma_0\} &= \begin{Bmatrix} \sigma_{r0} \\ \sigma_{z0} \\ \sigma_{\theta 0} \\ \gamma_{rz0} \end{Bmatrix} = [D] \{\varepsilon_0\} \\
&= \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\alpha T \\ -\alpha T \\ -\alpha T \\ 0 \end{Bmatrix} \\
&= \begin{Bmatrix} -a \\ -a \\ -a \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{1-19}
\end{aligned}$$

$$a = \frac{E\alpha T}{1-2\nu} \tag{1-20}$$

$$\begin{aligned}
\{ \mathbf{F}_{e0} \} &= - \int [\mathbf{B}]^T \{ \sigma_0 \} dV \\
&= \int \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial R} & 0 & \frac{1}{R} & \frac{\partial}{\partial Z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial Z} & 0 & \frac{\partial}{\partial R} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a \\ a \\ a \\ 0 \end{Bmatrix} dV \\
&= \int \begin{Bmatrix} \frac{\partial a}{\partial R} + \frac{a}{R} \\ \frac{\partial a}{\partial Z} \end{Bmatrix} dV
\end{aligned} \tag{1-21}$$

第2章 プログラムの機能・構成

〔VBプロジェクト名〕 F E M 2 N L

本ソフトでは2次元の非線形弾性の構造解析を行ないます。表2-1に本ソフトの問題タイプを示します。同表のように、4種類の問題タイプに対応できます。また、熱応力解析と大変形問題は、「板の曲げ」を除く各問題タイプで可能です。

表2-1 「F E M 2 N L」の問題タイプ

問題タイプ	内 容	熱応力解析 の可否
1) 平面応力	平面問題で平面垂直応力なし	○
2) 平面歪み	平面問題で平面垂直歪みなし	○
3) 板の曲げ	薄板で平面垂直方向に曲げられるもの	×
4) 軸対称体	軸対称体で荷重変形するもの	○

注) 初期歪みは扱わない。 ○：可、×：不可

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。

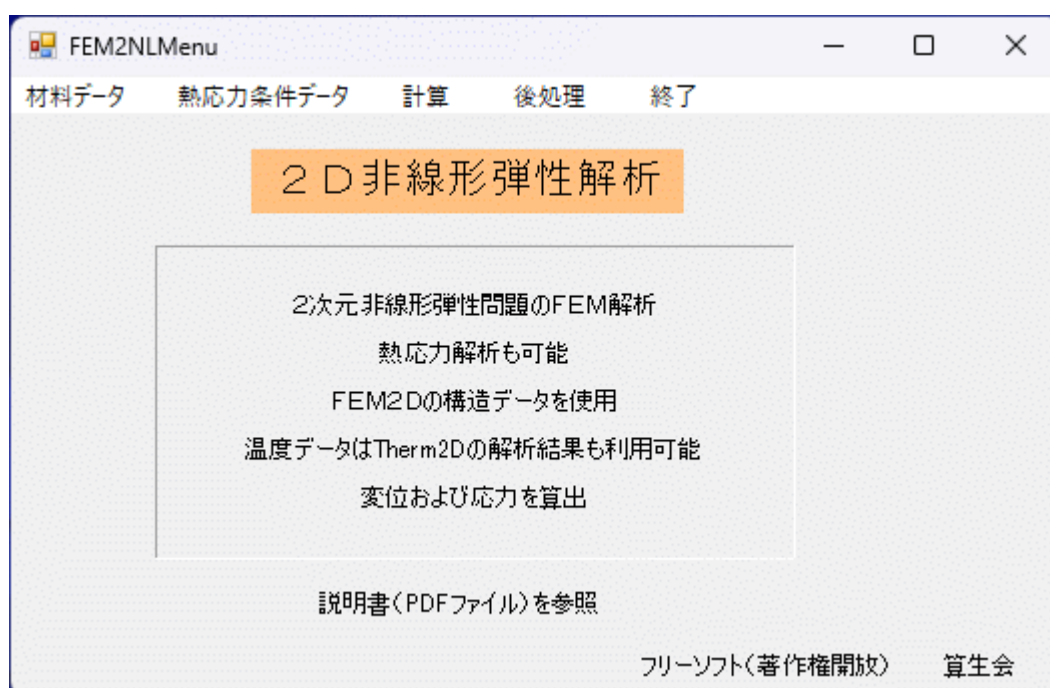


図2-1 「F E M 3 N L」ソフトのメニュー画面

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FEM2NLMenu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2次元構造解析(FEM2D)で作成しておく必要があります。また、2次元熱伝導解析(Therm2D)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。

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FEM2NLDat1とFEM2NLDat2、および「熱応力条件データ」のHSt2Dat1とHSt2Dat2は、各種データを画面入力するためのものです。特にFEM2NLDat2とHSt2Dat2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。

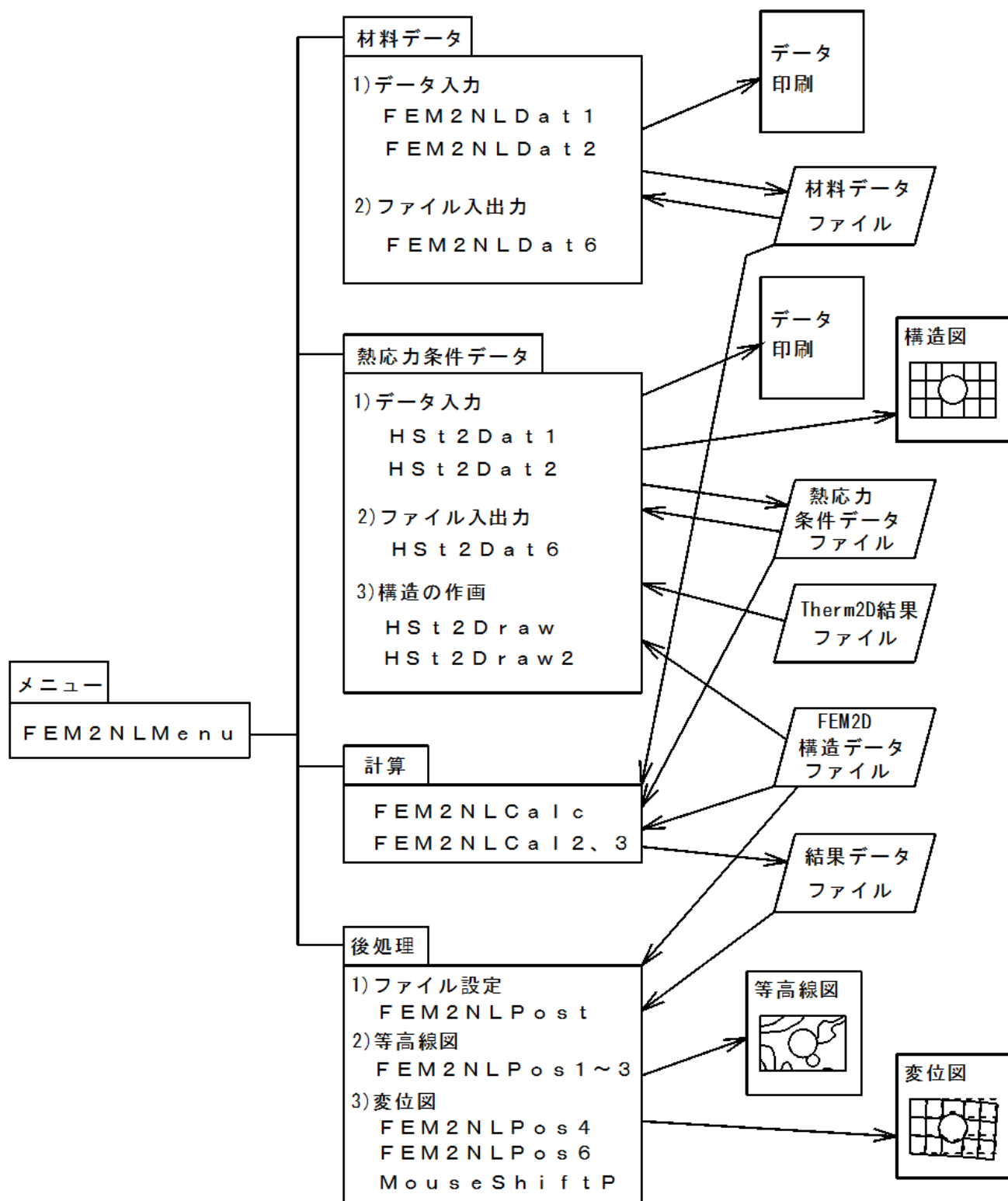


図2-2 「FEM2NL」ソフトのプログラム構成

表2-1 「FEM2NL」ソフトのファイルリスト

[全般]

ファイル名	内容
FEM2NLCom.vb	共通変数の宣言とサブルーチンの定義
FEM2NLMenu.vb	メニューの提示・選択

[材料データ]

ファイル名	内容
FEM2NLDat1.vb	データ仕様の入力
FEM2NLDat2.vb	各データの入力
FEM2NLDat6.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
HSt2Dat1.vb	データ仕様の入力
HSt2Dat2.vb	各データの入力
HSt2Dat6.vb	データファイルの入出力
HSt2Draw.vb	構造の作画
HSt2Draw2.vb	構造図でのデータ入力

[計算]

ファイル名	内容
FEM2NLCalc.vb	計算に使用するファイルの設定
FEM2NLCal2.vb	計算条件の設定
FEM2NLCal3.vb	解析計算の実行

[後処理]

ファイル名	内容
FEM2NLPost.vb	後処理に使用するファイルの設定
FEM2NLPos1.vb	等高線図作画の変数の設定
FEM2NLPos2.vb	等高線図の仕様設定
FEM2NLPos3.vb	等高線図の作画実行
FEM2NLPos4.vb	変位図の作画実行（板の曲げ）
FEM3NLPos6.vb	変位図の作画実行
MouseShiftP.vb	マウス回転操作の説明（板の曲げ）

第3章 データの準備

構造データについては、「2次元構造解析K」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 uses。
- 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、構造データの材料数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 が区間 m をはみ出した場合は区間 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。

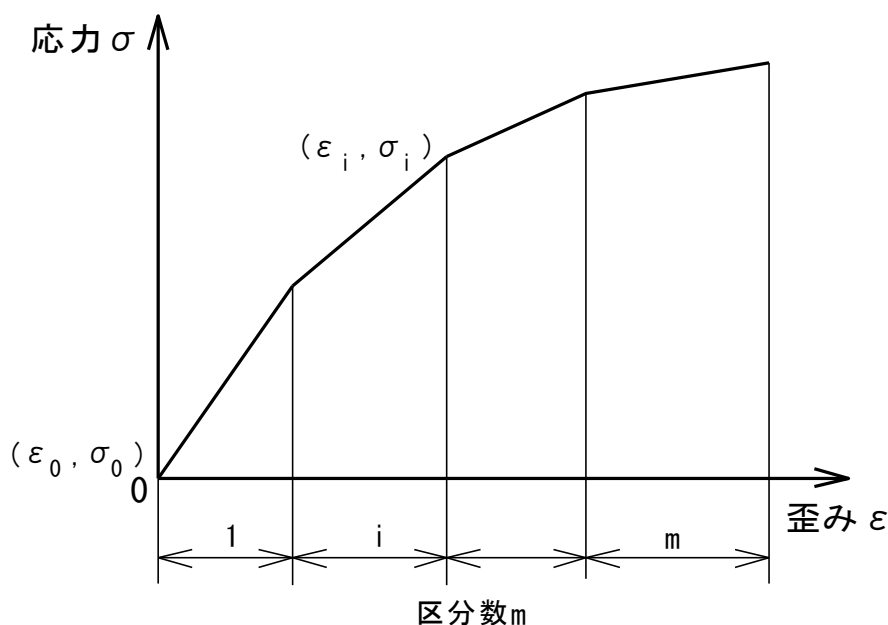
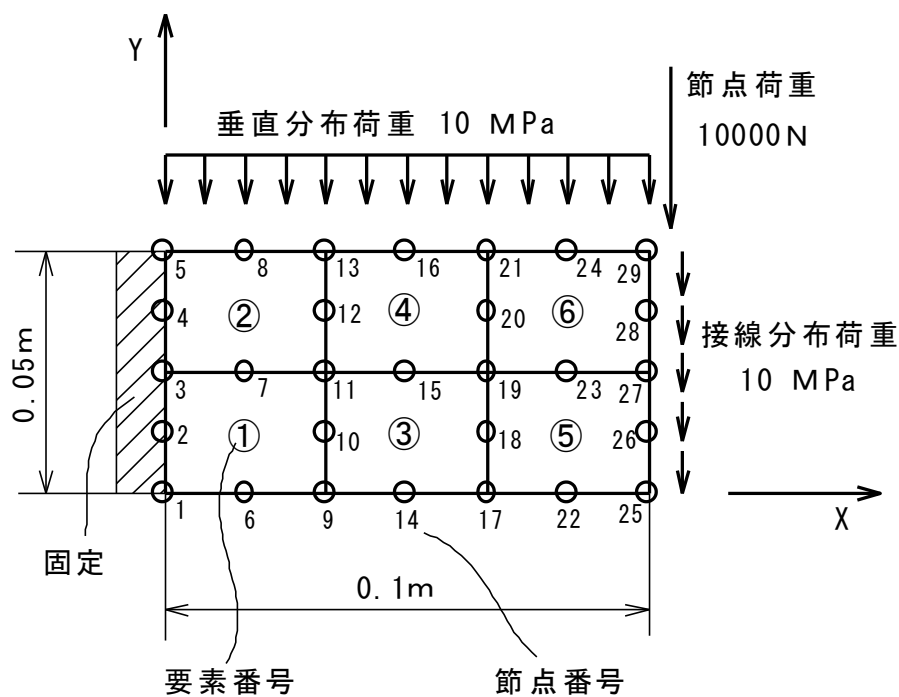


図3-1 非線形弾性の歪み・応力グラフ

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、0.05m×0.1mの長方形平板で、6要素から成ります。そして、左端の辺がX,Y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 : 2.1×10^5 MPa
 ポアソン比 : 0.3 板厚 : 0.01m

図3-2 テスト用構造モデル（平面応力）

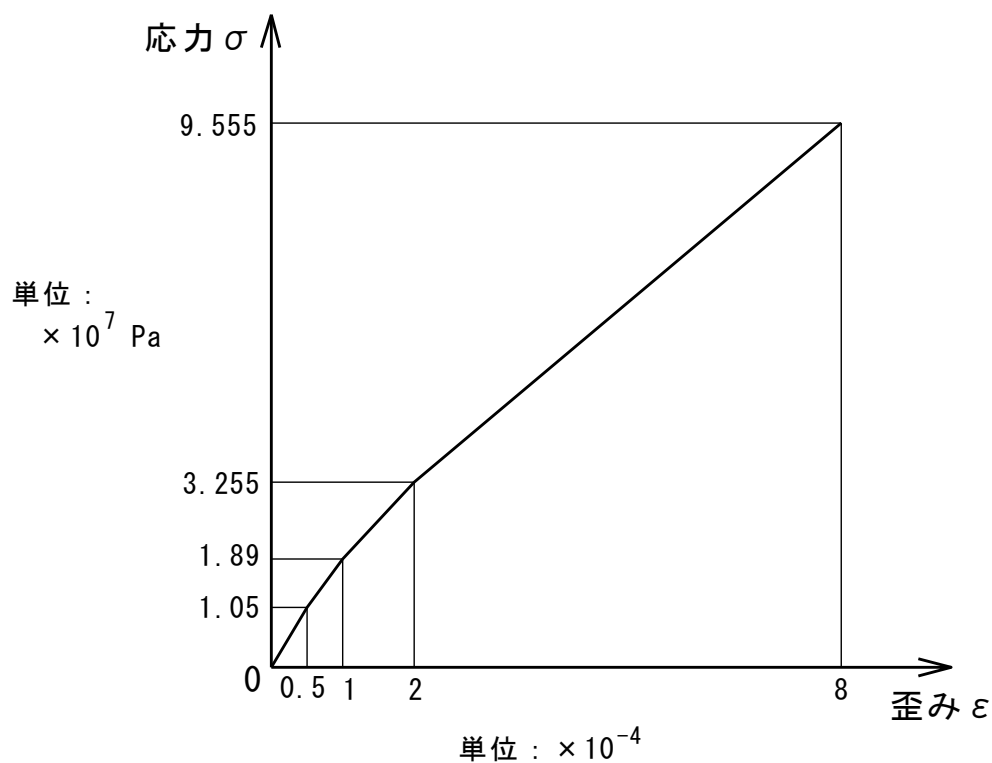


図3-3 テスト用歪み・応力グラフ

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。

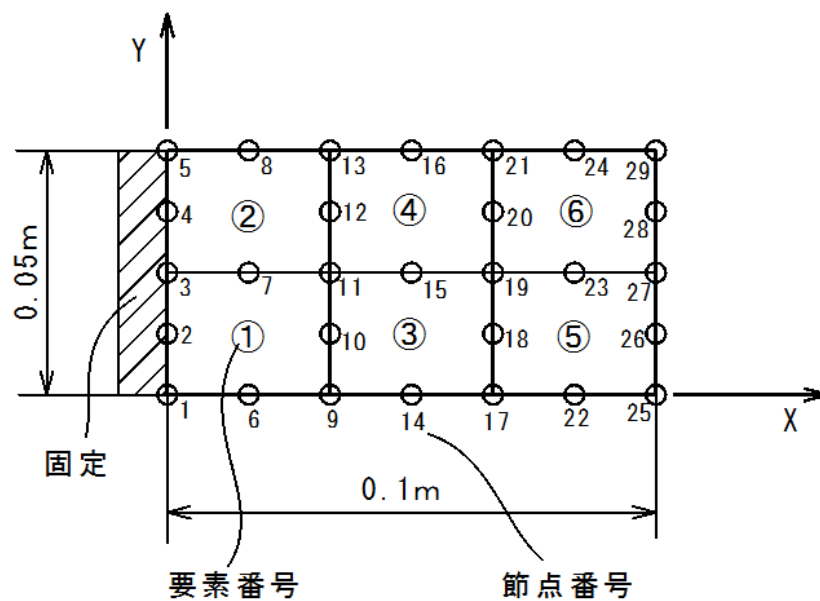
熱応力解析では、さらに表3-1のデータを準備する必要があります。同表の節点温度データについては、全節点を同一温度に設定する場合は問題ありませんが、各節点温度を変える場合はそれぞれの節点温度の値を準備します。また、「2次元熱伝導解析 (Therm 2D)」の結果データファイルを直接読み込むこともできます。

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	Therm2D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	Therm2D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とって説明します。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} /°C 板厚 : 0.01m

[初期節点温度] 100°C 一律

[負荷節点温度] 200°C 一律

図3-4 熱応力解析テストモデル（平面応力）

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。

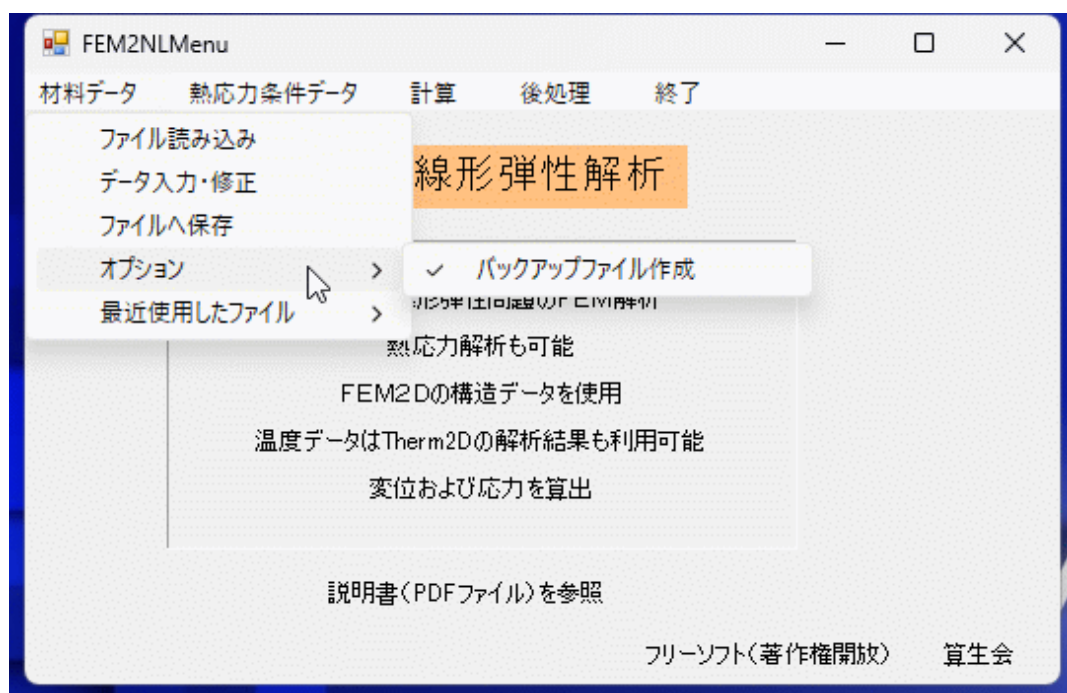


図4-1 「材料データ」サブメニュー画面

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。

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。

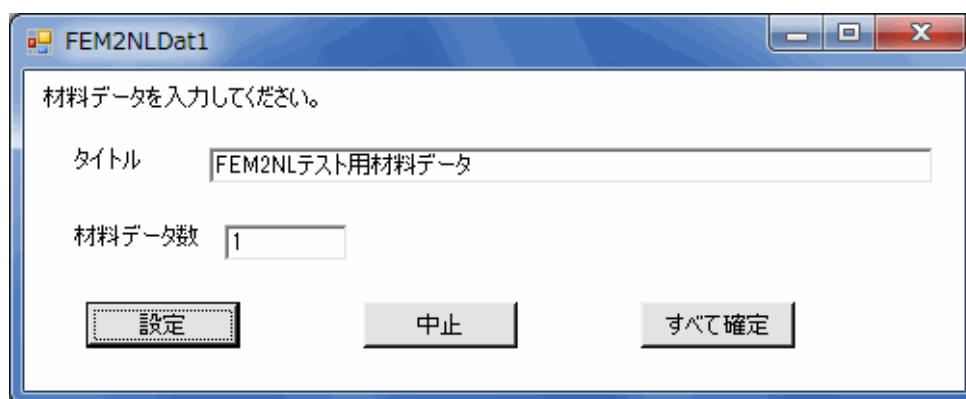


図4-2 データ仕様入力画面

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。

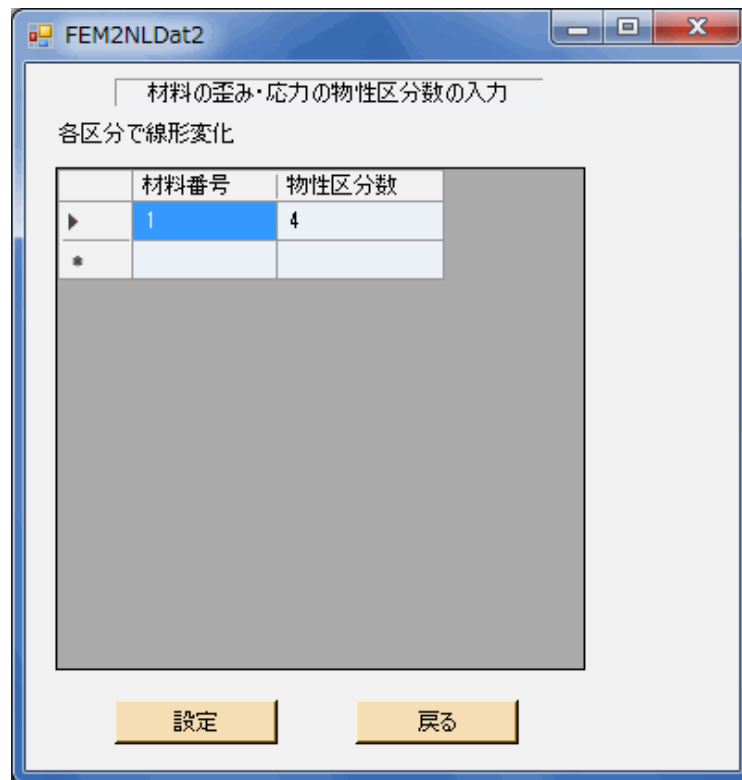


図4-3 物性区分数の入力画面

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った場合は、図4-2のデータ仕様入力画面に戻ります。



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、コモン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、2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, FEM2NL
FEM2NL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。

