
* 「複合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

「複合3次元構造解析K (CompFEM3D)」の構造データと非線形弾性の材料データを用いて、複合3次元構造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。この複合3次元構造とは、部材3次元と立体3次元を合わせた構造を指します。

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。ただし、非線形弾性の物性は部材3次元の線分要素で一様と取り扱うため、近似的な解析手法となります。なお、非線形弾性の評価にはMises応力を使用します。

解析理論については、算生会「複合3次元構造解析K」ソフトと重複するところが多いので、本書では非線形弾性解析に関する部分のみを説明します。

[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 -----	11
第5章 「計算」プログラム -----	15
第6章 「後処理」プログラム -----	23
[参考文献] -----	38

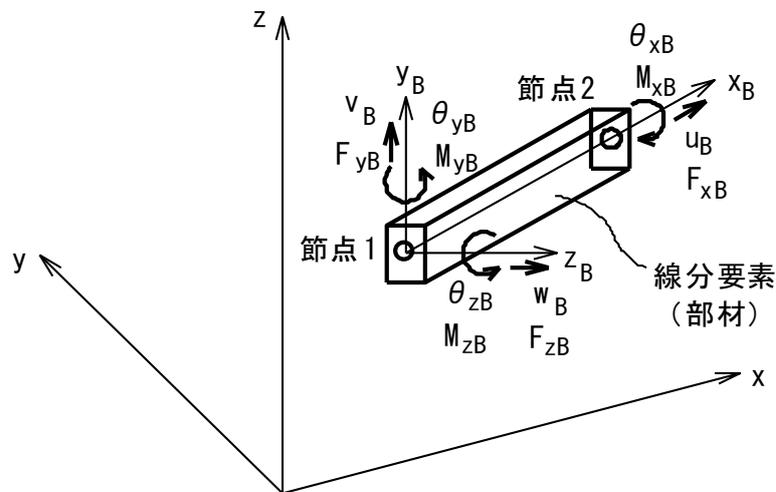
第1章 有限要素法

有限要素法の構造解析については、算生会「複合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、非線形弾性解析を主体に説明します。

1.1 使用要素

複合3次元構造は、部材3次元構造と立体3次元構造の組み合わせ構造です。

部材3次元構造では、図1-1の線分要素（2節点）を使用します。ただし、同図は両端が固定接続されるラーメン要素で、その他に両端が回転接続されるトラス要素、および一端が固定接続で多端が回転接続の混合要素もあります。



x 、 y 、 z : 全体座標系

各方向変位と力を u 、 v 、 w と F_x 、 F_y 、 F_z とする。

各方向の回転変位を θ_x 、 θ_y 、 θ_z 、とモーメントを M_x 、 M_y 、 M_z とする（右回りが正）。

x_B 、 y_B 、 z_B : 部材座標系

部材軸方向を x_B とする。

各方向変位、力等は上記変数に添え字Bを付して表わす。

線分要素の物性

E : ヤング率、 ν : ポアソン比

γ : 比重量（重力）、 A : 断面積、 L : 長さ

I_{yB} : y_B 軸回りの断面2次モーメント

I_{zB} : z_B 軸回りの断面2次モーメント

K : サンプナン振り定数

図1-1 3次元ラーメン用の線分要素

他方、ソリッドの立体3次元構造では図1-2の六面体2次要素（20節点）を使用します。

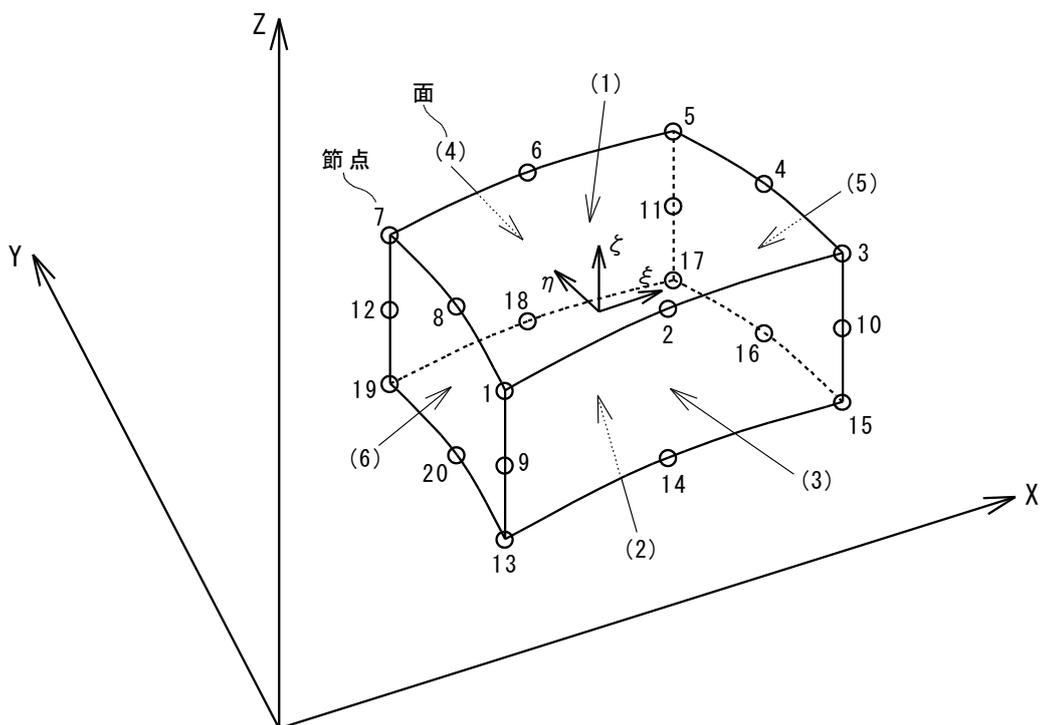


図1-2 立体構造用の六面体2次要素

これら部材3次元と立体3次元の要素の詳しい説明は、それぞれの構造解析の説明書を参照してください。各節点の変位は、部材3次元では $u, v, w, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ の6つ、立体3次元では u, v, w の3つです。

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、各積分点の相当応力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応力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、「複合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。

先ず、図1-3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。

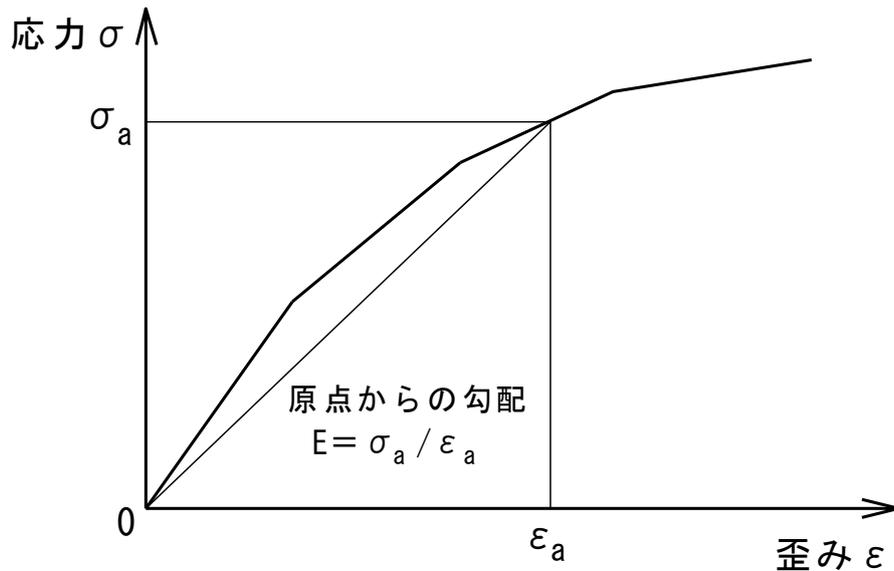


図1-3 非線形弾性の説明図

1) 部材要素の場合

ある部材断面の相当応力 σ_a が求まったとき、グラフから σ_a に対応する歪み ε_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。なお、1つの要素について、両端2節点でヤング率 E を算出し、その平均値を採用します。

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

ここで、相当応力 σ_a には下記のMises応力 σ_{Mises} を用います。

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

ただし、 σ_x : 要素軸断面の垂直応力で、軸応力と曲げ応力を合算したもの。
 曲げ応力は断面で一様でないため、最大曲げ応力に対する比率（評価係数）を設定しておく。