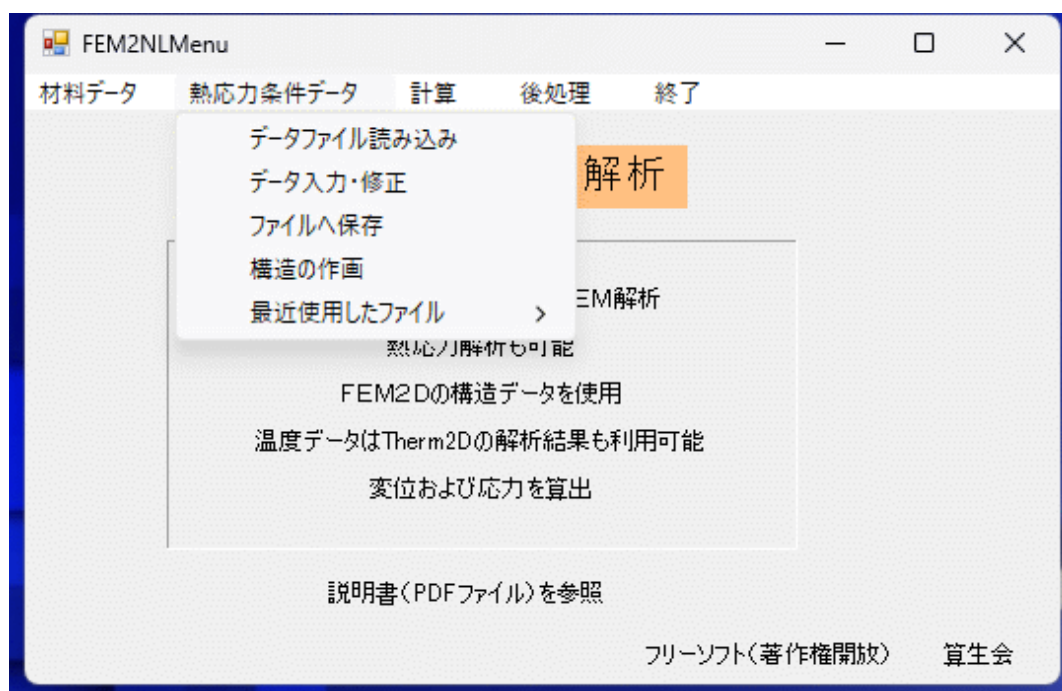


図5-1 「熱応力条件データ」サブメニュー画面

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「FEM2D構造ファイル名」を設定します。

◇「FEM2D構造ファイル名」とは、2次元構造解析（FEM2D）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。

◇「FEM2D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FEM2D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。
 - ◇2次元熱伝導解析（Therm2D）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、Therm2D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すべての初期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。

材料番号	線膨張係数
1	1.07E-05

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

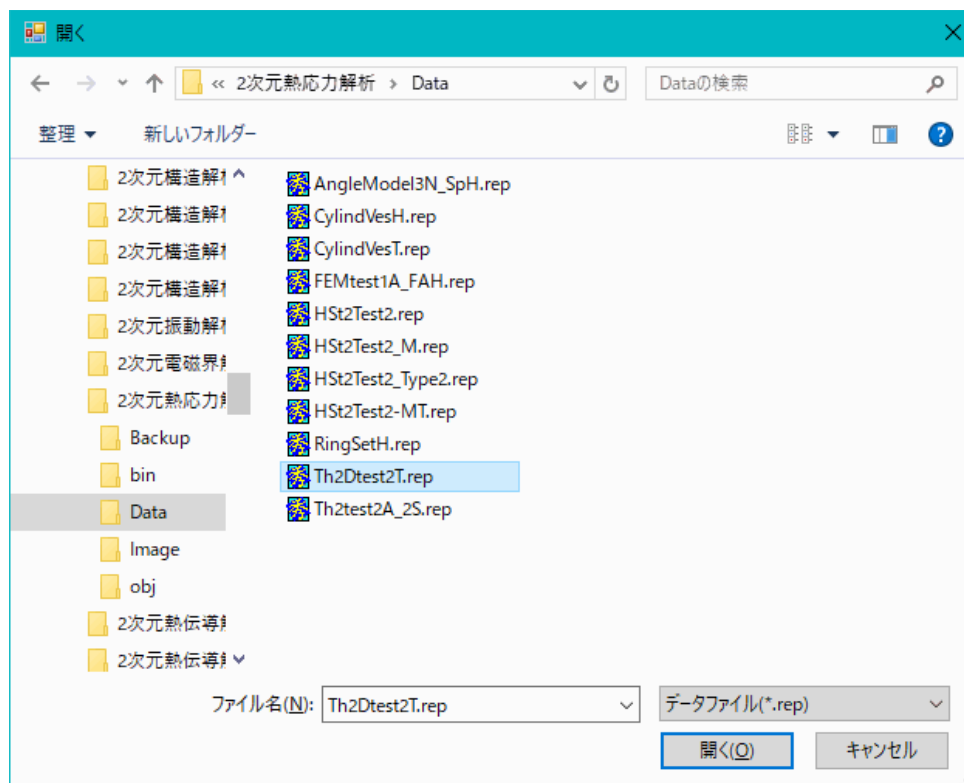


図5-6 Therm2D結果ファイル選択のコモンダイアログ画面

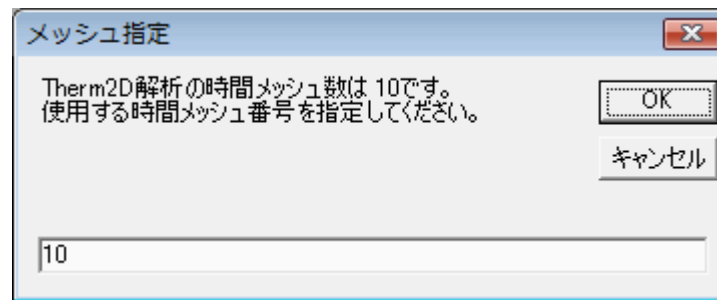


図5-7 非定常温度解析結果の時間メッシュ指定画面（ステップ数1の場合）

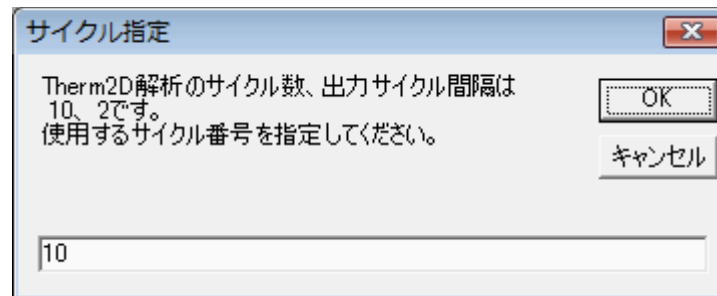


図5-8 非定常温度解析結果のサイクル番号指定画面（ステップ数2以上の場合）

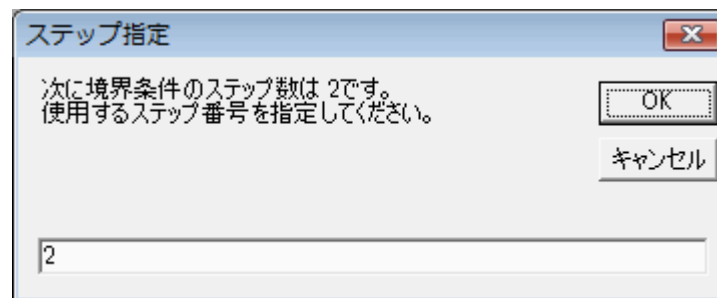


図5-9 非定常温度解析結果のステップ番号指定画面（ステップ数2以上の場合）

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ったなら、「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。

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ったなら、「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。



節点番号	負荷温度
1	200
2	200
3	200
4	200
5	200
6	200
7	200
8	200
9	200
10	200
11	200
12	200
13	200
14	200
15	200
16	200

図5-10 負荷節点温度データ入力画面



材料番号	初期温度	負荷温度
1	100	200
*		

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、FEM2D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。

◇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5-12に入力データファイル例を示します。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構造解析のファイル名を示しています。ディレクトリーを含めて指定が間違っているとエラーになります。もし指定が違っている場合は、エディター等により修正して再利用してください。

```
プログラム名, HeatSt2D
2次元熱応力テスト（平面応力）
[FEM2D構造ファイル], C:\¥VB2022¥2D非線形弾性解析¥Data¥FEMtest1A. dat ①
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
. . . . .
. . . . .
24, 100, 200
25, 100, 200
26, 100, 200
27, 100, 200
28, 100, 200
29, 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、構造図が画面に作画されます。図5-13に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本画面の左側に、「番号表示の項目」のパラメーターを表示してあります。そのパラメーター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「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。
- ④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。
- ⑤マウスドラッグ矩形により、構造図の一部を拡大できます。

◇マウスドラッグ矩形は、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5-14のようにマウスドラッグ範囲の矩形が表示され、コモンダイアログで「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（8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。

- ⑥「番号表示の項目」は、「要素番号」、「節点番号」、「材料番号」の内、表示したい項目を重複選択できます。

◇「番号表示の文字サイズ」は任意の値に設定できます。

◇「要素番号」、「節点番号」、「材料番号」をすべて選択して、「再描画」させた部分拡大画面を図5-15に示します。ただし、本画面では、「番号表示の文字サイズ」を12に変更してあります。

- ⑦「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5-16と図5-17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。

- ⑧任意の要素を右クリックすると、図5-18のように当該要素の各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。

- ⑨「データ設定モード」を選択して、任意の要素を右クリックすると図5-19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。
- 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。
- ⑪「Ctrlキー+マウス」で矩形ドラッグすると、図5-20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。
- 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。



図5-13 構造作画の画面例

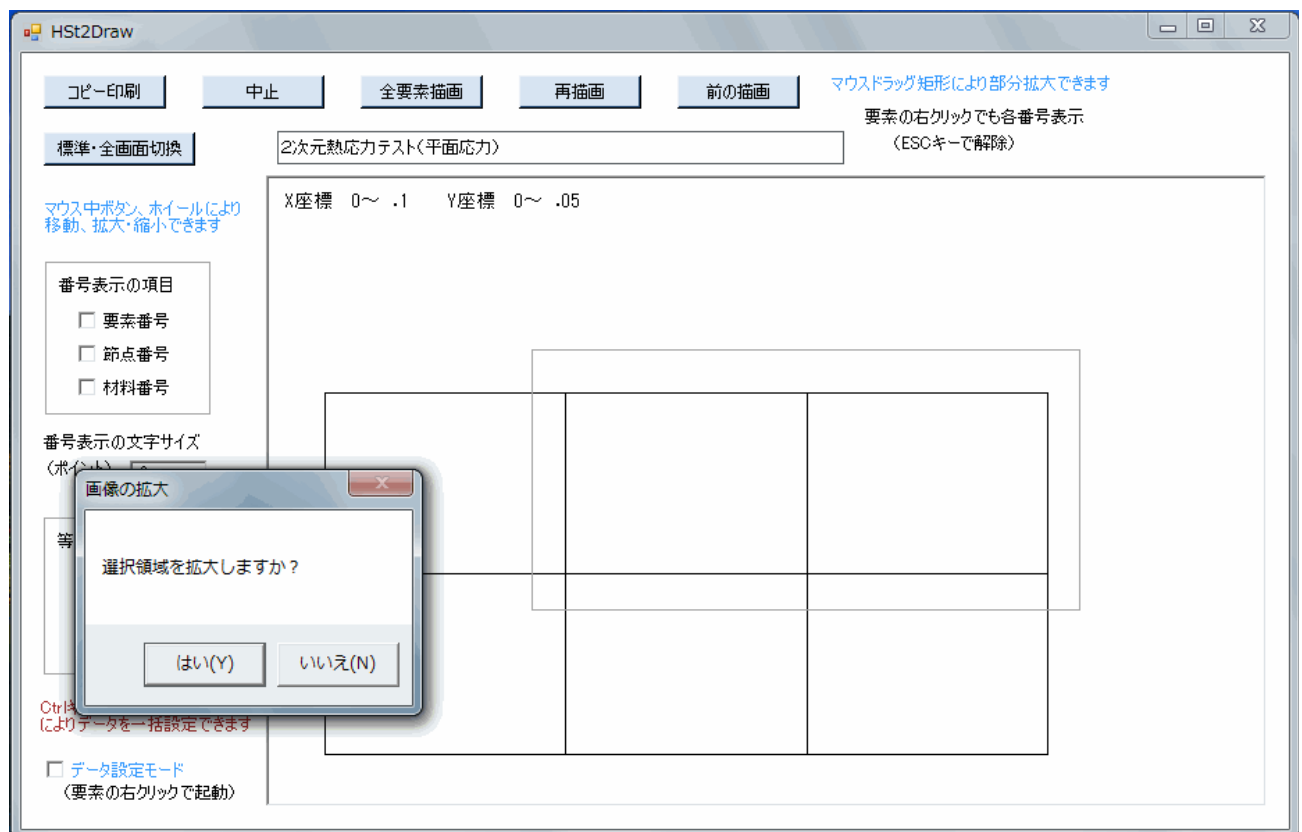


図5-14 構造作画における拡大領域選択例

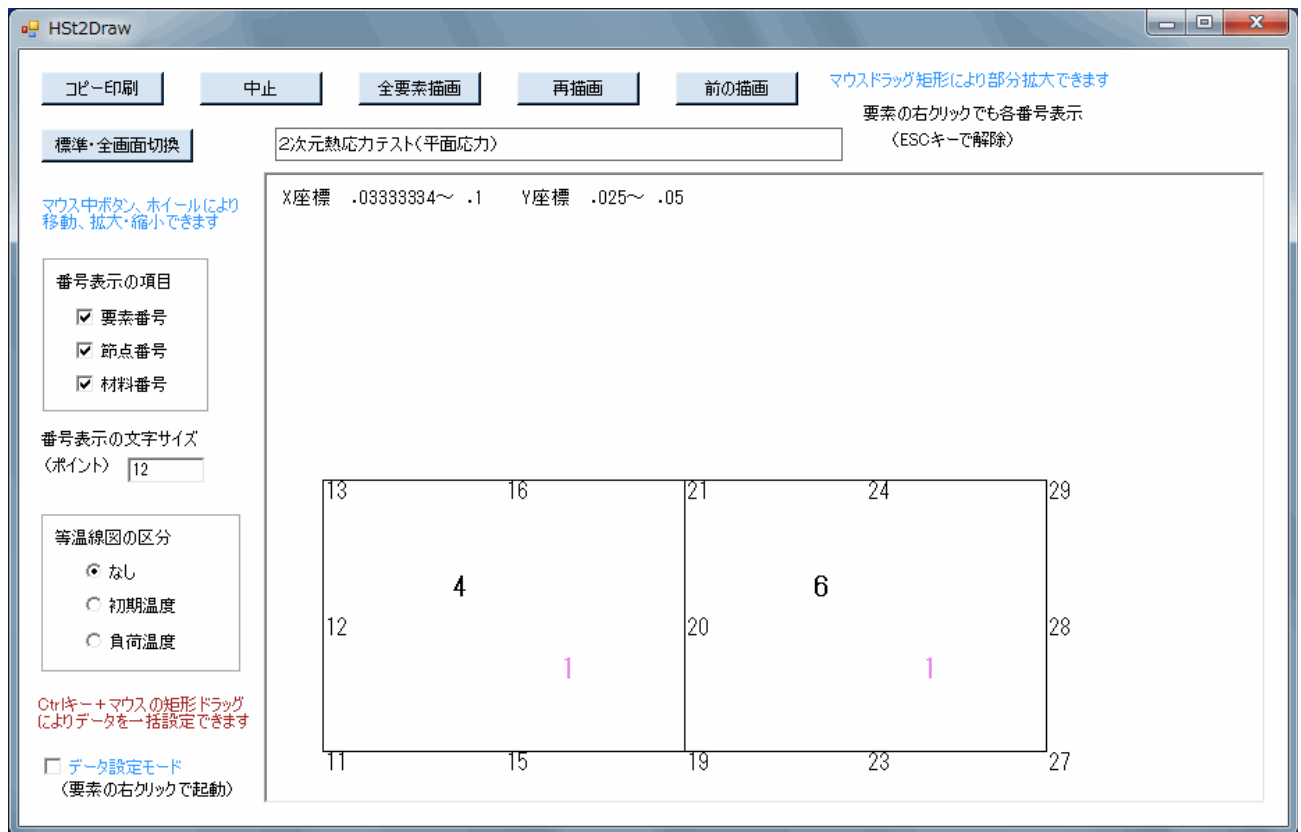


図5-15 構造作画における部分拡大例

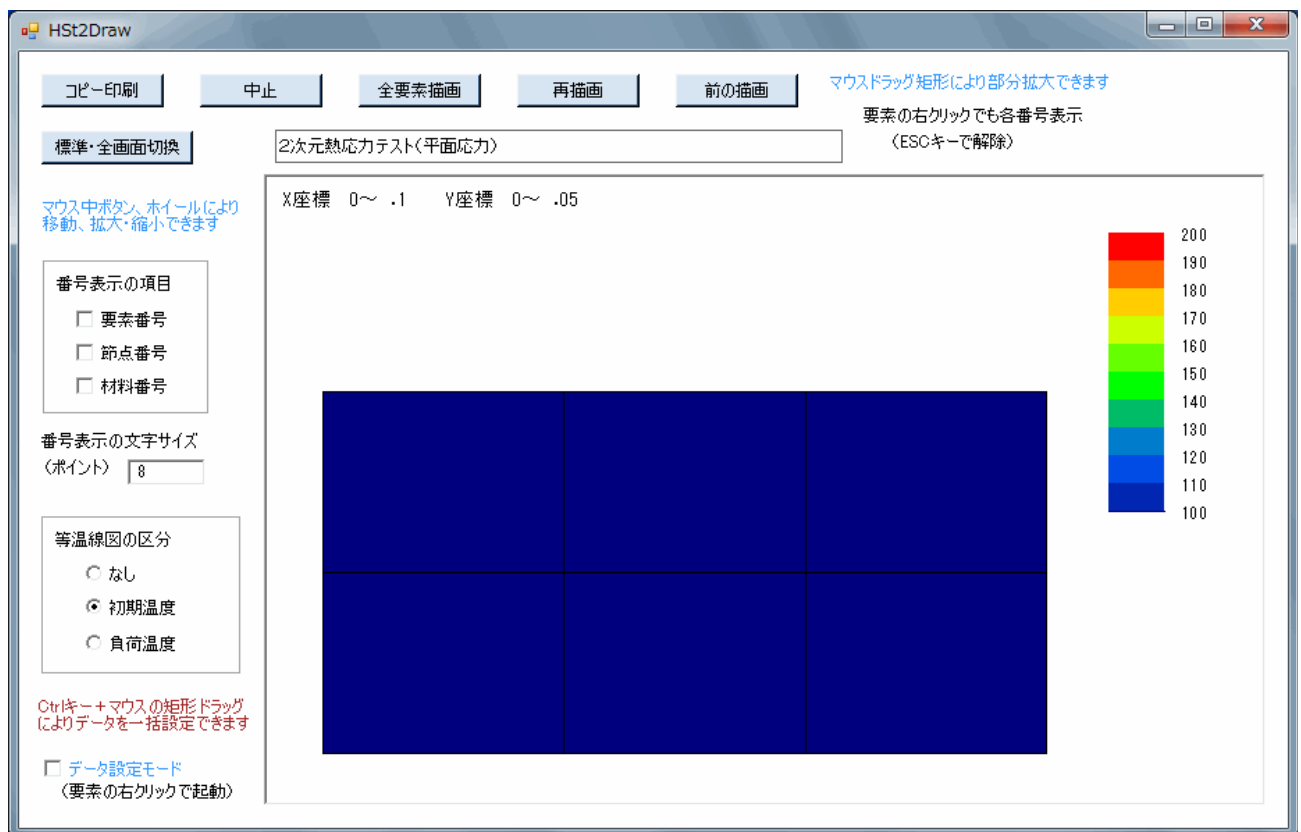


図5-16 構造作画の初期温度の等温線図例

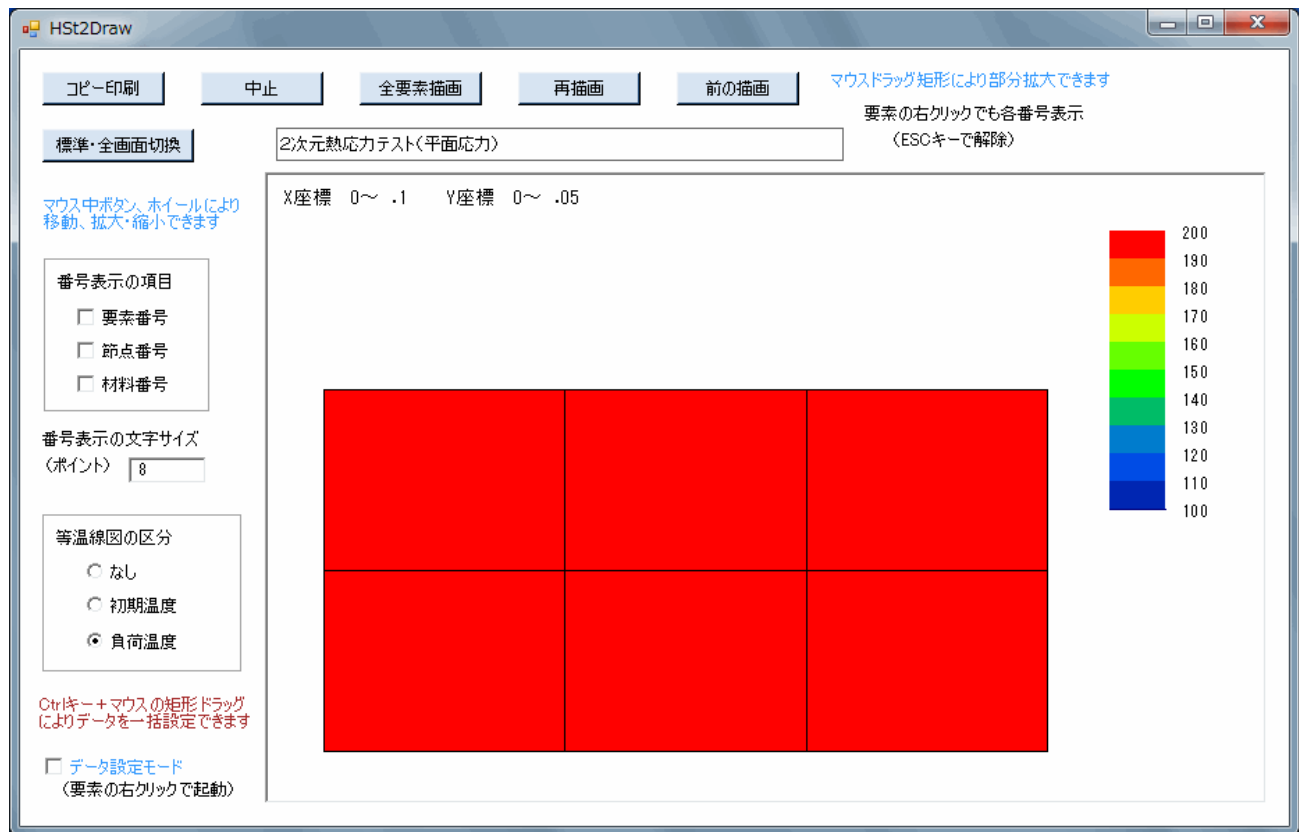


図5-17 構造作画の負荷温度の等温線図例

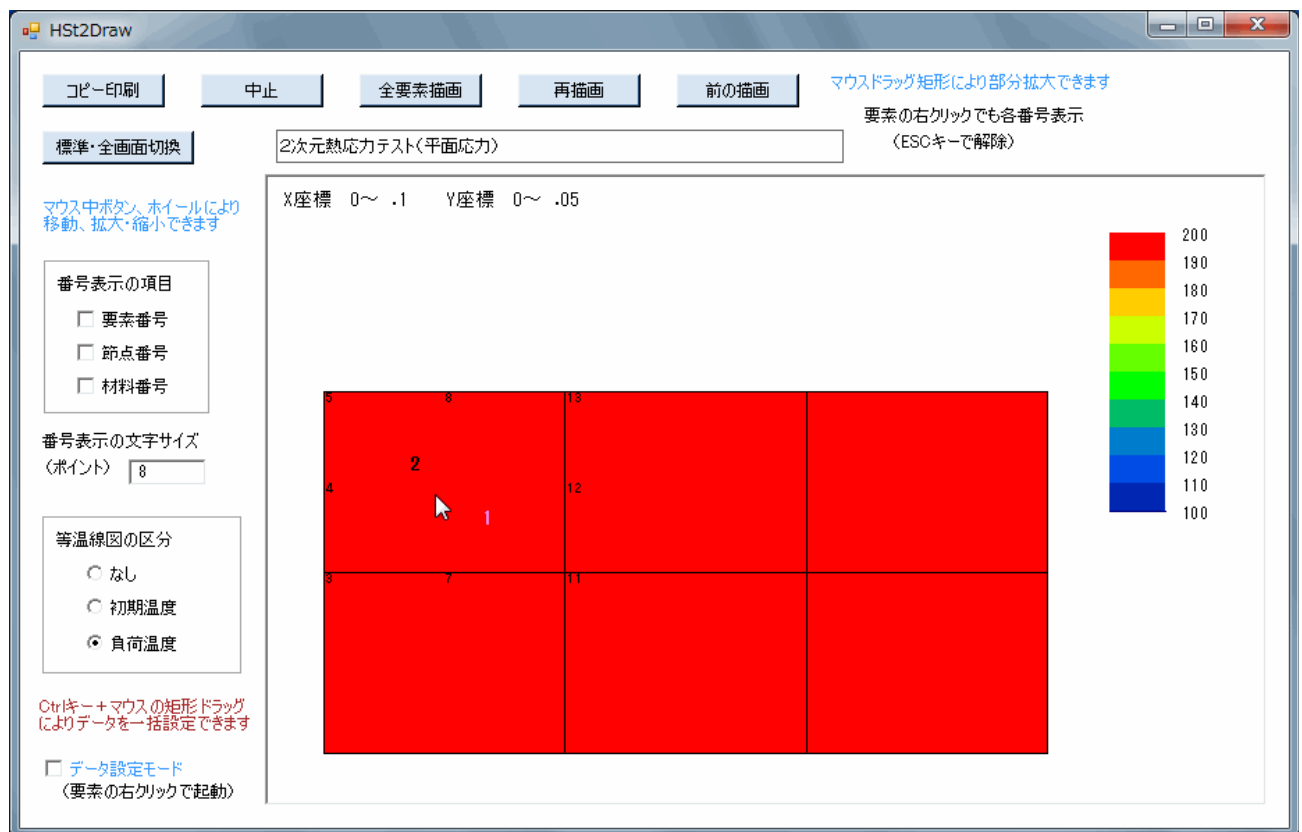


図5-18 構造作画における要素右クリック画面例

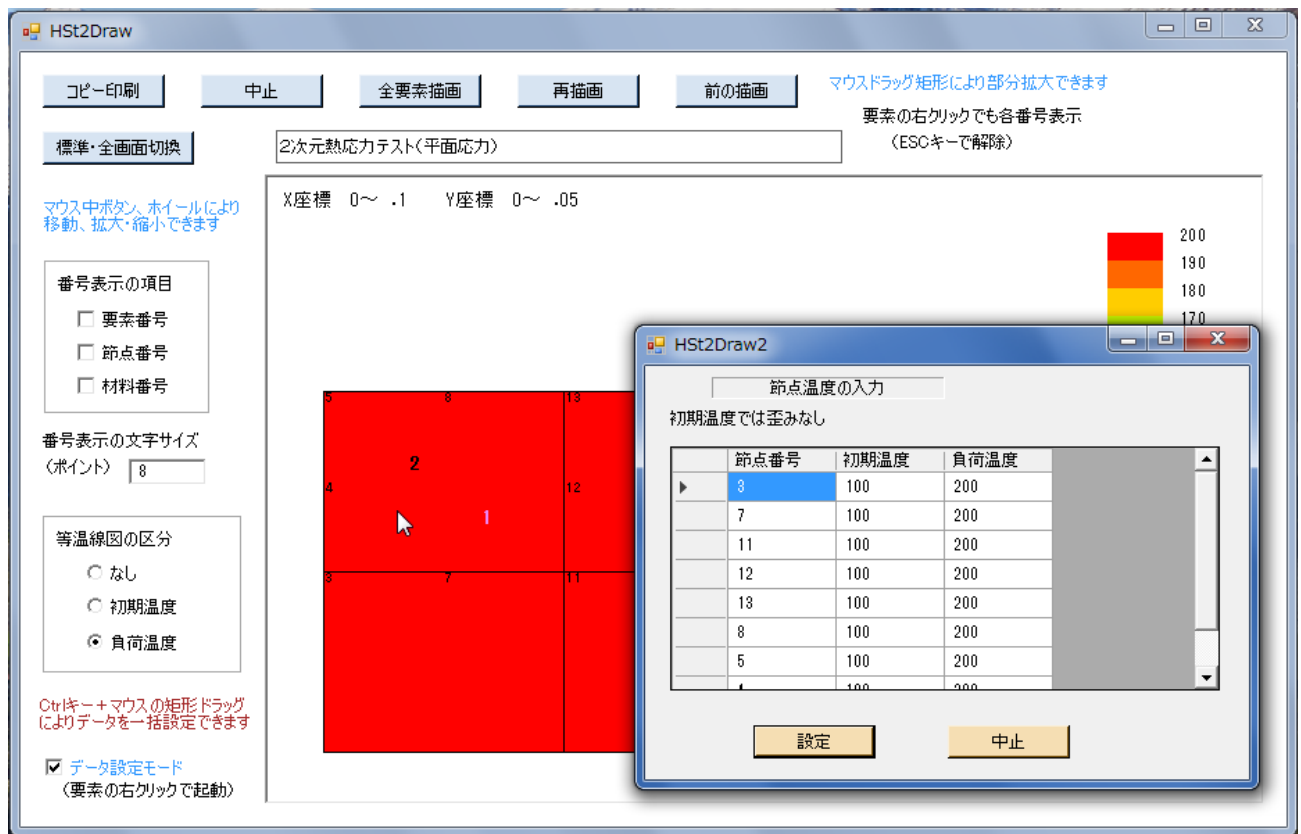


図5-19 構造作画のデータ設定モードにおける温度入力画面

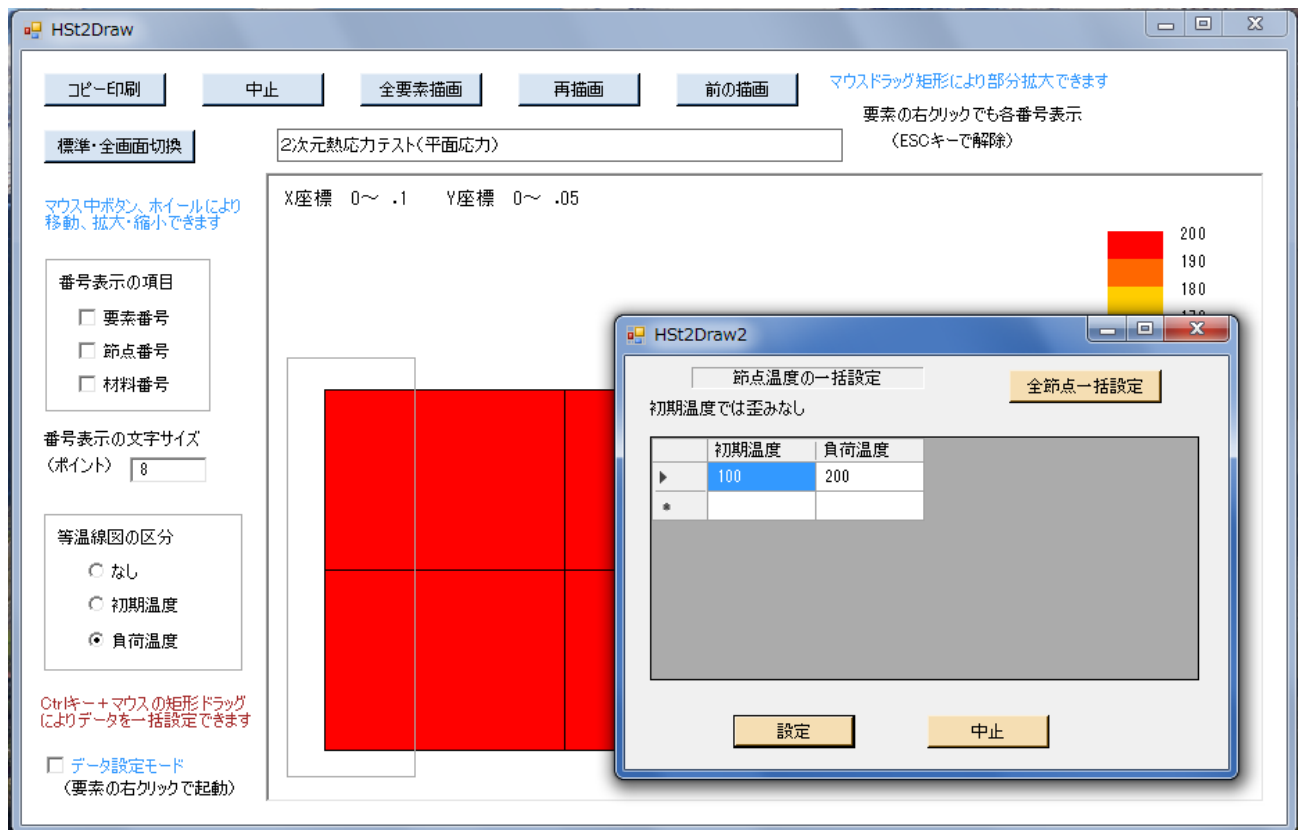


図5-20 構造作画の「Ctrlキー+マウス」ドラッグ矩形による一括設定の温度入力画面

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「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

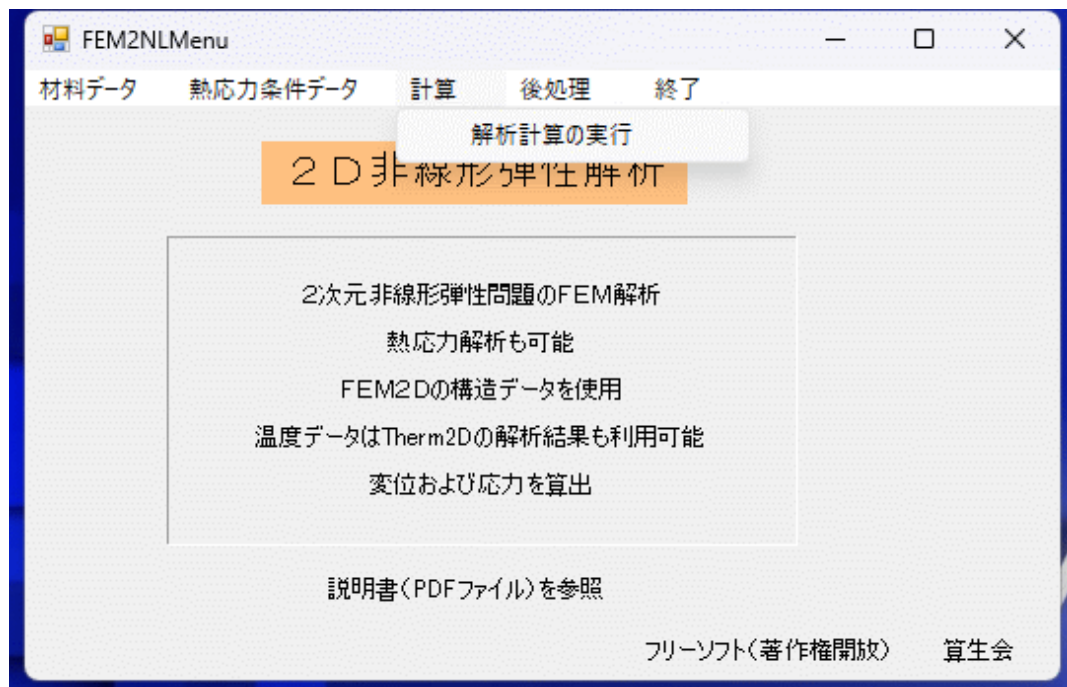


図6-1 「計算」サブメニュー画面

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「FEM2D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、「FEM2D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」の方には末尾が「NL. rep」の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（以下同様）。
- 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。

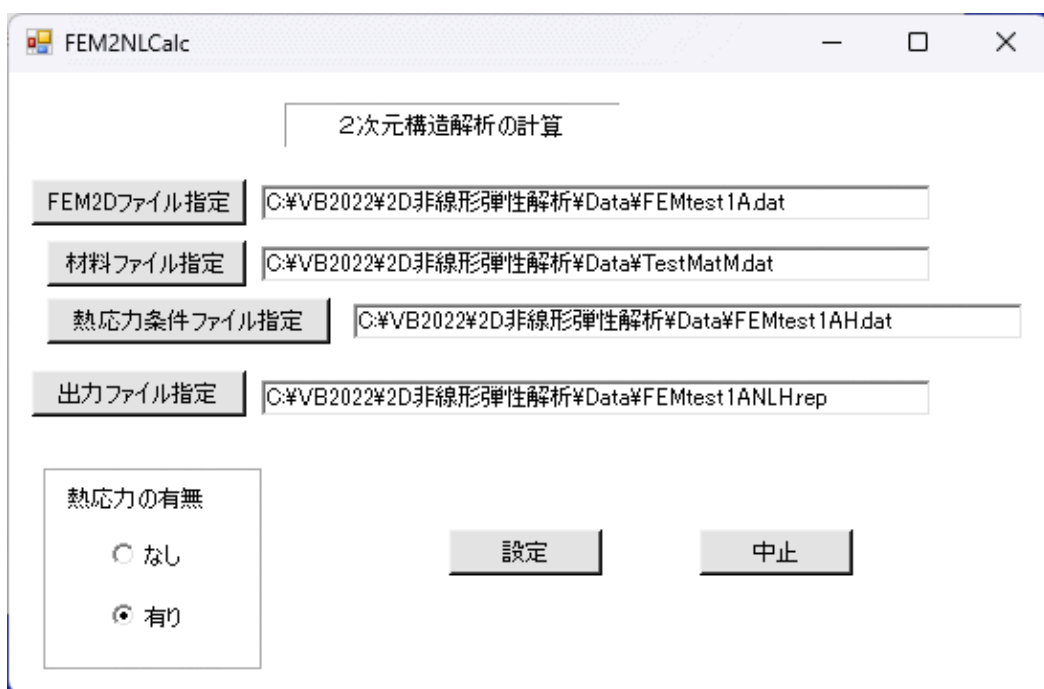


図6-2 「計算」 ファイル設定画面

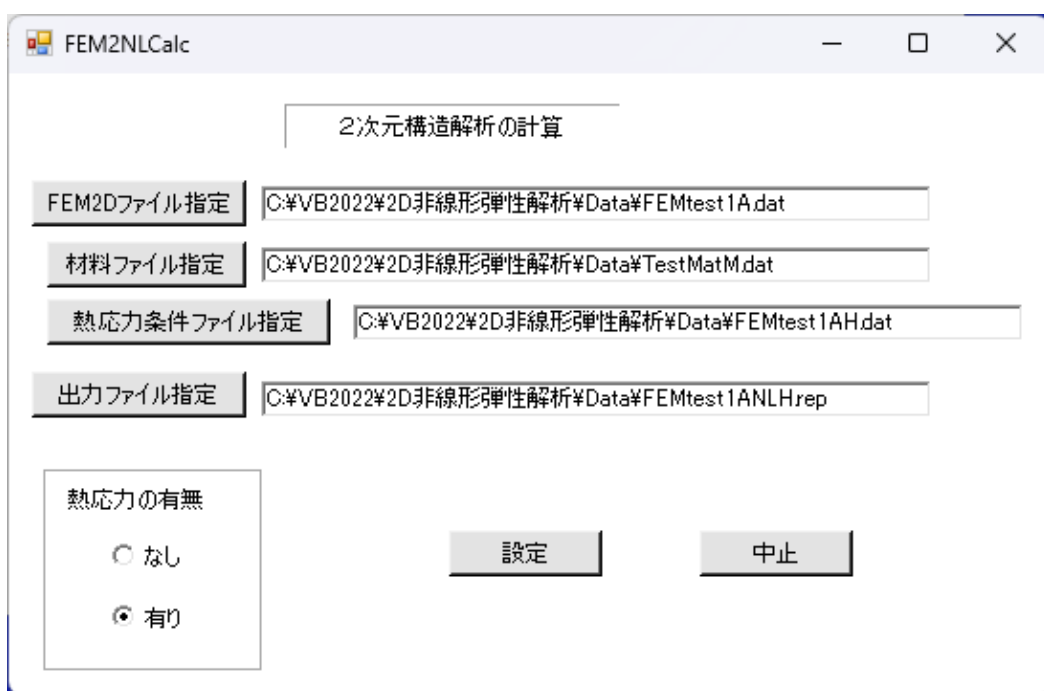


図6-3 「計算」 ファイル設定画面（熱応力有り）

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（板の曲げでは選択不可）。

◇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。

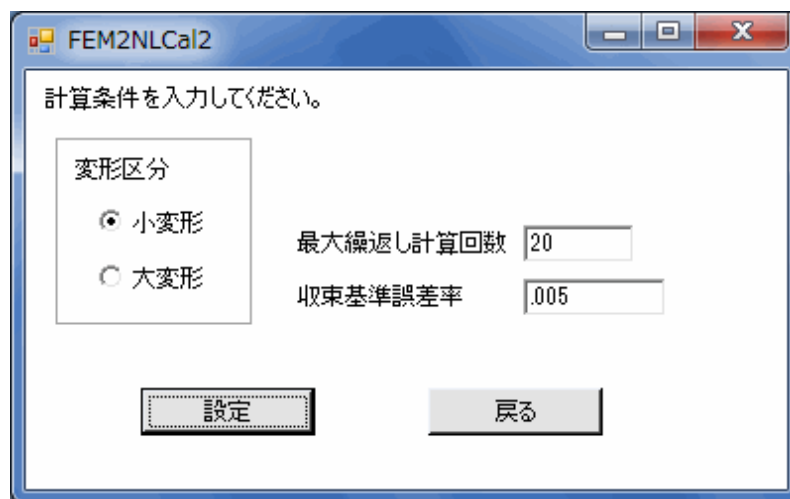


図6-4 計算条件入力画面

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、かかった計算時間も表示されますが、本テスト構造モデルでは0sとなっており、1s未満で終了しています。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。

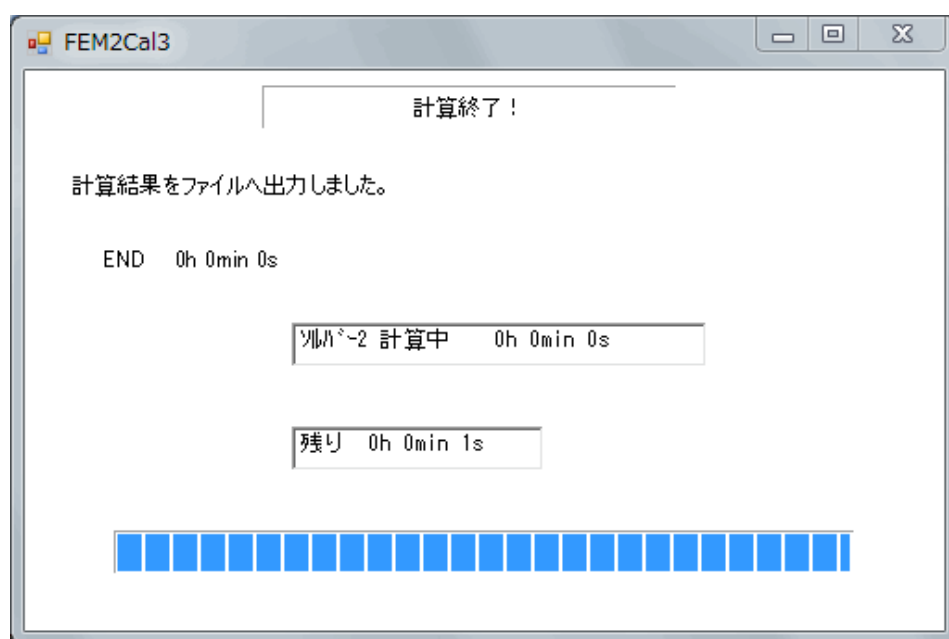


図6-5 計算終了画面



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バンド幅が22と出力されています。
- ②保存配列のインデックス数が855と出力されています。このインデックス数は、FEM行列（ハーフバンド）の要素の内、実際に保存された個数を意味します。
- ③収束計算回数は4回です。
- ④収束時の誤差率は0.004575884になっています。
- ⑤最大の相当歪みは0.002587869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になります。
- ⑥変位等の出力では、すべての節点について、各変位（ δX 、 δY ）が出力されています。
- ⑦本例では、節点29における下向き変位（Y方向で－符号）0.000654m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。
 - 注）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。
 - ◇ θ_{psl} は、2次元平面内の第1主応力方向のX軸（またはR軸）に対する角度（°）です。
- ⑩拘束節点の反力が出力されています。
 - ◇傾斜拘束節点については、別途、傾斜に垂直の反力が出力されます。
- 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最後に計算時間も出力されます（本例では0s）。

<< 2D非線形弾性解析の計算結果 >>

[FEM2Dデータファイル], C:\¥VB2022¥2D非線形弾性解析¥Data¥FEMtest1A. dat

片持ち梁モデル (幅0.05m×長さ0.1m×厚さ0.01m)

[材料データファイル], C:\¥VB2022¥2D非線形弾性解析¥Data¥TestMatM. dat

FEM2NLテスト用材料データ

*** 計算結果 ***

バンド幅, 22

保存配列のインデックス数, 855

収束計算回数, 4

誤差率, .004575884

最大の相当歪み, .002587869

** 変位等の出力 **

<節点番号、 δX 、 δY >

1, 0, 0, 0

2, 0, 0, 0

3, 0, 0, 0

4, 0, 0, 0

4, 0, 0

5, 0, 0

6, -6.370672E-05, -4.688175E-05

7, 6.853136E-08, -3.517033E-05

8, 6.422726E-05, -4.876445E-05

9, -.0001168904, -.0001241649

10, -5.344125E-05, -.0001164464

.....
.....

20, 8.670129E-05, -.0003495795

21, .00017821, -.0003532186

22, -.0001865355, -.0004846884

23, -1.01118E-06, -.0004849612

24, .0001963766, -.0004878953

25, -.0001887822, -.0006168414

26, -9.223905E-05, -.0006168594

27, -1.896395E-07, -.0006193397

28, 9.496818E-05, -.000634521

29, .0002101439, -.0006543184

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、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\sigma_{max}$ 、 $\sigma_{min}$ 、 $\tau_{max}$ 、 $\sigma_{mises}$ 、 $\theta_{ps}$ > ⑨
1, -4.941853E+08, -1.479156E+08, -8.027326E+07, -1.302116E+08, -5.118893E+08,
1.908389E+08, 4.607948E+08, -77.5627
2, -2.440258E+08, -7.300205E+07, -5.30547E+07, -5.788052E+07, -2.591473E+08,
1.006334E+08, 2.356012E+08, -74.09151
3, -725121.1, -344304.8, -3.76707E+07, 3.713646E+07, -3.820589E+07,
3.767118E+07, 6.525058E+07, -45.14478
4, 2.445493E+08, 7.314459E+07, -5.64919E+07, 2.614931E+08, 5.620082E+07,
1.026461E+08, 2.384136E+08, -16.69572
5, 4.981912E+08, 1.490165E+08, -8.681689E+07, 5.185857E+08, 1.28622E+08,
1.949819E+08, 4.67732E+08, -13.21987
. . . . .
. . . . .
25, 2.409648E+07, 2.736019E+07, -1488316, 2.793696E+07, 2.35197E+07,
2208629, 2.601117E+07, -68.81698
26, 7317900, -1.388434E+07, -2.28872E+07, 2.193993E+07, -2.850637E+07,
2.522315E+07, 4.381098E+07, -32.57346
27, -1.174681E+07, -8.414626E+07, -4.427676E+07, 9244824, -1.051379E+08,
5.719136E+07, 1.100519E+08, -25.36566
28, -3.333347E+07, -1.766317E+08, -4.409311E+07, -2.085294E+07, -1.891123E+08,
8.412966E+07, 1.795961E+08, -15.80414
29, 1.8113E+07, -1.947478E+08, -3.98714E+07, 2.533627E+07, -2.019711E+08,
1.136537E+08, 2.157578E+08, -10.26859
-----
** 拘束節点の反力 **                                     ⑩
<節点番号、 $F_x$ 、 $F_y$ >
1, 23907.4, 10583.2
2, 31942.09, -2077.46
3, 49.29437, 7090.058
4, -31554.46, -2002.114
5, -24344.33, 10850.77
-----
<最大値データ>                                           ⑪
注)  $\sigma_{max}$ 、 $\sigma_{min}$ 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
 $\delta X$ , .0002101439, 29
 $\delta Y$ , -.0006543184, 29
 $\sigma_x$ , 4.981912E+08, 5
 $\sigma_y$ , -1.947478E+08, 29
 $\tau_{xy}$ , -9.398315E+07, 11
 $\sigma_{max}$ , 5.185857E+08, 5
 $\sigma_{min}$ , -5.118893E+08, 1
 $\tau_{max}$ , 1.949819E+08, 5
 $\sigma_{mises}$ , 4.67732E+08, 5
END 0h 0min 0s                                           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。

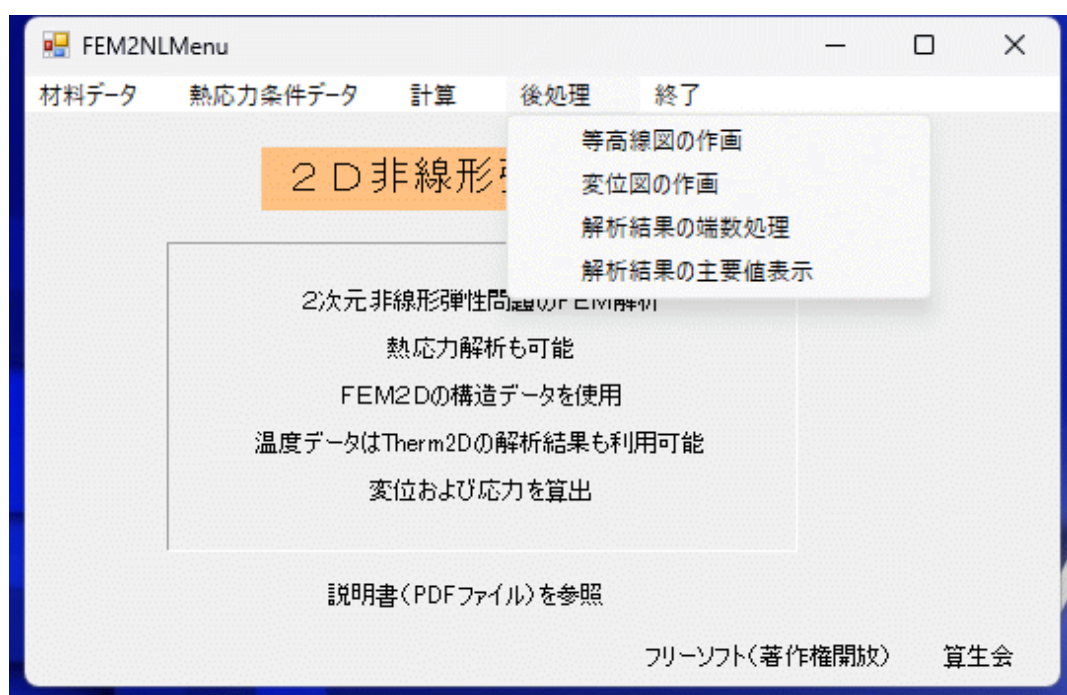


図7-1 「後処理」サブメニュー画面

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、「FEM2D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、再び使用ファイル設定画面に戻ると、「FEM2D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」の方には末尾が「NL.rep」のファイル名が表示されます。もし、他のファイル名であった場合は、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、コモン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。

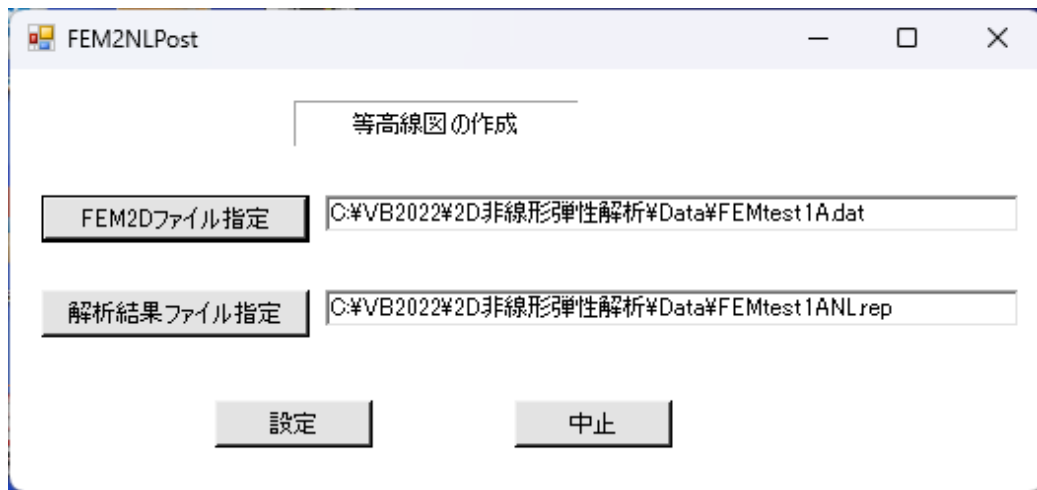


図7-2 使用ファイル設定画面

7.3 等高線の指定画面

図7-3～6に問題タイプ別の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7-7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。

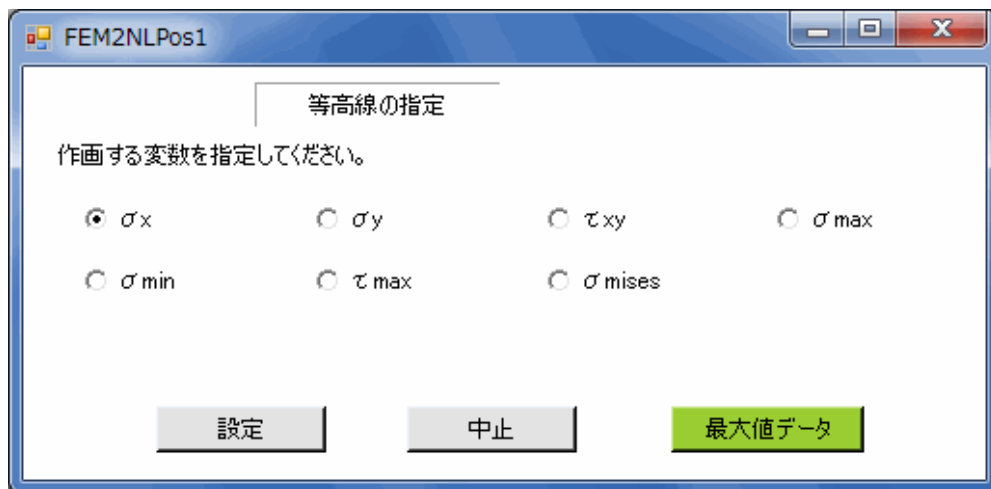


図7-3 等高線指定画面（平面応力の場合）

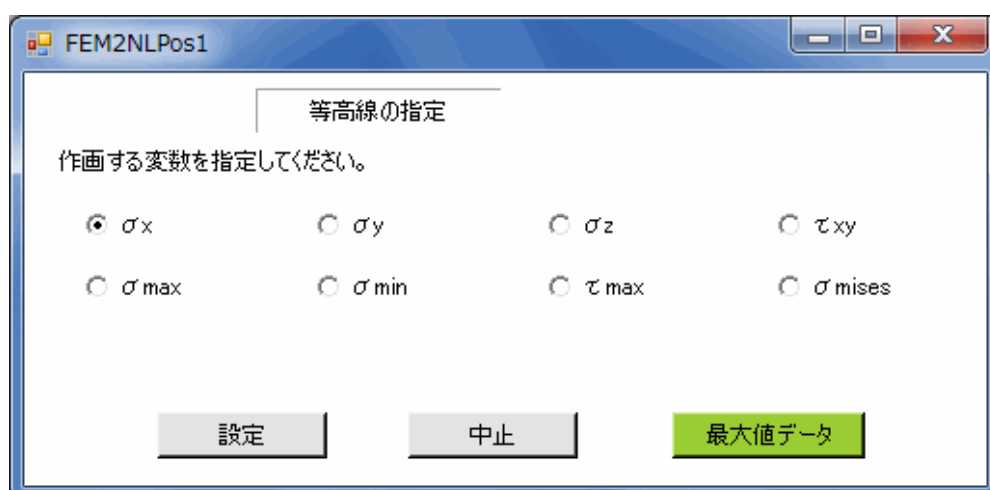


図7-4 等高線指定画面（平面歪みの場合）

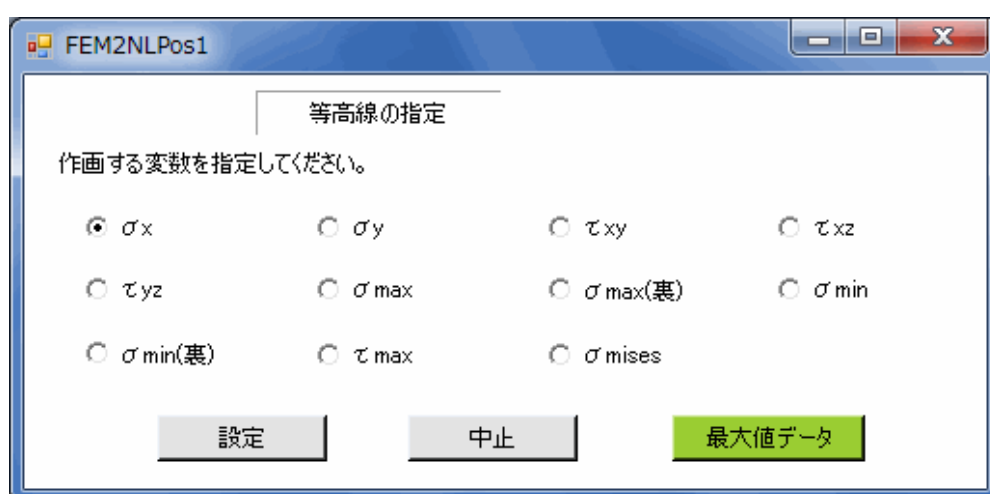


図7-5 等高線指定画面（板の曲げの場合）

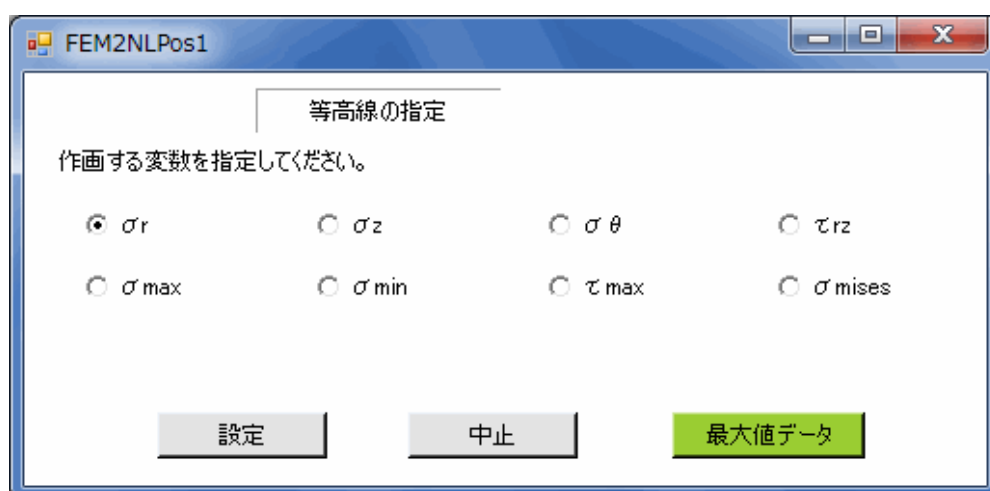


図7-6 等高線指定画面（軸対称体の場合）

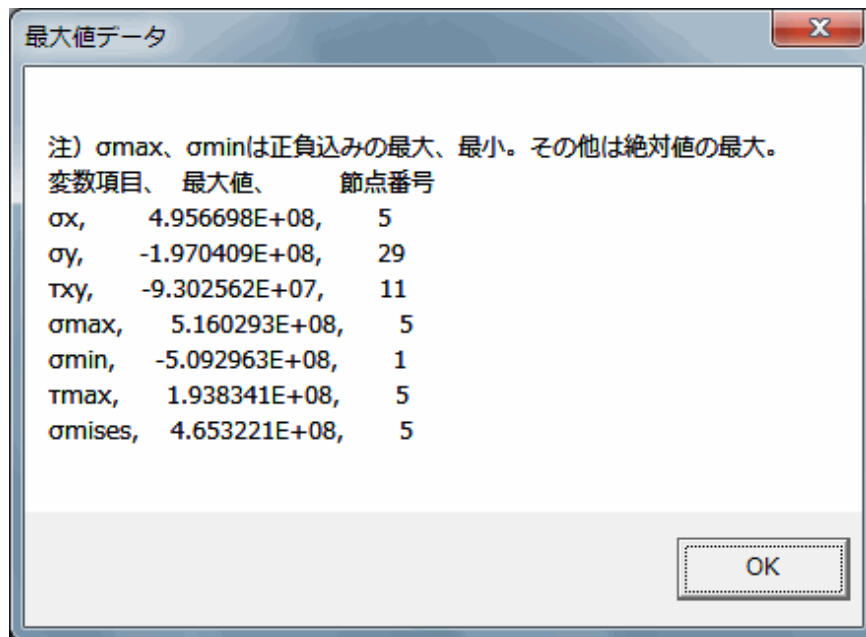


図7-7 最大値データの表示例（平面応力の場合）

7.4 等高線図の仕様設定画面

図7-8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σmin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。

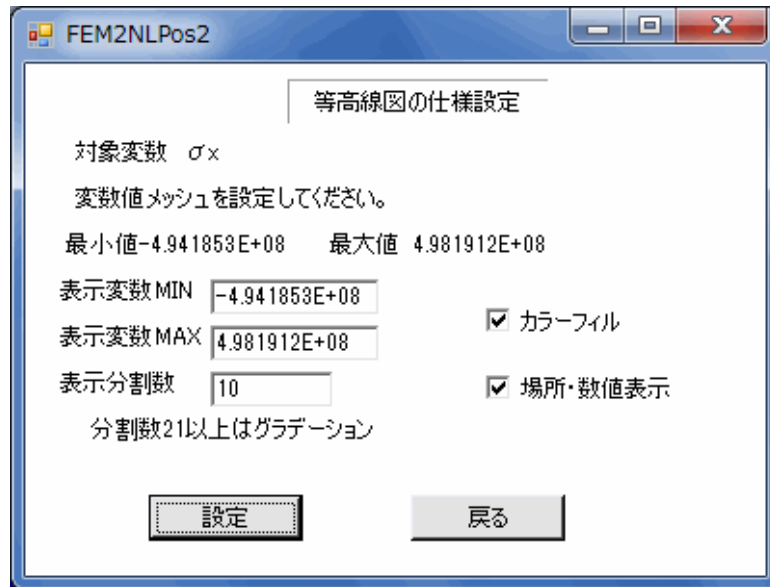


図7-8 等高線図の仕様設定画面

7.5 等高線図の作画画面（平面応力、平面歪み、軸対称体）

図7-9に板の曲げ以外の等高線図の作画画面を示します。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本画面の左側の「要素辺の表示」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。
◇「要素辺の表示」が「有り」の等高線図を図7-10に示します。同図では、各要素の辺がすべて表示されています。
- ④マウス右クリックで任意の節点を選択すると、図7-11のように同節点の変数値が表示されます。
◇ESCキーを押すと節点選択が解除されます。
- ⑤「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。
- ⑥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。
- ⑦マウスドラッグ矩形により、等高線図の一部を拡大できます。操作方法是5.9節の構造図と同じです。
- ⑧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。

- ⑨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。

また、図7-12にグラデーションの等高線図の画面例を示します。グラデーションの場合、画面右側のカラーゲージに4等分した5つの変数値が示されます。

さらに、図7-13に熱応力解析結果の等高線図の画面例を示します。

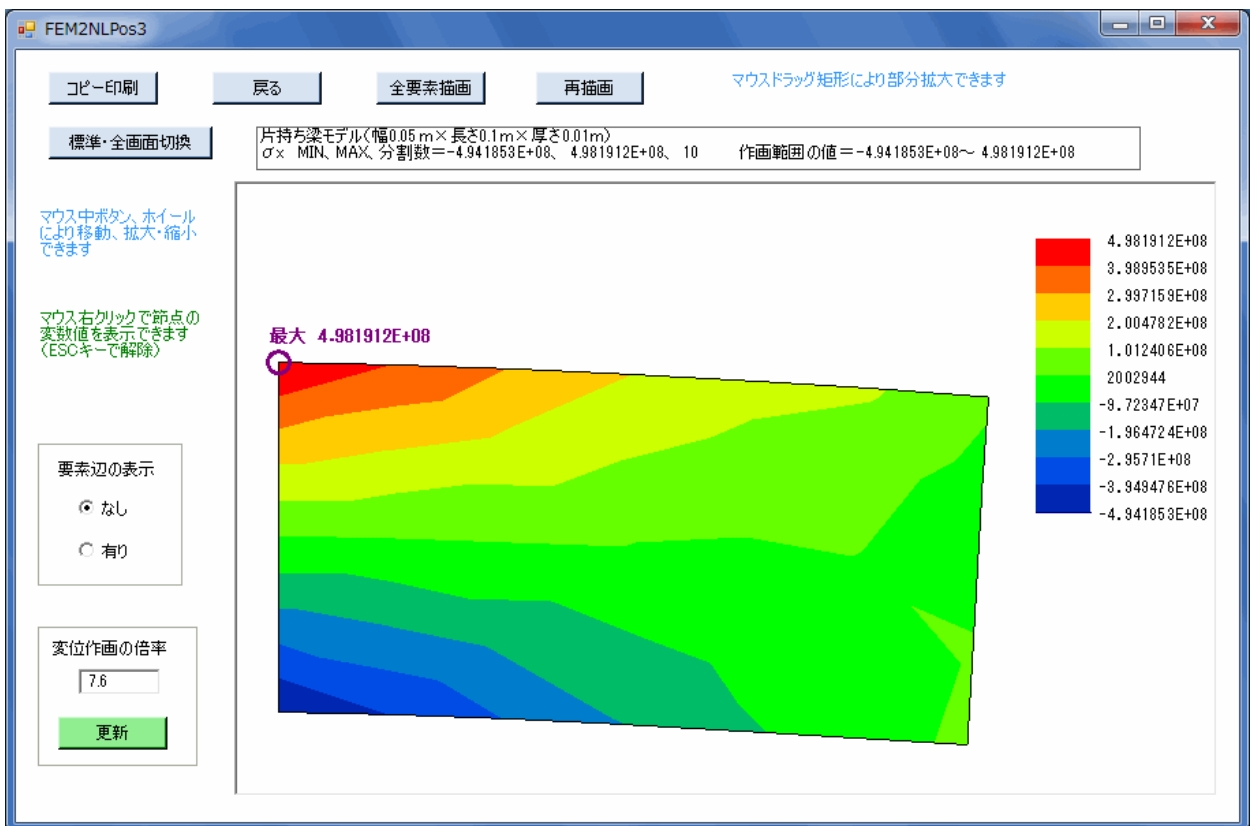
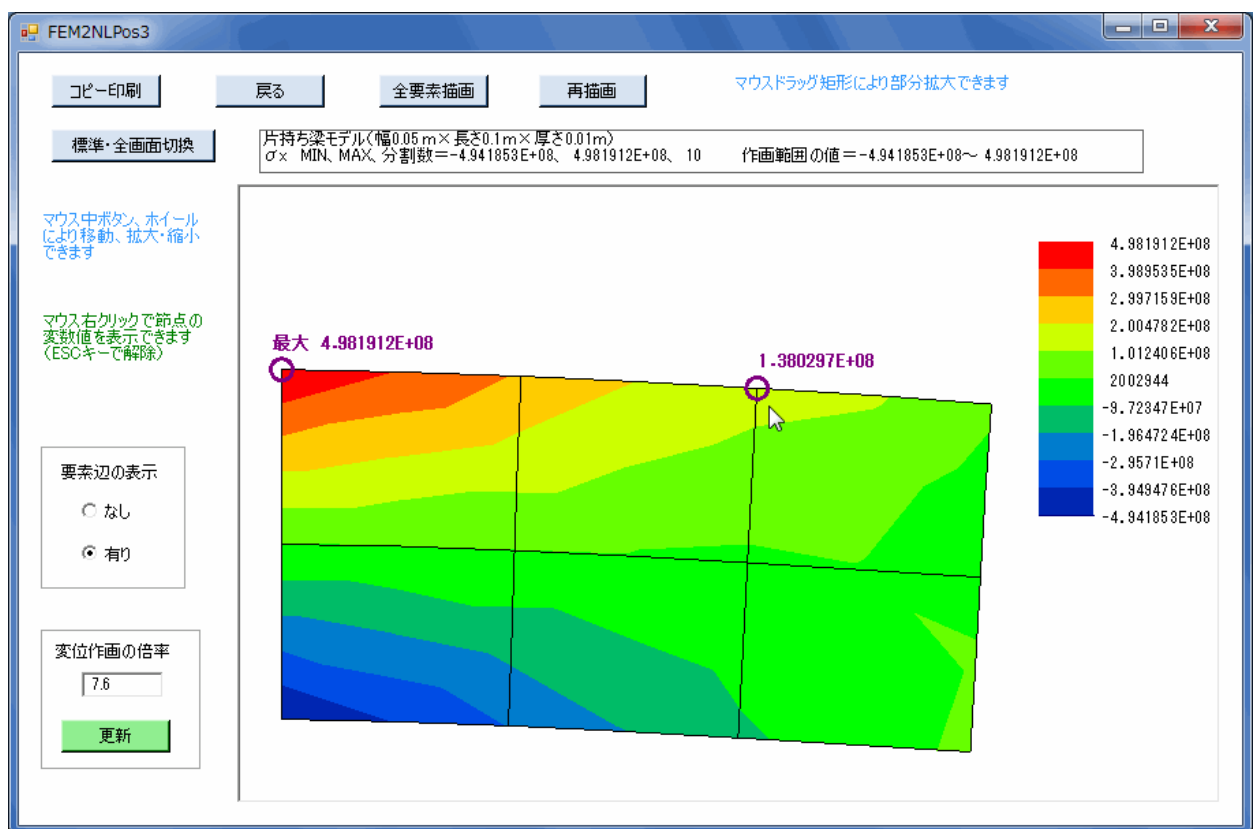
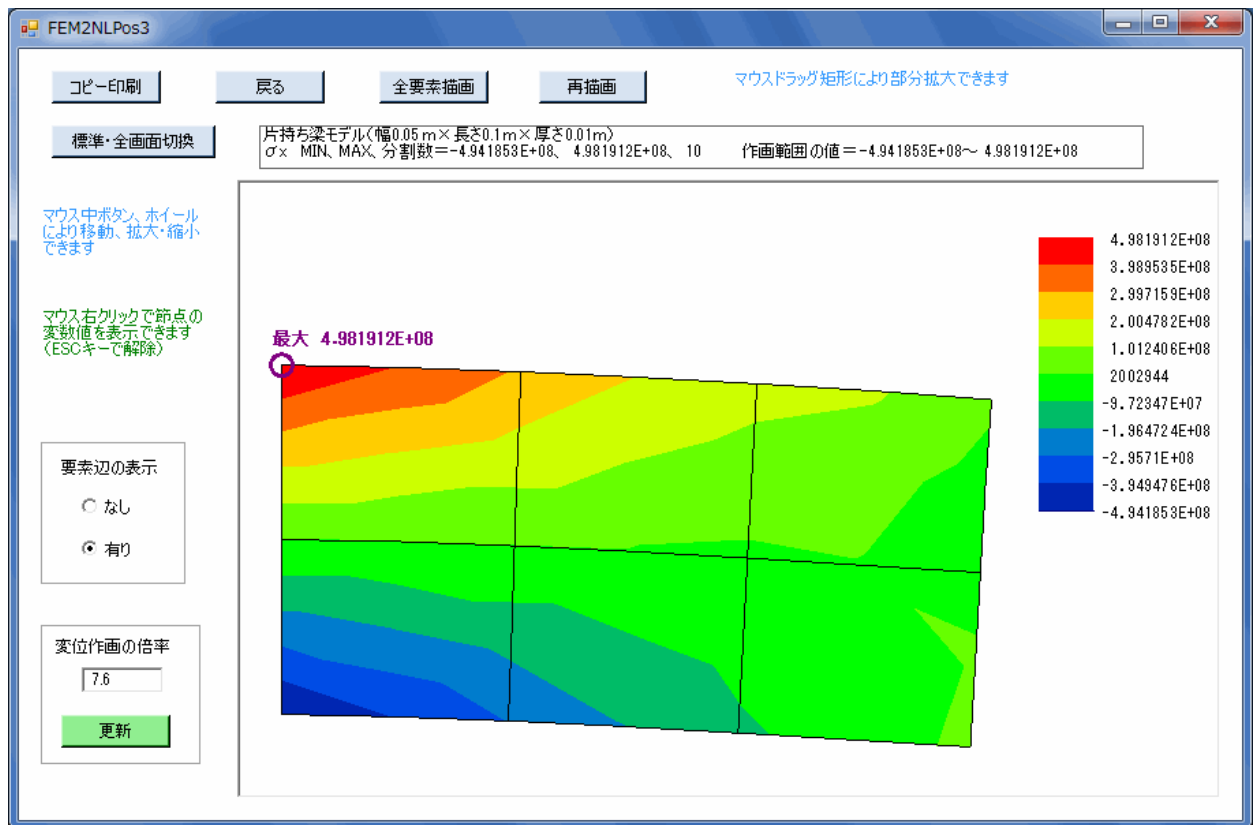


図7-9 等高線図の作画画面



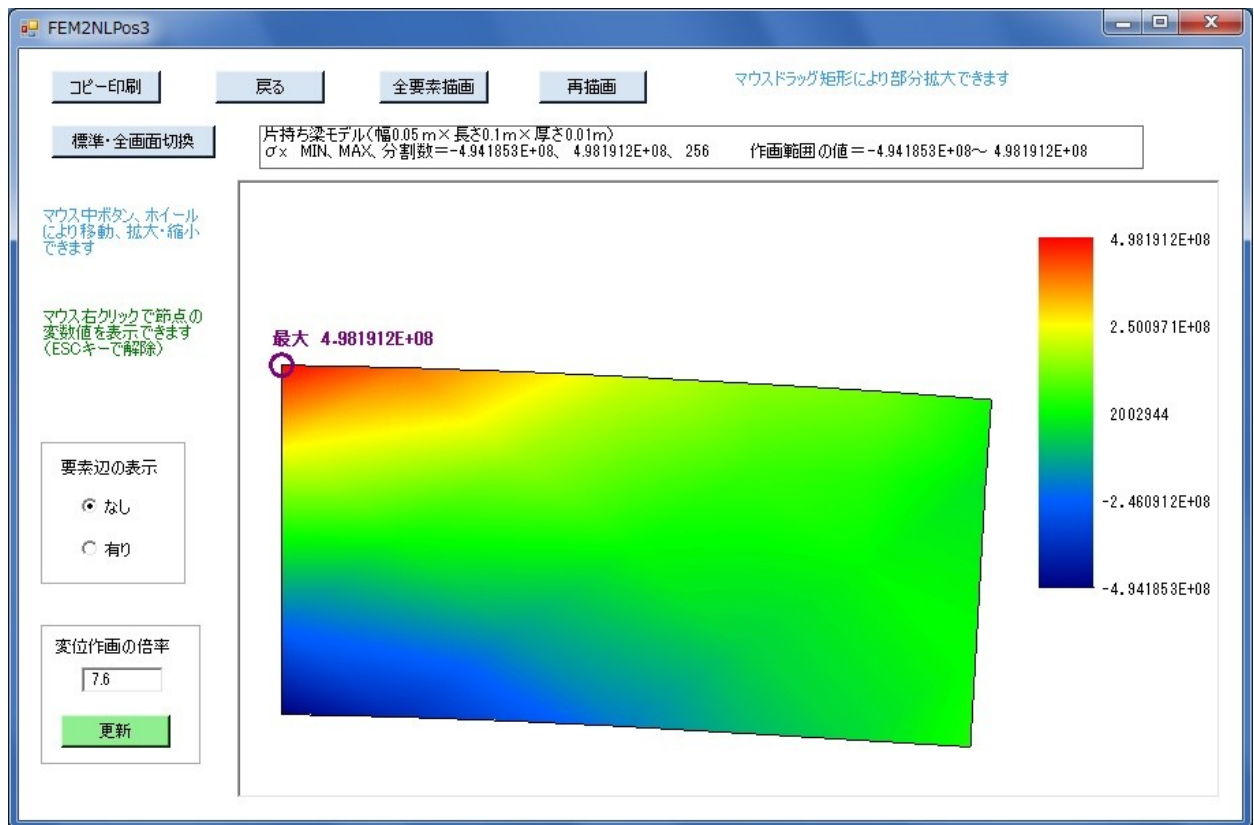


図7-12 等高線のグラデーション作画画面

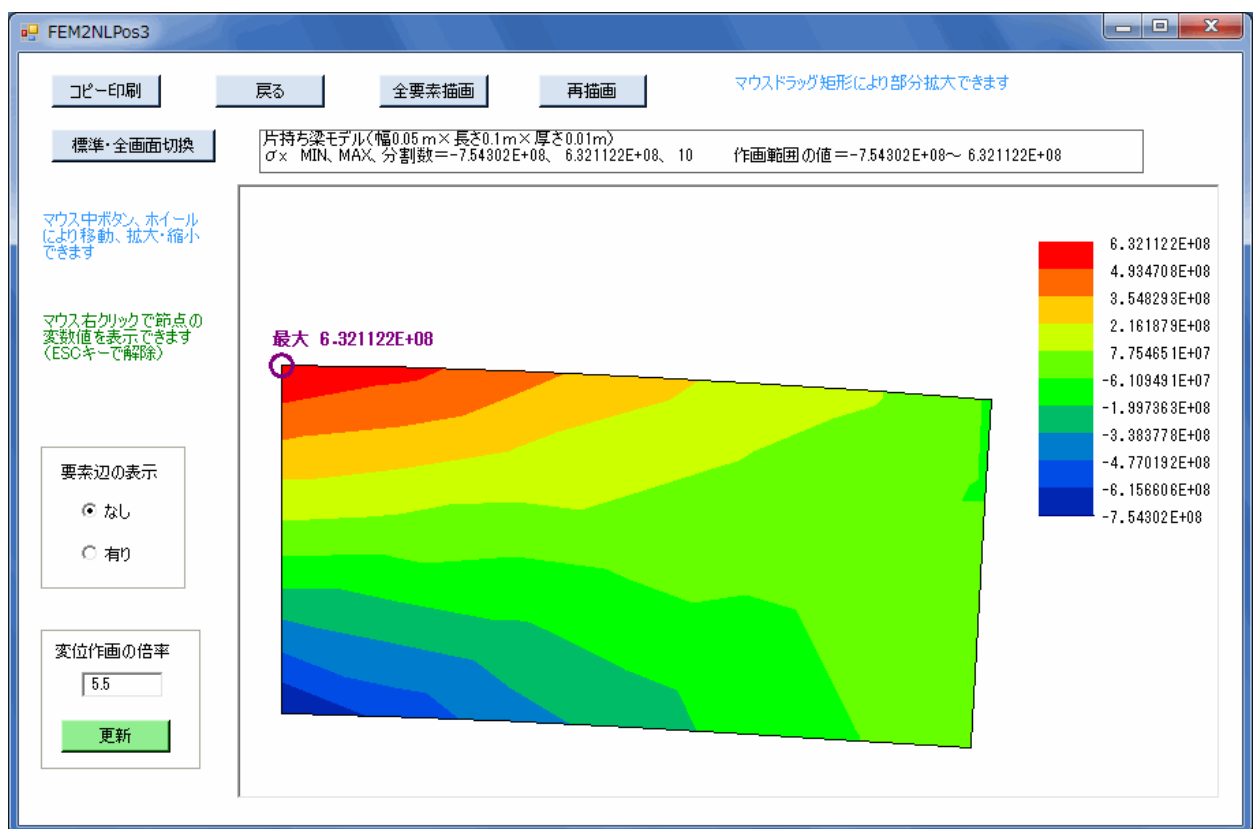


図7-13 等高線の作画画面（熱応力解析結果）

7.6 等高線図の作画画面（板の曲げ）

図7-14に板の曲げの等高線図作画画面（フランジ）を示します。板の曲げの場合は、変位なしの等高線図になります。それ以外は前節と同様です。

- ①同画面のように、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「要素辺の表示」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。
 - ◇「要素辺の表示」が「有り」の等高線図は、第8章の計算例の図を参照してください。
- ③マウス右クリックで任意の節点を選択すると、同節点の変数値が表示されます。画面例は、第8章の計算例の図を参照してください。
 - ◇ESCキーを押すと節点選択が解除されます。
- ④「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。
- ⑤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。
- ⑥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5.10節の構造図と同じです。
- ⑦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。
- ⑧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。

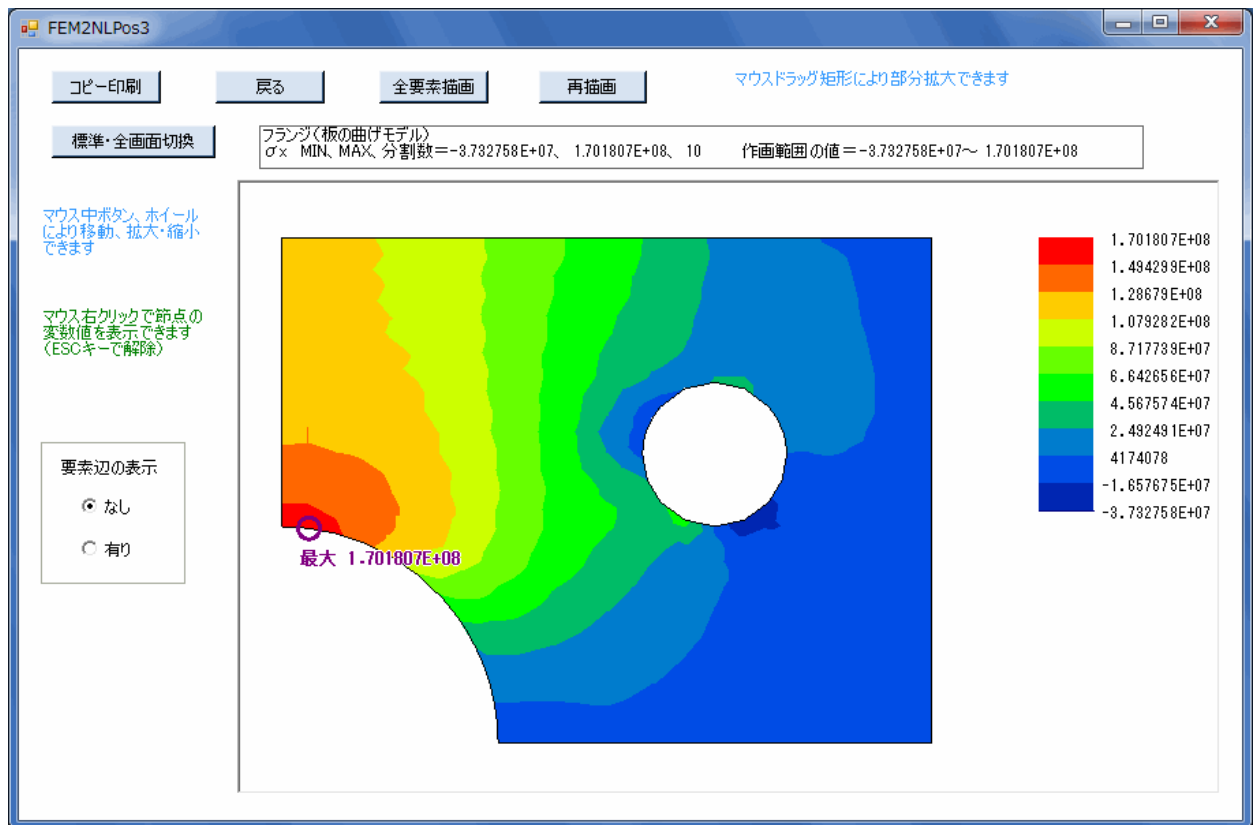


図7-14 板の曲げの等高線図作画画面（フランジ）

7.7 変位図の作画画面（平面応力、平面歪み、軸対称体）

図7-15に板の曲げ以外の変位図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。
- 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にしています。

- 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7-16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「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。
 - ⑥マウス右クリックで変位図の任意の節点を選択すると、図7-17のように同節点の変位値が表示されます。
- ◇ESCキーを押すと節点選択が解除されます。
- 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、変位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。
- ⑩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7-18に熱応力解析結果の変位図の作画画面を示します。

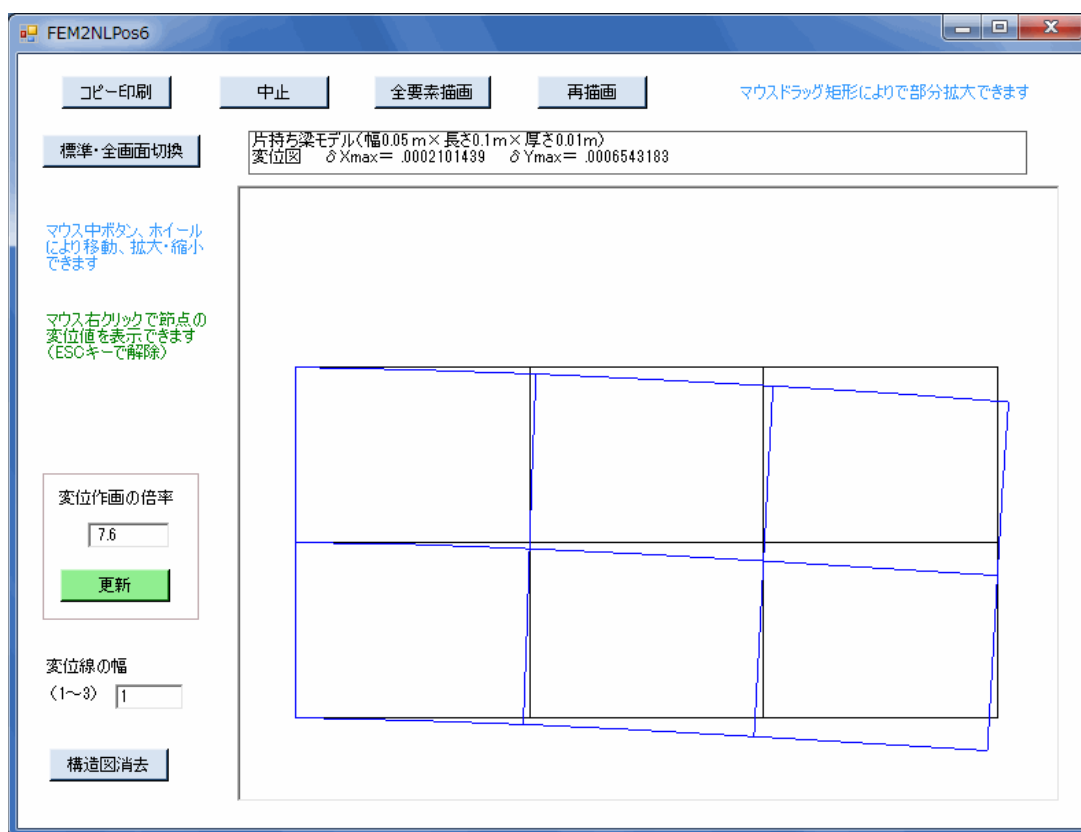


図7-15 変位図の作画画面

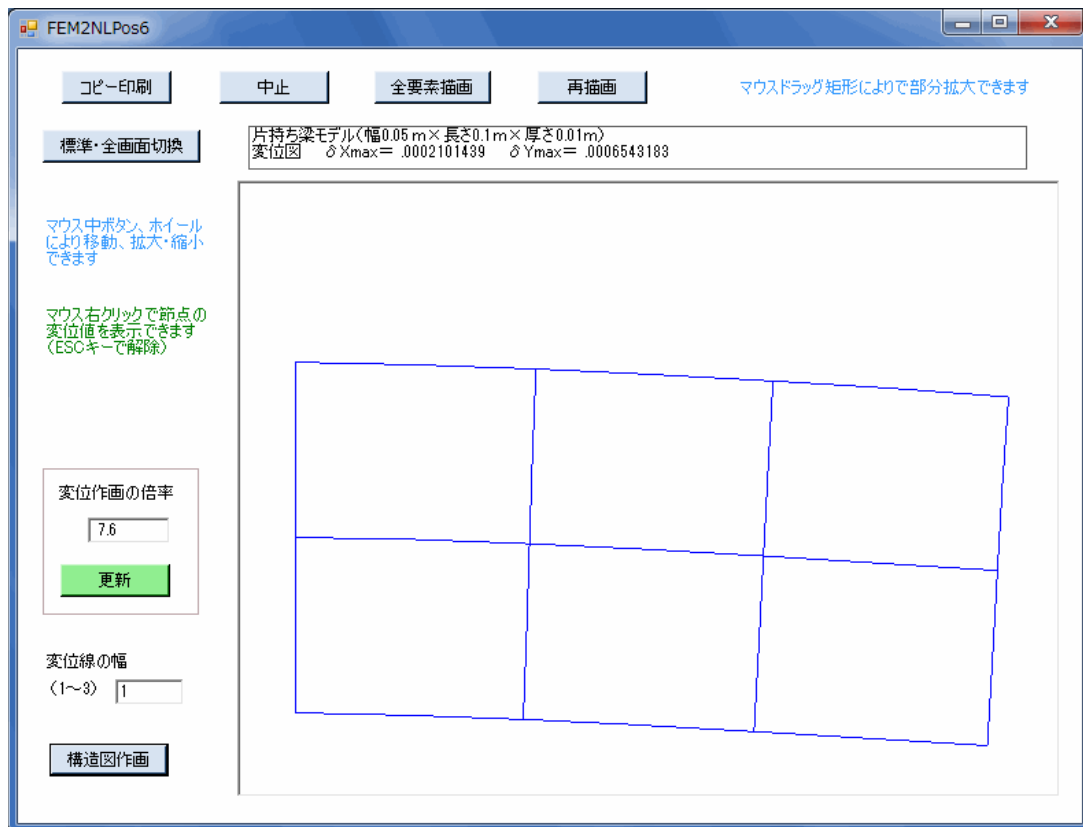


図7-16 変位図の作画画面（構造図消去）

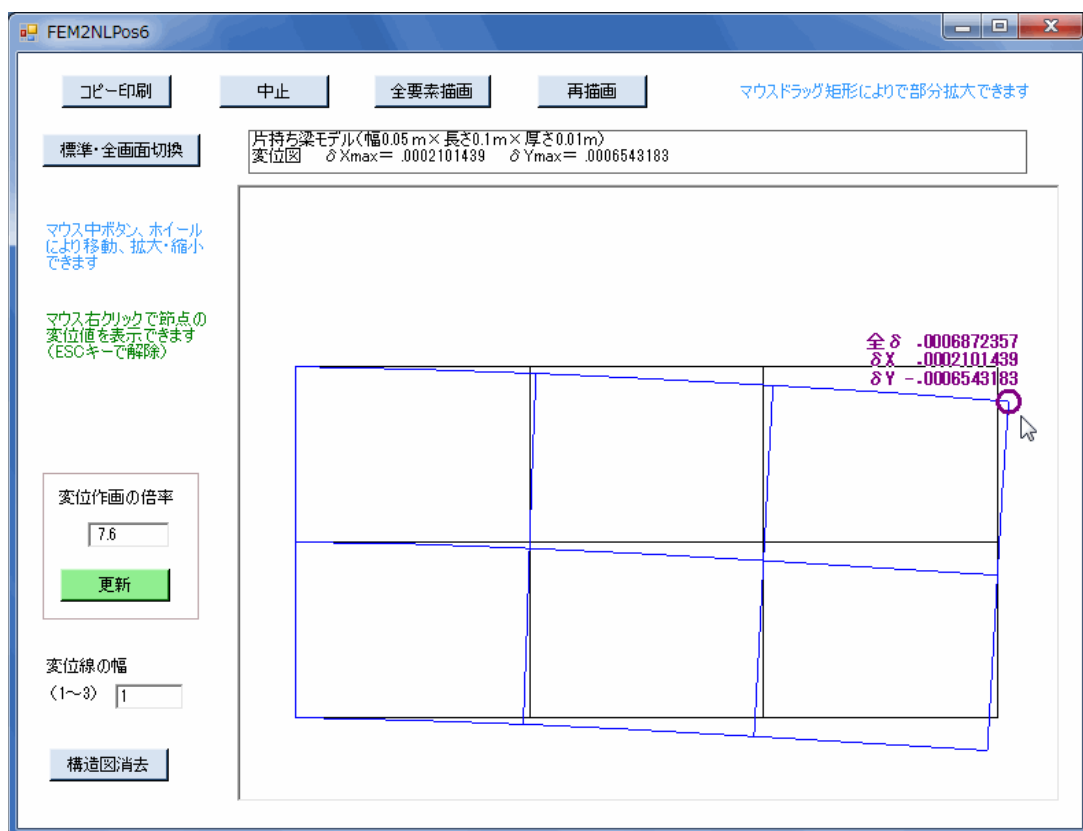


図7-17 変位図の作画画面（マウス右クリックの節点の変位値表示）

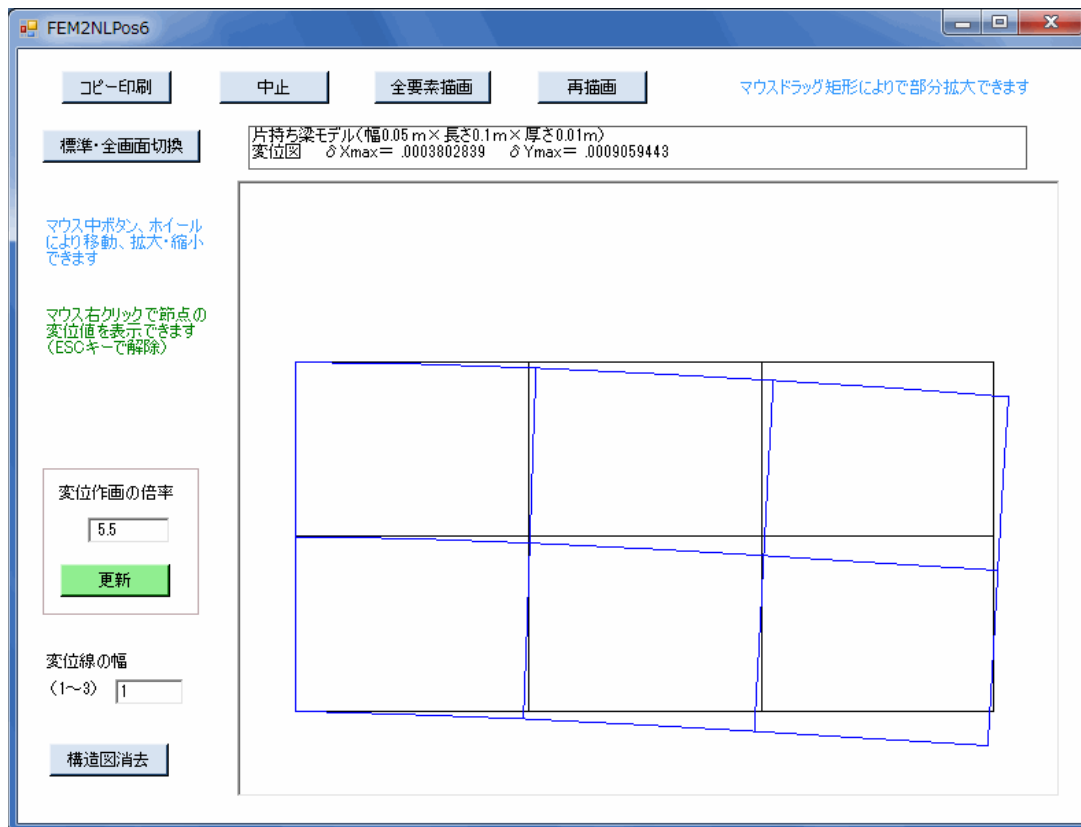


図7-18 変位図の作画画面（熱応力解析結果）

7.8 変位図の作画画面（板の曲げ）

図7-19に板の曲げの変位図作画画面（フランジ）を示します。同図のように、3次元グラフィックの変位図となっています。ただし、板の厚さは無視しています。

図7-19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。
- 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7-20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「変位作画の倍率」と「構造図消去（または作画）」以外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。
- ⑥「Shift+マウス」により構造を回転することができます。

◇変位図の任意の場所で、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7-21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、垂直軸上向き回り、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。 注) 垂直軸上向きは-Z軸を表わします。

◇変位図の「説明」ボタンをクリックすると、図7-21と同じ説明図が表示されます。

⑦「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。

⑧マウス右クリックで任意の節点を選択すると、同節点の変位値が表示されます。画面例は、第8章の計算例の図を参照してください。

◇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。

⑨「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。

⑩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。

⑪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5.9節の構造図と同様です。

⑫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。

⑬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。

⑭本画面を終了するには、「中止」ボタンをクリックします。

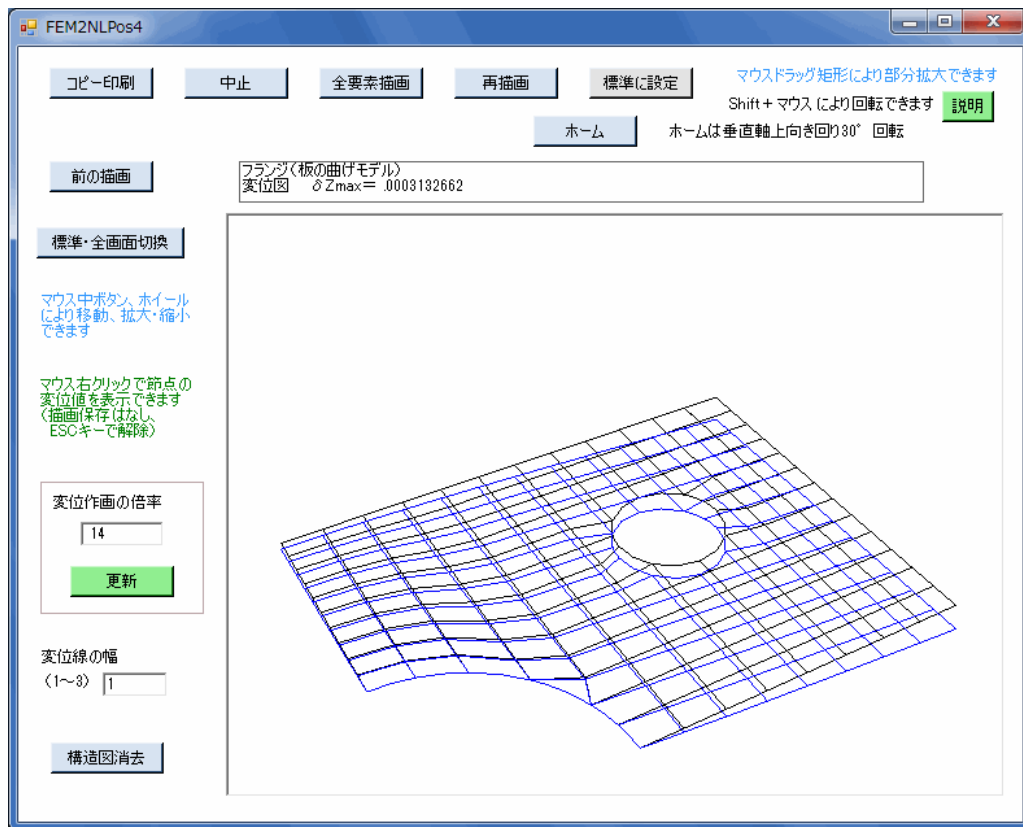


図7-19 板の曲げの変位図作画画面（フランジ）

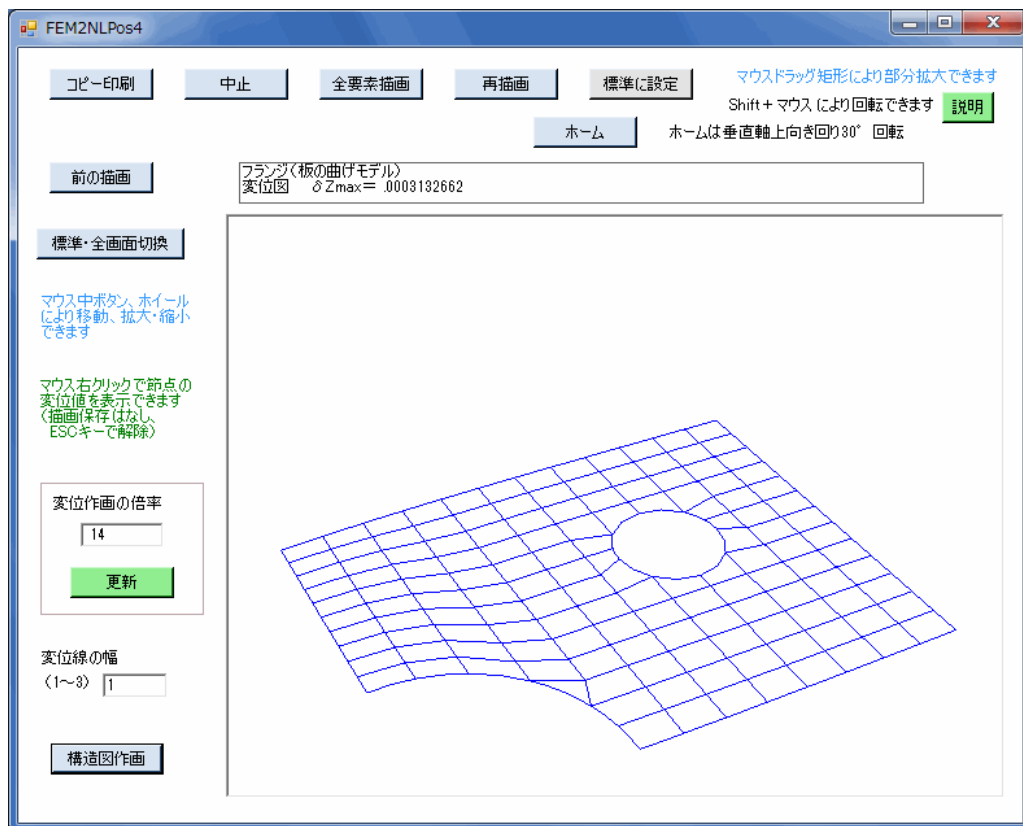


図7-20 板の曲げの変位図作画画面（フランジ、構造図消去）

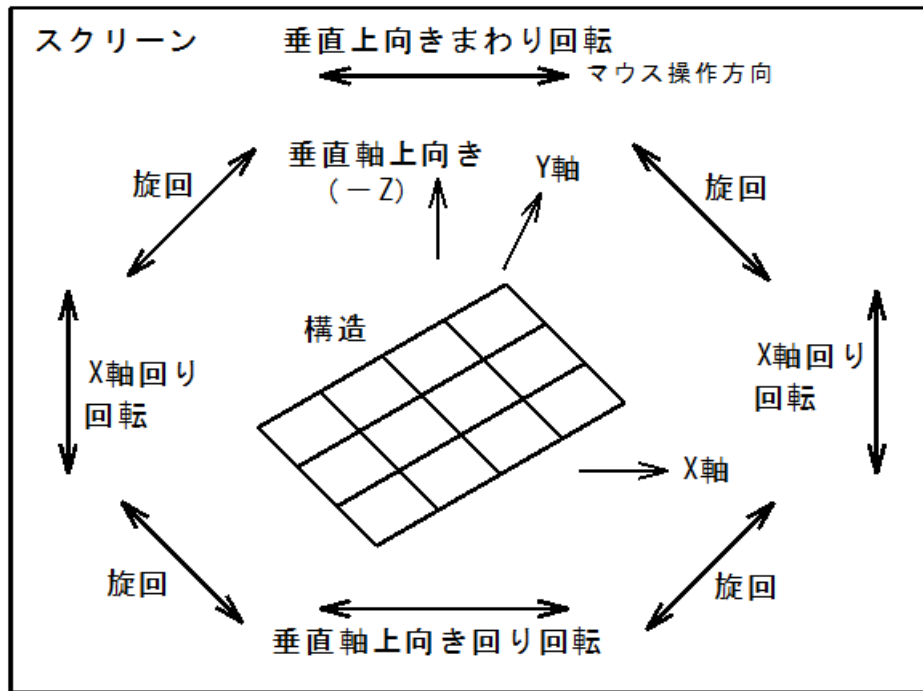


図7-21 マウスの移動方向と回転方向との関係 (Shiftキー併用)

7.9 解析結果の主要値表示

図7-22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。

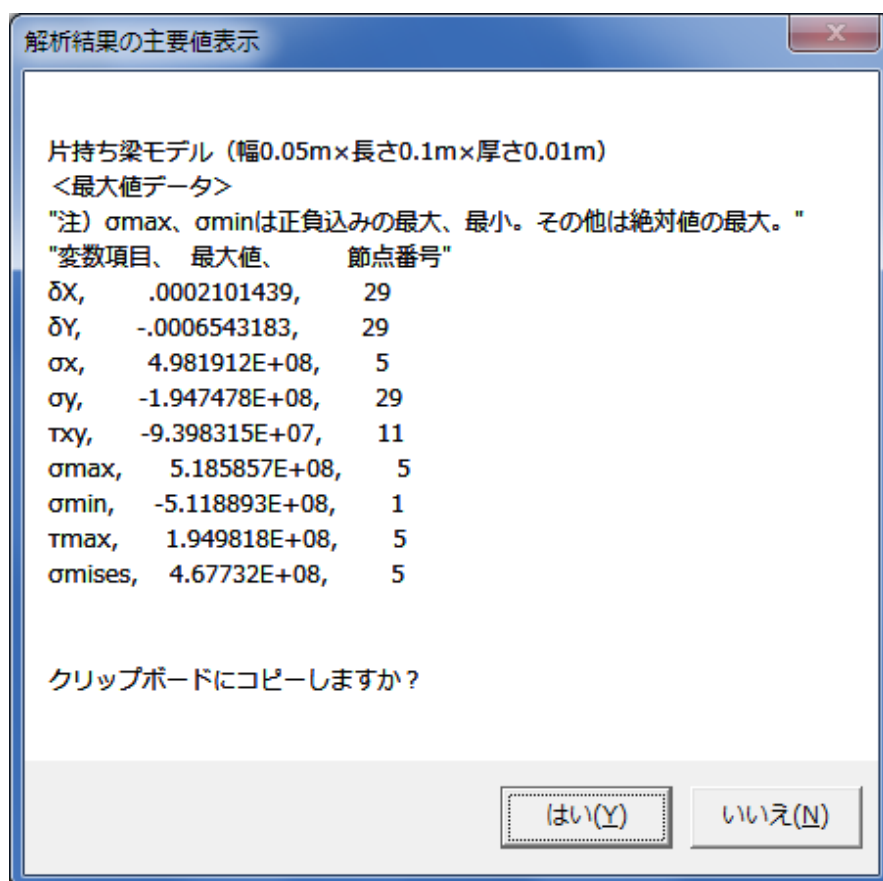
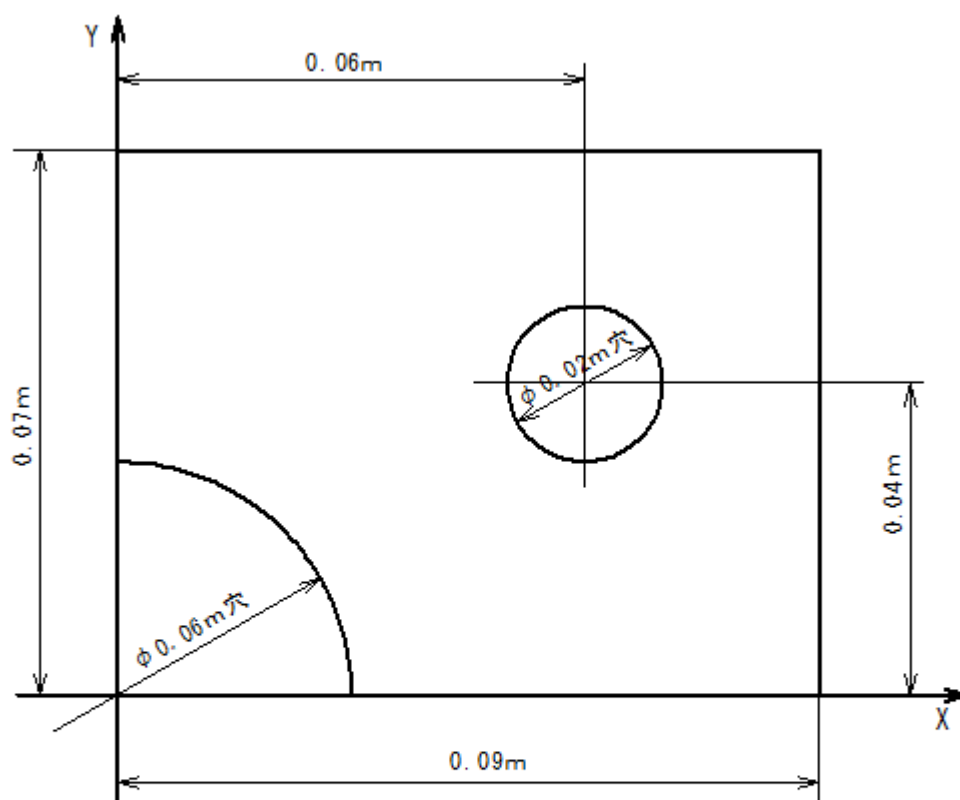


図7-22 解析結果の主要値表示の画面

第8章 板の曲げの計算例

8.1 構造モデル

図8-1にモデル図を示します。同図はフランジ部品で、対称性から4等分の1つだけを取り上げています。荷重は $\phi 0.02\text{m}$ 穴部に10000Nの荷重が作用します。ただし、材料の非線形弾性は図3-3と同じです。



- 【材料】 ヤング率 : 2.1×10^5 MPa
ポアソン比 : 0.3 板厚 : 0.02m 比重量は無視
- 【荷重】 $\phi 0.02\text{m}$ 穴円周部に10000N (円周の8節点に振り分け)
- 【境界条件】 $\phi 0.06\text{m}$ 穴円周を単純支持 (X軸、Y軸に関して対称)

図8-1 フランジの構造モデル図 (板の曲げ)

8.2 入力データ

図8-2に入力データファイルの内容を示します。

プログラム名, FEM2D									
フランジ (板の曲げモデル)									
問題のタイプ, 3									
節点数, 477									
要素数, 139									
拘束節点数, 51									
材料データ数, 1									
荷重節点数, 8									
座標位置荷重数, 0									
表面分布荷重数, 0									
バネ支持個数, 0									
傾斜拘束節点数, 0									
自重の有無 (0:なし、1:あり) , 0									
回転遠心力の有無 (0:なし、1:あり) , 0									
ガウス積分点数, 3									
1 節点当り変数の数, 3									
材料データの成分数, 4									
要素データ (要素番号、材料番号、8節点番号)									
1,	1,	1,	22,	33,	34,	35,	23,	3,	2
2,	1,	3,	23,	35,	36,	37,	24,	5,	4
3,	1,	5,	24,	37,	38,	39,	25,	7,	6
4,	1,	7,	25,	39,	40,	41,	26,	9,	8
5,	1,	9,	26,	41,	42,	43,	27,	11,	10
6,	1,	11,	27,	43,	44,	45,	28,	13,	12
7,	1,	13,	28,	45,	46,	47,	29,	15,	14
8,	1,	15,	29,	47,	48,	49,	30,	17,	16
9,	1,	17,	30,	49,	50,	51,	31,	19,	18
.....									
.....									
131,	1,	418,	441,	459,	460,	461,	442,	420,	419
132,	1,	420,	442,	461,	462,	463,	443,	422,	421
133,	1,	422,	443,	463,	464,	465,	444,	424,	423
134,	1,	424,	444,	465,	466,	467,	445,	426,	425
135,	1,	426,	445,	467,	468,	469,	446,	428,	427
136,	1,	428,	446,	469,	470,	471,	447,	430,	429
137,	1,	430,	447,	471,	472,	473,	448,	432,	431
138,	1,	432,	448,	473,	474,	475,	449,	434,	433
139,	1,	434,	449,	475,	476,	477,	450,	436,	435
節点データ (節点番号、X座標、Y座標)									
1,	0,	.03							
2,	0,	.032							
3,	0,	.034							
4,	0,	.036							
5,	0,	.038							
6,	0,	.04							
7,	0,	.042							
8,	0,	.044							
9,	0,	.046							
.....									
.....									
469,	.09,	.04846154							
470,	.09,	.05115385							
471,	.09,	.05384616							
472,	.09,	.05653846							
473,	.09,	.05923077							
474,	.09,	.06192308							
475,	.09,	.06461538							
476,	.09,	.0673077							
477,	.09,	.07							

図8-2 (1/2) フランジの入力データファイル

拘束節点データ (拘束番号、節点番号、W拘束、 δW 、 θX 拘束、 θX 、 θY 拘束、 θY)							
1,	1,	1,	0,	0,	0,	1,	0
2,	2,	0,	0,	0,	0,	1,	0
3,	3,	0,	0,	0,	0,	1,	0
4,	4,	0,	0,	0,	0,	1,	0
5,	5,	0,	0,	0,	0,	1,	0
6,	6,	0,	0,	0,	0,	1,	0
7,	7,	0,	0,	0,	0,	1,	0
8,	8,	0,	0,	0,	0,	1,	0
9,	9,	0,	0,	0,	0,	1,	0
10,	10,	0,	0,	0,	0,	1,	0
.
.
42,	282,	0,	0,	1,	0,	0,	0
43,	294,	0,	0,	1,	0,	0,	0
44,	316,	0,	0,	1,	0,	0,	0
45,	328,	0,	0,	1,	0,	0,	0
46,	355,	0,	0,	1,	0,	0,	0
47,	369,	0,	0,	1,	0,	0,	0
48,	396,	0,	0,	1,	0,	0,	0
49,	410,	0,	0,	1,	0,	0,	0
50,	437,	0,	0,	1,	0,	0,	0
51,	451,	0,	0,	1,	0,	0,	0
材料データ (材料番号、ヤング率、ポアソン比、厚さ、比重量)							
1,	2.1E+11,	.3,	.02,	0			
荷重節点 (荷重番号、節点番号、W方向荷重、 θX 方向モーメント、 θY 方向モーメント)							
1,	267,	1250,	0,	0			
2,	269,	1250,	0,	0			
3,	273,	1250,	0,	0			
4,	306,	1250,	0,	0			
5,	307,	1250,	0,	0			
6,	340,	1250,	0,	0			
7,	341,	1250,	0,	0			
8,	351,	1250,	0,	0			

図8-2 (2/2) フランジの入力データファイル

8.3 計算結果データ

図8-3に計算結果データファイルの内容を示します。同ファイルで、撓み δZ は節点477で最大の0.000313mとなります。また、応力（絶対値）は節点22で最大となり、その σ_x は170.2MPaです。なお、計算時間は0秒台です。

注) 板の曲げの応力は、板の上下面で正負反対の同一値となります。本ソフトでは板の上面（Z軸負側）を示します。ただし、 σ_{\max} (裏)と σ_{\min} (裏)は下面を示します。上面と下面のどちらに最大応力が生じるかにより、適宜使い分けてください。

<< 2D非線形弾性解析の計算結果 >>

[FEM2Dデータファイル], C:\VB2022\2D非線形弾性解析\Data\Plate2N.dat
フランジ (板の曲げモデル)

[材料データファイル], C:\VB2022\2D非線形弾性解析\Data\TestMatM.dat
FEM2NLテスト用材料データ

*** 計算結果 ***

バンド幅, 147

保存配列のインデックス数, 137709

収束計算回数, 5

誤差率, .002060037

最大の相当歪み, .001163211

** 変位等の出力 **

< 節点番号、 δZ 、 θX 、 θY >

1,	0,	.002327586,	0
2,	4.511341E-06,	.002253162,	0
3,	9.074275E-06,	.002198248,	0
4,	1.359974E-05,	.002149952,	0
5,	1.808358E-05,	.002105137,	0
6,	2.24887E-05,	.00206042,	0
7,	2.680635E-05,	.002014665,	0
8,	3.101839E-05,	.001967356,	0
9,	3.512004E-05,	.001918312,	0
10,	3.910283E-05,	.001867831,	0
11,	4.296382E-05,	.001815965,	0
12,	4.669946E-05,	.001763126,	0
13,	5.030822E-05,	.001709444,	0
14,	5.378928E-05,	.001655271,	0
15,	5.714215E-05,	.001600733,	0
16,	6.036768E-05,	.001546081,	0
17,	6.346608E-05,	.001491395,	0
18,	6.643933E-05,	.001436814,	0
19,	6.928811E-05,	.001382338,	0
20,	7.20151E-05,	.001327914,	0
.....			
.....			
464,	.0002888116,	.0007216859,	.003822559
465,	.0002904933,	.0007393713,	.003785851
466,	.0002922265,	.0007504313,	.003751044
467,	.0002939784,	.0007572589,	.003719106
468,	.0002957757,	.000760313,	.003691657
469,	.0002975999,	.0007612649,	.00368864
470,	.0002994648,	.0007612915,	.003650522
471,	.000301354,	.0007606336,	.003635965
472,	.0003032797,	.0007601898,	.003624866
473,	.0003052328,	.0007594267,	.003616639
474,	.000307213,	.0007587352,	.003610965
475,	.0003092151,	.0007579188,	.003607501
476,	.0003112338,	.0007574827,	.003605876
477,	.0003132662,	.000757204,	.003604867

図8-3 (1/2) フランジの計算結果データファイル

**** 節点応力の出力 ****

< 節点番号、 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yz} 、 σ_{max} 、 σ_{max} (裏)、 σ_{min} 、 σ_{min} (裏)、 τ_{max} 、 σ_{mises} 、 θ_{ps} >

```

1, 1.701483E+08, 1683156, 278441.6, 323616, -4917614, 1.701487E+08, -
1682696, 1682696, -1.701487E+08, 8.423302E+07, 1.695287E+08, .09469897
2, 1.570679E+08, 7901035, 412071.6, 311236.4, 783157.1, 1.57069E+08, -
7899897, 7899897, -1.57069E+08, 7.458455E+07, 1.532788E+08, .1582774
3, 1.457945E+08, 1.521309E+07, 175388.5, -452043.7, 4894781, 1.457948E+08,
-1.521286E+07, 1.521286E+07, -1.457948E+08, 6.529095E+07,
1.390758E+08, .07695583
4, 1.404606E+08, 1.342371E+07, 155499.8, -157935.3, 6069413, 1.404608E+08,
-1.342352E+07, 1.342352E+07, -1.404608E+08, 6.351864E+07,
1.346645E+08, .07013293
5, 1.329163E+08, 1.336572E+07, 188935.3, -155966.4, 7174497, 1.329166E+08,
-1.336542E+07, 1.336542E+07, -1.329166E+08, 5.977559E+07,
1.273714E+08, .09054882

```

.....

```

474, -461835.8, -730508.1, -115119.3, 245850.5, -1969827, -419257.7,
773086.2, -773086.2, 419257.7, 1969827, 3503041, -20.29746
475, -433438.5, -673538.1, 123973.3, 211439.6, -1054598, -380915.6,
726060.9, -726060.9, 380915.6, 1054598, 1966302, 22.96058
476, -225591.5, -349547.2, 172965.8, 172408.3, -527616.7, -103834.7,
471303.9, -471303.9, 103834.7, 527616.7, 1052750, 35.14309
477, -568779.6, -326558.7, 208120.1, 283207.8, 21978.98, -206875.3,
688463.1, -688463.1, 206875.3, 283207.8, 785125.4, 60.09811

```

**** 拘束節点の反力 ****

< 節点番号、W、 $M_{\theta x}$ 、 $M_{\theta y}$ >

```

1, 85.16776, 0, -7.552523
2, 0, 0, -27.45183
3, 0, 0, -12.7317

```

.....

```

437, 0, -15.28172, 0
451, 0, -3.880968, 0

```

< 最大値データ >

注) σ_{max} 、 σ_{min} 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
δZ ,	.0003132662,	477
θX ,	.002337301,	33
θY ,	.005073574,	155
σ_x ,	1.701483E+08,	1
σ_y ,	1.414212E+08,	155
τ_{xy} ,	-6.970432E+07,	86
τ_{xz} ,	-3.609793E+07,	65
τ_{yz} ,	4.983372E+07,	97
σ_{max} ,	1.701487E+08,	1
σ_{min} ,	-1.701487E+08,	1
τ_{max} ,	8.423301E+07,	1
σ_{mises} ,	1.695856E+08,	22
END	0h 0min 0s	

図8-3 (2/2) フランジの計算結果データファイル

8.4 応力の等高線図

図8-4に σ_x の等高線図（要素辺とマウス右クリック点変数の表示有り）を示します。

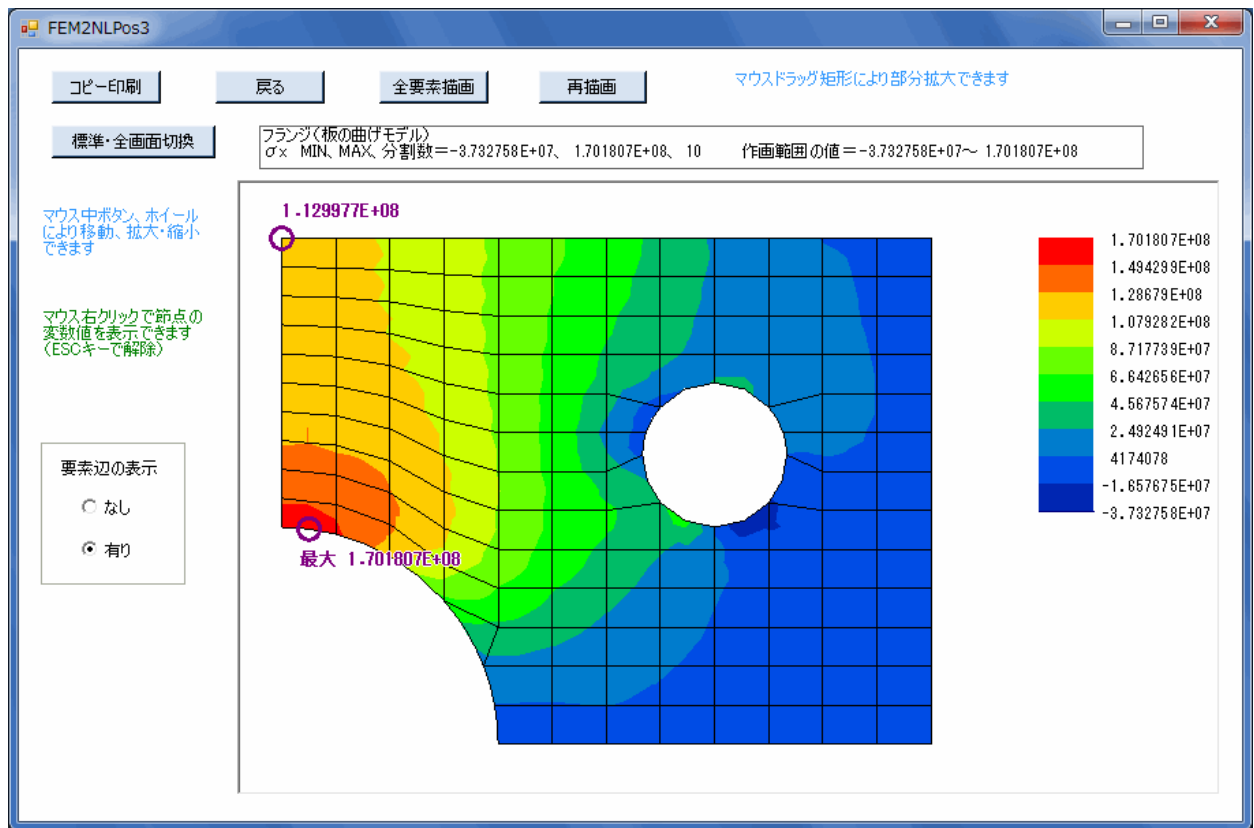


図8-4 フランジの応力 σ_x の等高線図（要素辺とマウス右クリック点変数の表示有り）

8.5 変位図

図8-5に変位図（マウス右クリック点変数の表示有り）を示します。

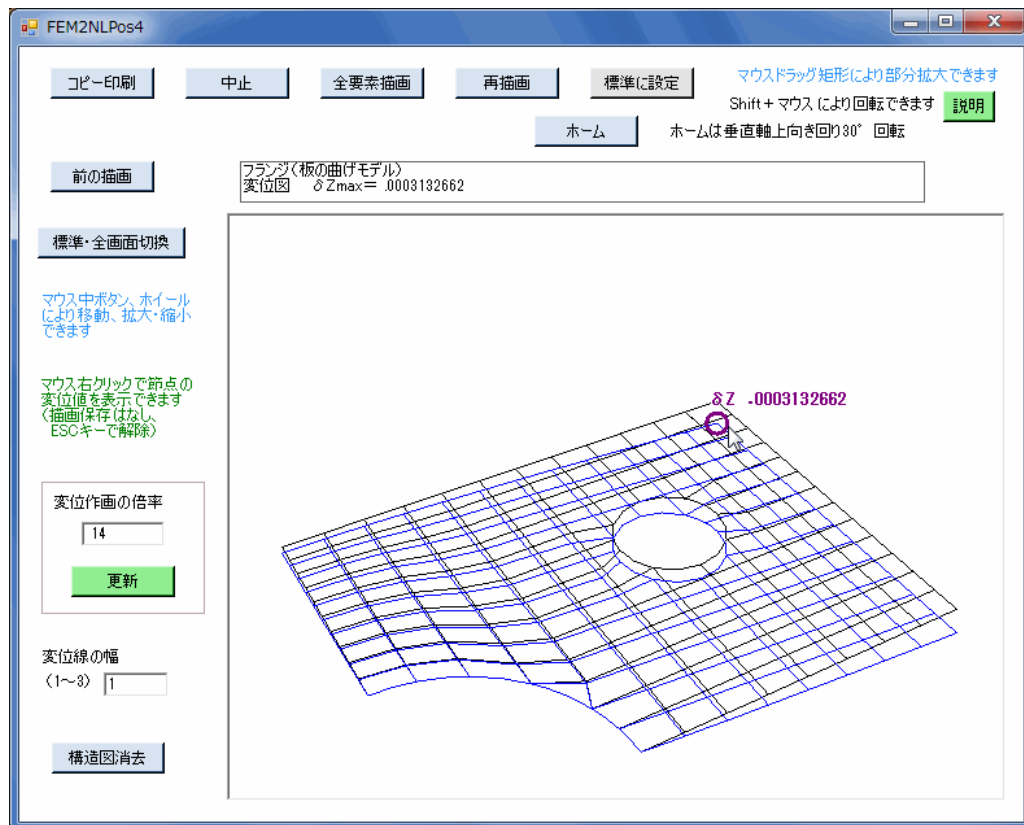


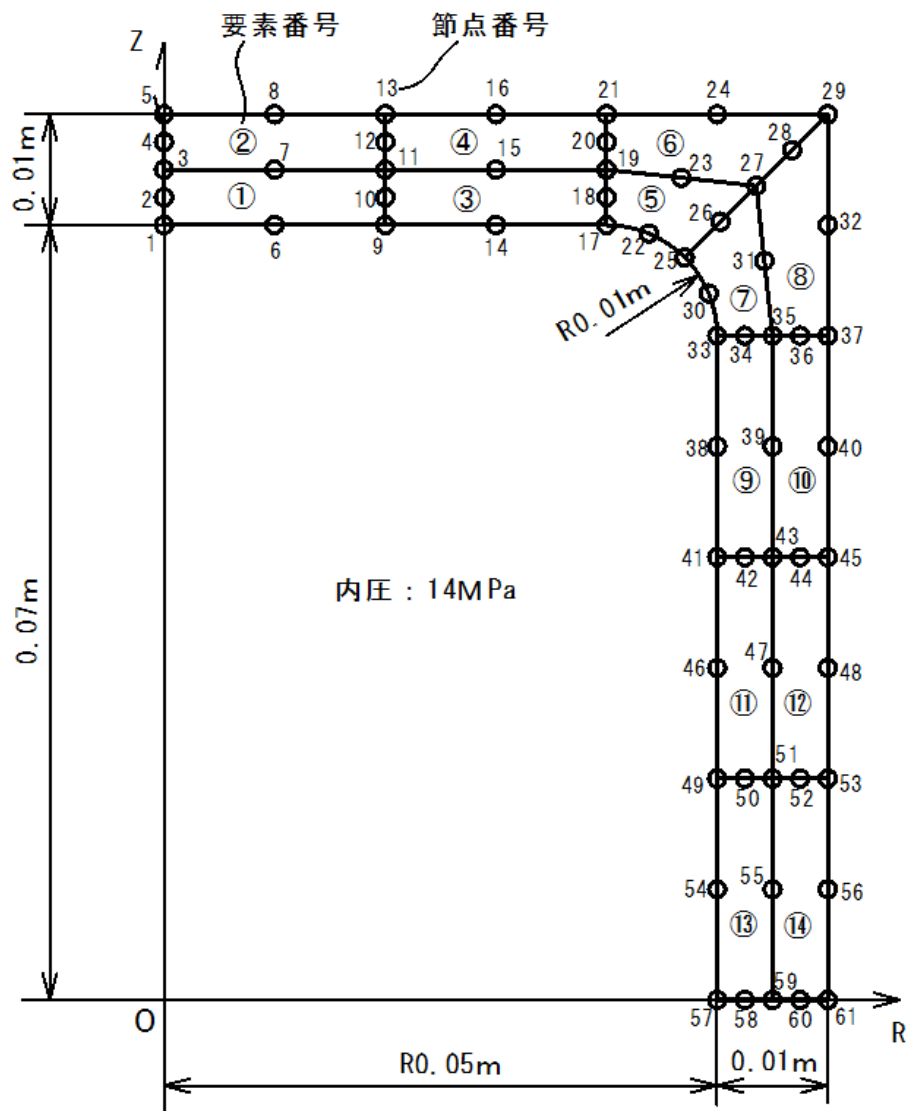
図8-5 フランジの変位図（マウス右クリック点変数の表示有り）

第9章 軸対称体の計算例

9.1 円筒容器モデルの計算例

1) 構造モデル

図9-1にモデル図を示します。同図は内圧容器で、対称性から中心軸断面の半分だけを取り上げています。荷重は容器内面全体に内圧14MPaが作用します。ただし、材料の非線形弾性は図3-3と同じです。



〔材料〕 ヤング率： $2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ ポアソン比：0.3

〔境界条件〕 節点1～5はR方向が固定、Z方向がフリー

節点57～61はR方向がフリー、Z方向が固定

図9-1 内圧容器の構造モデル図（軸対称体）

2) 入力データ

図9-2に入力データファイルの内容を示します。

```

プログラム名, FEM2D
内圧容器の解析 (軸対称体モデル、SI単位)
問題のタイプ, 4
節点数, 61
要素数, 14
拘束節点数, 5
材料データ数, 1
荷重節点数, 0
座標位置荷重数, 0
表面分布荷重数, 7
バネ支持個数, 0
傾斜拘束節点数, 0
自重の有無 (0:なし、1:あり), 0
回転遠心力の有無 (0:なし、1:あり), 0
ガウス積分点数, 3
1節点当り変数の数, 2
材料データの成分数, 3
要素データ (要素番号、材料番号、8節点番号)
1, 1, 1, 6, 9, 10, 11, 7, 3, 2
2, 1, 3, 7, 11, 12, 13, 8, 5, 4
3, 1, 9, 14, 17, 18, 19, 15, 11, 10
4, 1, 11, 15, 19, 20, 21, 16, 13, 12
5, 1, 17, 22, 25, 26, 27, 23, 19, 18
6, 1, 19, 23, 27, 28, 29, 24, 21, 20
7, 1, 25, 30, 33, 34, 35, 31, 27, 26
8, 1, 27, 31, 35, 36, 37, 32, 29, 28
9, 1, 33, 38, 41, 42, 43, 39, 35, 34
10, 1, 35, 39, 43, 44, 45, 40, 37, 36
11, 1, 41, 46, 49, 50, 51, 47, 43, 42
12, 1, 43, 47, 51, 52, 53, 48, 45, 44
13, 1, 49, 54, 57, 58, 59, 55, 51, 50
14, 1, 51, 55, 59, 60, 61, 56, 53, 52
節点データ (節点番号、R座標、Z座標)
1, 0, .07
2, 0, .0725
3, 0, .075
4, 0, .0775
5, 0, .08
6, .01, .07
7, .01, .075
8, .01, .08
9, .02, .07
10, .02, .0725
11, .02, .075
12, .02, .0775
13, .02, .08
14, .03, .07
15, .03, .075
16, .03, .08
17, .04, .07
18, .04, .0725
19, .04, .075
20, .04, .0775
. . . . .

```

図9-2 (1/2) 内圧容器の入力データファイル

```

30, .04924, .06383
31, .05427, .06677
32, .06, .07
33, .05, .06
34, .0525, .06
35, .055, .06
36, .0575, .06
37, .06, .06
38, .05, .05
39, .055, .05
40, .06, .05
41, .05, .04
42, .0525, .04
43, .055, .04
44, .0575, .04
45, .06, .04
46, .05, .03
47, .055, .03
48, .06, .03
49, .05, .02
50, .0525, .02
51, .055, .02
52, .0575, .02
53, .06, .02
54, .05, .01
55, .055, .01
56, .06, .01
57, .05, 0
58, .0525, 0
59, .055, 0
60, .0575, 0
61, .06, 0
拘束節点データ (拘束番号、節点番号、R拘束、 $\delta R$ 、Z拘束、 $\delta Z$ )
1, 57, 0, 0, 1, 0
2, 58, 0, 0, 1, 0
3, 59, 0, 0, 1, 0
4, 60, 0, 0, 1, 0
5, 61, 0, 0, 1, 0
材料データ (材料番号、ヤング率、ポアソン比、比重量)
1, 2.1E+11, .3, 0
表面分布荷重 (表面荷重番号、3 節点番号、垂直方向分布荷重、接線方向分布荷重)
1, 1, 6, 9, 1.4E+07, 0
2, 9, 14, 17, 1.4E+07, 0
3, 17, 22, 25, 1.4E+07, 0
4, 25, 30, 33, 1.4E+07, 0
5, 33, 38, 41, 1.4E+07, 0
6, 41, 46, 49, 1.4E+07, 0
7, 49, 54, 57, 1.4E+07, 0

```

図9-2 (2/2) 内圧容器の入力データファイル

3) 計算結果データ

図9-3に計算結果データファイルの内容を示します。同ファイルで、変位は節点2で最大となり、その δZ は0.000158mです。また、応力も節点5で最大となり、 σ_{\max} は208.5MPaです。なお、計算時間は0秒台です。

4) 応力の等高線図

図9-4に σ_{\max} の等高線図(座標系は時計回りに90°回転)を示します。

5) 変位図

図9-5に変位図(座標系は時計回りに90°回転)を示します。

<< 2D非線形弾性解析の計算結果 >>

[FEM2Dデータファイル], C:\VB2022\2D非線形弾性解析\Data\PresVesM2. dat

内圧容器の解析 (軸対称体モデル、SI単位)

[材料データファイル], C:\VB2022\2D非線形弾性解析\Data\TestMatM. dat

FEM2NLテスト用材料データ

*** 計算結果 ***

バンド幅, 22

保存配列のインデックス数, 1943

収束計算回数, 5

誤差率, .002267302

最大の相当歪み, .00137113

** 変位等の出力 **

<節点番号、 δR 、 δZ >

1,	0,	.000157128
2,	0,	.0001581821
3,	0,	.0001581754
4,	0,	.0001571978
5,	0,	.0001550997
6,	-7.71512E-06,	.000145817
7,	1.97498E-06,	.0001466053
8,	1.157476E-05,	.0001437987
9,	-1.305468E-05,	.0001173118
10,	-4.366614E-06,	.0001178536
11,	3.895077E-06,	.0001176642
12,	1.19564E-05,	.0001168824
13,	2.07065E-05,	.0001153883
14,	-1.306577E-05,	7.790022E-05
15,	5.480618E-06,	7.735317E-05
16,	2.391776E-05,	7.59807E-05
17,	-7.404101E-06,	3.972973E-05
18,	2.074332E-07,	3.889934E-05
19,	6.959537E-06,	3.844933E-05
20,	1.417551E-05,	3.807621E-05
.....		
.....		
48,	2.073886E-05,	5.497934E-06
49,	2.747351E-05,	2.9731E-07
50,	2.672368E-05,	1.009203E-06
51,	2.601936E-05,	1.75196E-06
52,	2.533486E-05,	2.499647E-06
53,	2.467394E-05,	3.166128E-06
54,	2.936087E-05,	2.47047E-07
55,	2.779499E-05,	8.568827E-07
56,	2.643314E-05,	1.445926E-06
57,	2.98653E-05,	0
58,	2.902796E-05,	0
59,	2.826894E-05,	0
60,	2.75638E-05,	0
61,	2.691519E-05,	0

図9-3 (1/2) 内圧容器の計算結果データファイル

```

** 節点応力の出力 **
<節点番号、 $\sigma_r$ 、 $\sigma_z$ 、 $\sigma_\theta$ 、 $\tau_{rz}$ 、 $\sigma_{max}$ 、 $\sigma_{min}$ 、 $\tau_{max}$ 、 $\sigma_{mises}$ 、 $\theta_{ps}$ >
1, -1.507336E+08, -2.02059E+07, -1.509552E+08, -1.28181E+07, -
1.895905E+07, -1.519805E+08, 6.651071E+07, 1.325118E+08, -84.44415
2, -7.277368E+07, -1.411424E+07, -7.26519E+07, -1.490639E+07, -
1.054361E+07, -7.634431E+07, 3.290035E+07, 6.403438E+07, -76.52936
3, 4.309929E+07, -4697865, 4.305758E+07, -1.731585E+07, 4.87131E+07,
-1.031167E+07, 2.951238E+07, 5.641004E+07, -17.96272
4, 1.2414E+08, 775894.6, 1.241498E+08, -1.351407E+07, 1.256031E+08,
-687167.9, 6.314512E+07, 1.255699E+08, -6.178904
. . . . .
23, 2.528697E+07, 4.573378E+07, 4.190372E+07, -1.887114E+07,
5.697285E+07, 1.40479E+07, 2.146247E+07, 3.771986E+07, -59.22326
24, -4.702187E+07, 9652793, 2.884152E+07, 6331067, 2.884152E+07, -
4.77205E+07, 2.903596E+07, 6.919528E+07, 83.70296
25, 7.840213E+07, 8.092826E+07, 4.149086E+07, -7.811219E+07,
1.577876E+08, 1542790, 7.81224E+07, 1.405938E+08, -45.46318
. . . . .
58, -1.007279E+07, 2.78587E+07, 7.753706E+07, 950710.1, 7.753706E+07,
-1.00966E+07, 1.898956E+07, 7.611717E+07, 88.56515
59, -6029369, 3.13942E+07, 7.438975E+07, 887167.6, 7.438975E+07, -
6050389, 1.87328E+07, 6.971764E+07, 88.64275
60, -3335306, 3.599298E+07, 7.425541E+07, 899741.8, 7.425541E+07, -
3355880, 1.968472E+07, 6.721571E+07, 88.69012
61, 39276.58, 3.90493E+07, 7.173688E+07, 804618.6, 7.173688E+07,
22687.62, 1.95216E+07, 6.218798E+07, 88.81889
-----
** 拘束節点の反力 **
<節点番号、Fr、Fz>
57, 0, -6308.23
58, 0, -29932.14
59, 0, -18627.96
60, 0, -42211.53
61, 0, -12875.91
-----
<最大値データ>
注)  $\sigma_{max}$ 、 $\sigma_{min}$ 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
 $\delta R$ , 2.98653E-05, 57
 $\delta Z$ , .0001581821, 2
 $\sigma_r$ , 2.07797E+08, 5
 $\sigma_z$ , 1.549626E+08, 30
 $\sigma_\theta$ , 2.078406E+08, 5
 $\tau_{rz}$ , -7.811219E+07, 25
 $\sigma_{max}$ , 2.085008E+08, 5
 $\sigma_{min}$ , -1.519805E+08, 1
 $\tau_{max}$ , 1.0211E+08, 5
 $\sigma_{mises}$ , 2.038907E+08, 5
END 0h 0min 0s

```

図9-3 (2/2) 内圧容器の計算結果データファイル

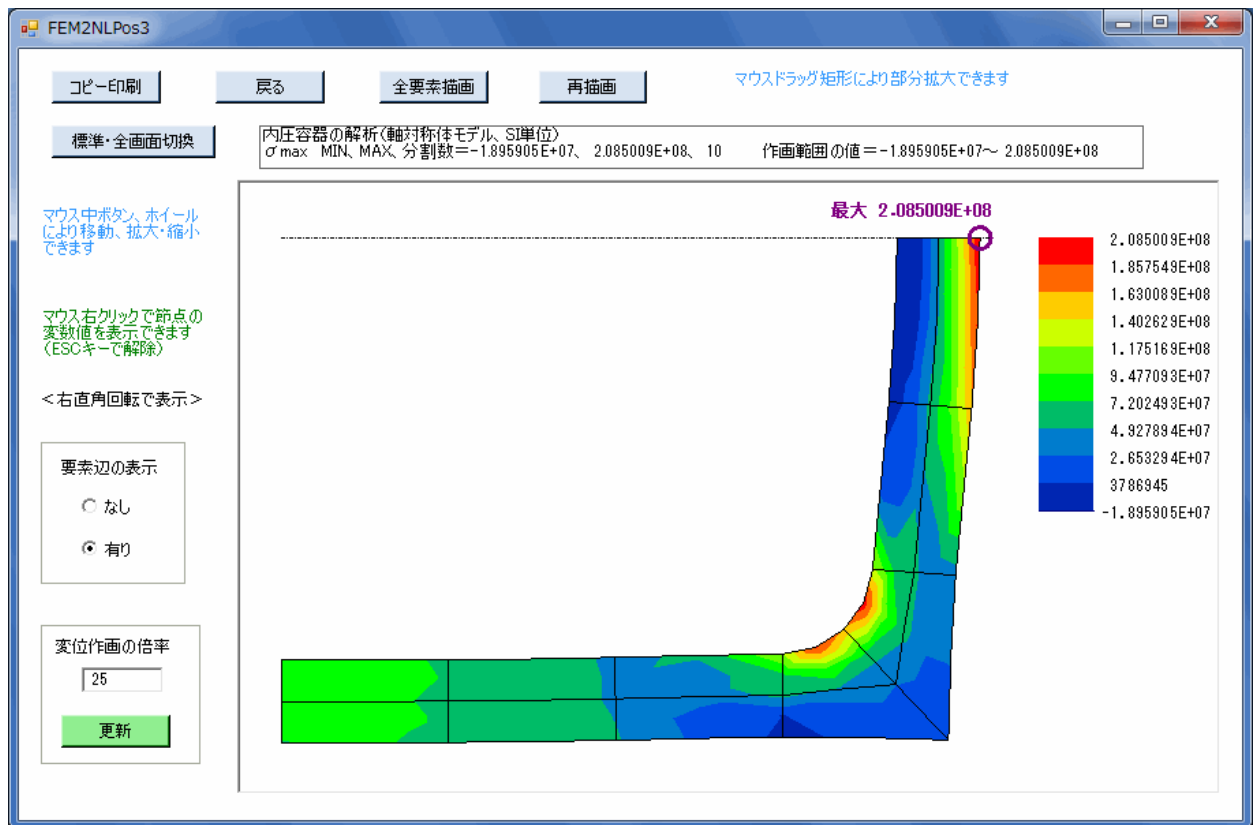


図9-4 内圧容器の σ_{max} の等高線図

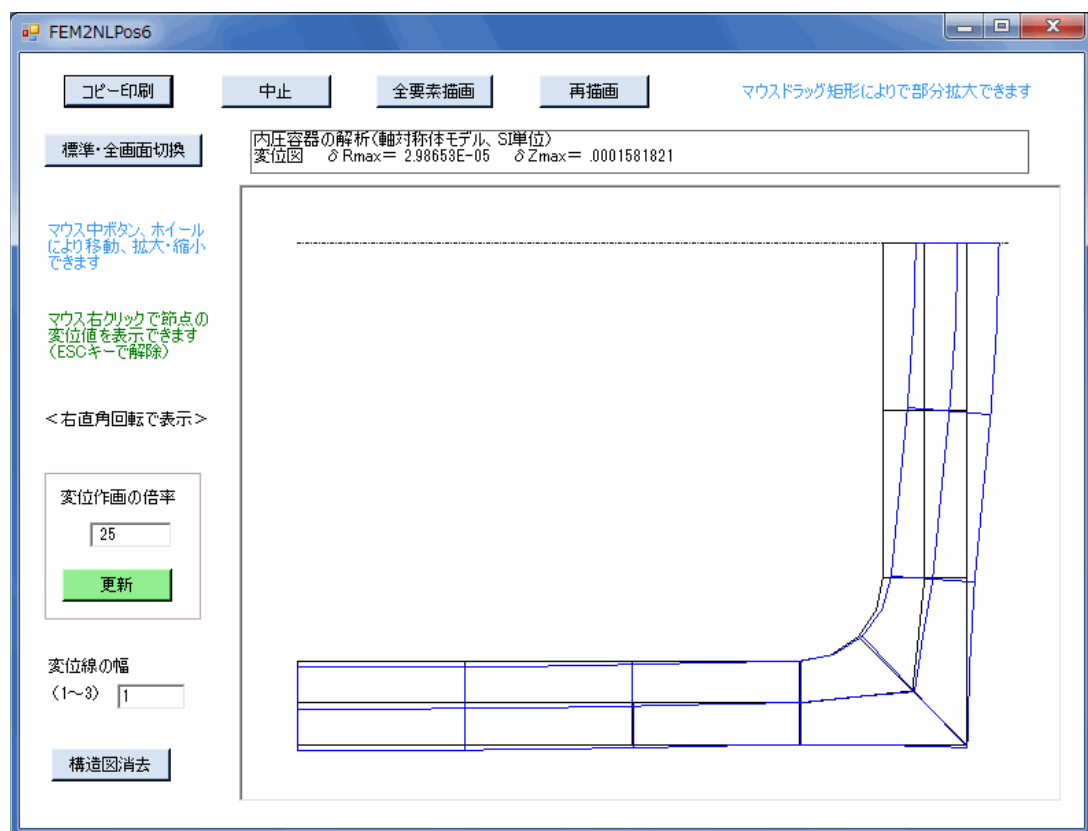


図9-5 内圧容器の変位図

9.2 軸対称体の焼き嵌めの計算例（熱応力解析）

軸にリングを焼き嵌めする軸対称体モデルについて、熱応力解析の計算例を示します。焼き嵌めは外側のリング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。

1) 構造モデル

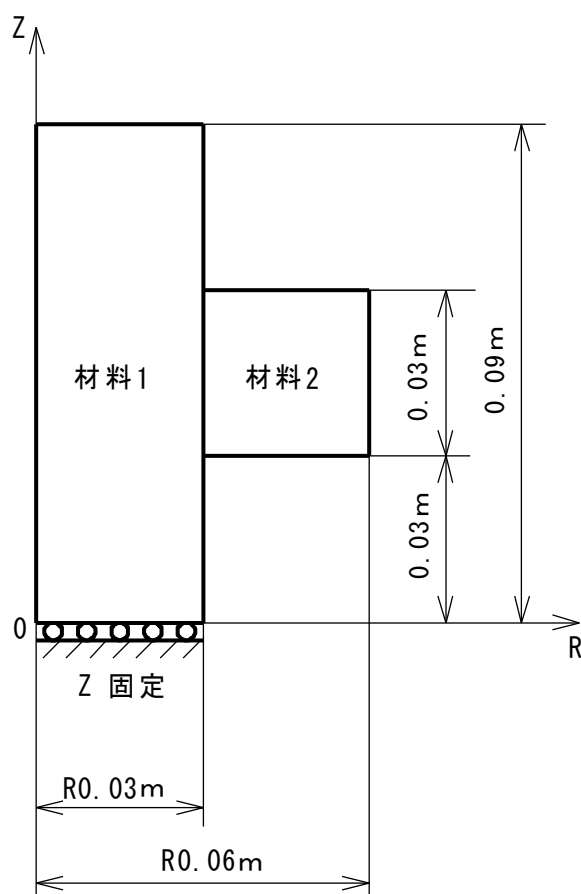
図9-6に熱応力解析の構造モデルを示します。同図のように、焼き嵌めするリング（材料2）はちょうど隙間なく軸に接触する寸法でモデル化します。そして、リングの初期温度を上記の軸に接触する状態の温度（ここでは80℃）とします。そして、軸の初期温度、および軸とリングの負荷温度は、すべて常温の20℃とします。

ただし、2つの材料共、非線形弾性は図3-3と同じです。

注) ①軸とリングの材料番号は、両者が同じ材質であっても、別の番号を設定しなければなりません。

②解析データの温度設定方式は材料を選択します。

③本モデルは要素数64、節点数233です。



[材料（1,2共）]

ヤング率： 2.1×10^5 MPa

ポアソン比：0.3

線膨張係数： $1.07 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

[初期温度（熱歪みなし）]

材料1：20℃、材料2：80℃

[負荷温度]

材料1：20℃、材料2：20℃

図9-6 焼き嵌めの構造モデル（軸対称体）

2) 計算結果データ

図9-7に計算結果データファイルの内容を示します。なお、計算時間は0秒台です。

①、②のように、材料別に応力が出力されています。

3) 応力の等高線図

図9-8に σ θ の等高線図（座標系は時計回りに90°回転）を示します。

4) 変位図

図9-9に変位図（座標系は時計回りに90°回転）を示します。

<< 2D非線形弾性解析の計算結果 >>

[FEM2Dデータファイル], C:\¥VB2022¥2D非線形弾性解析¥Data¥RingSet.dat

軸対称体の焼き嵌めモデル

[材料データファイル], C:\¥VB2022¥2D非線形弾性解析¥Data¥TestMat-2M.dat

FEM2NLテスト用材料データ

[熱応力条件データファイル], C:\¥VB2022¥2D非線形弾性解析¥Data¥RingSetH.dat

軸対称体の焼き嵌めモデル

*** 計算結果 ***

バンド幅, 58

保存配列のインデックス数, 16619

収束計算回数, 3

誤差率, .003295853

最大の相当歪み, .0008318627

** 変位等の出力 **

<節点番号、 δR 、 δZ >

1,	0,	0
2,	9.039329E-08,	0
3,	1.720146E-07,	0
4,	2.387892E-07,	0
5,	2.839153E-07,	0
6,	3.008679E-07,	0
7,	2.927279E-07,	0
8,	2.595327E-07,	0
9,	2.208279E-07,	0
10,	0,	-1.982584E-07

.....

229,	4.655414E-07,	1.492816E-06
230,	4.984178E-07,	1.295376E-06
231,	5.021248E-07,	1.109434E-06
232,	4.782263E-07,	9.549539E-07
233,	4.549142E-07,	8.319798E-07

材料番号, 1

①

** 節点応力の出力 **

<節点番号、 σ_r 、 σ_z 、 σ_θ 、 τ_{rz} 、 σ_{\max} 、 σ_{\min} 、 τ_{\max} 、 σ_{mises} 、 θ_{ps} >

1,	3874259,	-8391808,	3873861,	-766.1816,	3874259,	-8391808,	6133034,
1.226587E+07,		-.003578897					
2,	3420839,	-8568048,	3613220,	3983.333,	3613220,	-8568049,	5994445,
1.208623E+07,		.01903665					
3,	3266472,	-7196432,	3641617,	19230.8,	3641617,	-7196467,	5231487,
1.065548E+07,		.1053091					
4,	2620945,	-5583365,	3659906,	30989.24,	3659906,	-5583482,	4102272,
8770232,		.216413					

.....

230,	3086142,	135042.5,	6660860,	-449890.7,	6660860,	67981.2,
1542611,	5713506,	-8.478157				
231,	338355.8,	-290261.3,	4691263,	-287647.3,	4691263,	-402017.1,
426064.3,	4725198,	-21.23199				

図9-7 (1/2) 焼き嵌めの計算結果

232, -238576.5, -112045.1, 3797937, -33675.26, 3797937, -246980.7,
71669.86, 3975187, -75.98718
233, -829049.5, -1079074, 2612424, 290796.6, 2612424, -1270591, 316529.2,
3608378, 33.36868

材料番号, 2

②

*** 節点応力の出力 ***

<節点番号、 σ_r 、 σ_z 、 σ_θ 、 τ_{rz} 、 σ_{\max} 、 σ_{\min} 、 τ_{\max} 、 σ_{mises} 、 θ_{ps} >

65, -1.977497E+07, 8.630305E+07, 8.967206E+07, 4.379108E+07, 1.020448E+08,
-3.551674E+07, 6.878078E+07, 1.318114E+08, 70.22778

66, -5.001161E+07, 1.115273E+07, 4.752675E+07, 1.553963E+07, 4.752675E+07,
-5.373322E+07, 3.430378E+07, 8.951748E+07, 76.53181

67, -4.863228E+07, -7385529, 3.13904E+07, -8418456, 3.13904E+07, -

5.028432E+07, 2.227541E+07, 7.082979E+07, -78.89736

.....

175, -6010554, -92987.57, 3.098642E+07, 661389.3, 3.098642E+07, -6083574,
3031804, 3.444088E+07, 83.69978

176, -2734844, 54148.38, 3.022864E+07, 197651, 3.022864E+07, -2748782,
1408434, 3.166311E+07, 85.96642

177, 1379021, 1066502, 2.936502E+07, -157636.6, 2.936502E+07, 1000802,
221960, 2.814488E+07, -22.62572

*** 拘束節点の反力 ***

<節点番号、 F_r 、 F_z >

1, 0, 7.505639

2, 0, 980.1323

3, 0, 920.6647

4, 0, 1927.568

5, 0, 821.8392

6, 0, 292.8212

7, 0, -685.9532

8, 0, -3147.538

9, 0, -1117.04

<最大値データ>

注) σ_{\max} 、 σ_{\min} 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
δR ,	-2.892593E-05,	125
δZ ,	1.118616E-05,	73
σ_r ,	-4.999356E+07,	78
σ_z ,	8.630306E+07,	65
σ_θ ,	8.967208E+07,	65
τ_{rz} ,	4.379108E+07,	65
σ_{\max} ,	1.020448E+08,	65
σ_{\min} ,	-7.374794E+07,	117
τ_{\max} ,	6.878078E+07,	65
σ_{mises} ,	1.318114E+08,	65
END	0h 0min 0s	

図9-7 (2/2) 焼き嵌めの計算結果

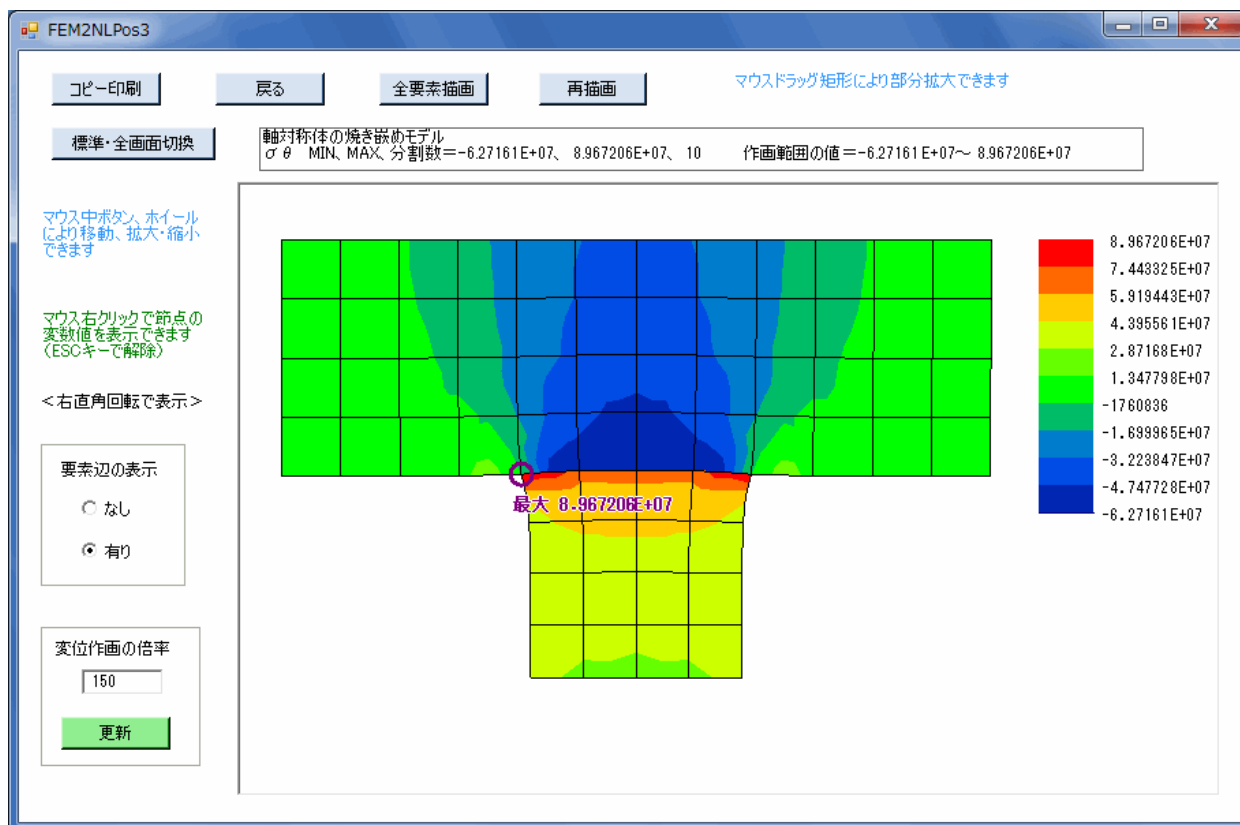


図9-8 焼き嵌めの等高線図 (σ_θ)

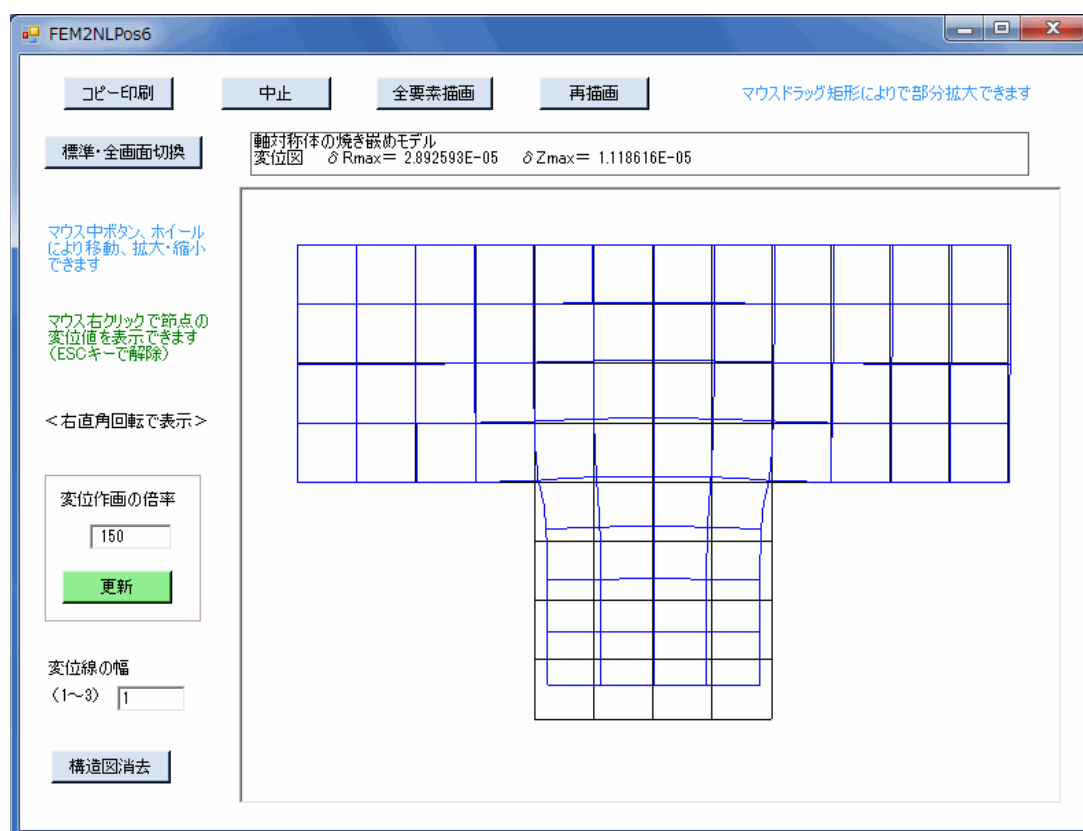


図9-9 焼き嵌めの変位図

[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peer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) 「Visual Basicによる工学計算プログラム」、黒田 英夫、
CQ出版社、2001
- B4) 「Visual Basicによる数値解析プログラム」、黒田 英夫、
CQ出版社、2002
- B5) 「コンピュータグラフィックス講義」、青木 由直、
コロナ社、2000
- B6) 「線形計算」、名取 亮、
朝倉書店、1993

<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) 「弾塑性力学の基礎」、吉田 総仁、共立出版(株)、2005
- C10) 「The Finite Element Method in Electromagnetics」、Jianming Jin John Wiley & Sons、2002