τ_{xy} 、 τ_{xz} : 要素軸断面のy軸方向、z軸方向の剪断応力。

剪断応力は断面で一様でないため、最大剪断応力に対する比率（評価係数）を設定しておく。

2) 立体要素の場合

相当歪み ε_a は次式で計算します。

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

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。

$$\sigma_{Mises} = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right\}} \quad (1-4)$$

1.3 実際構造への適合調整

部材 3 次元の非線形弾性解析は近似解法となります。近似解法となる理由は、断面の応力分布は計算せずに、断面の代表応力により歪み・応力グラフの該当点を求め、そのヤング率を適用するからです。そのため、実際構造への適合調整が必要です。調整に使用できる項目を以下に説明します。

① 曲げ応力と剪断応力の評価係数

要素断面では、軸応力は均等ですが、曲げ応力と剪断応力は断面の場所により異なります。そのため、最大曲げ応力と最大剪断応力に対してそれぞれ評価係数を掛けた値を断面代表応力に適用します。これらの評価係数を調整することができます。評価係数の値は1以下で、本ソフトでは両者とも初期値0.8にしています。

② 歪み・応力グラフの設定点

非線形弾性の歪み・応力グラフの設定点を変える方法です。特に原点の次の第1設定点を下方に動かすことにより調整可能です。

注) 原点から第1設定点への勾配は通常のヤング率ですので、その勾配は保持するのが原則です。

③ 要素の分割

要素両端 2 節点でそれぞれ断面代表応力に基づくヤング率を算出し、その平均値を採用するため、要素両端の応力差が大きいと誤差を生じやすくなります。そのため、要素両端の応力差が大きい要素は、要素を分割して改善してください。

第2章 プログラムの機能・構成

[VBプロジェクト名] ComFEM3NL

本ソフトでは複合3次元構造の非線形弾性の構造解析を行ないます。

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」、「計算」、「後処理」、「終了」の4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。「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。

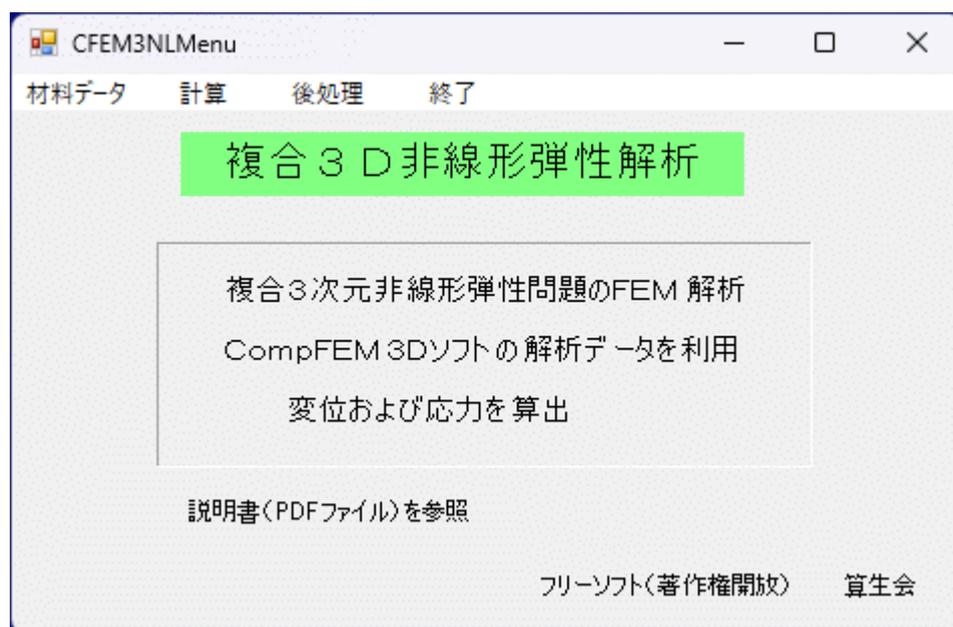


図2-1 「ComFEM3NL」ソフトのメニュー画面

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CFEM3NLMenuモジュール*で制御し、その下に「材料データ」、「計算」、「後処理」の3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」、「結果データファイル」の3種類を使用します。「構造データファイル」は、あらかじめ複合3次元構造解析(CompFEM3D)で作成しておく必要があります。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。

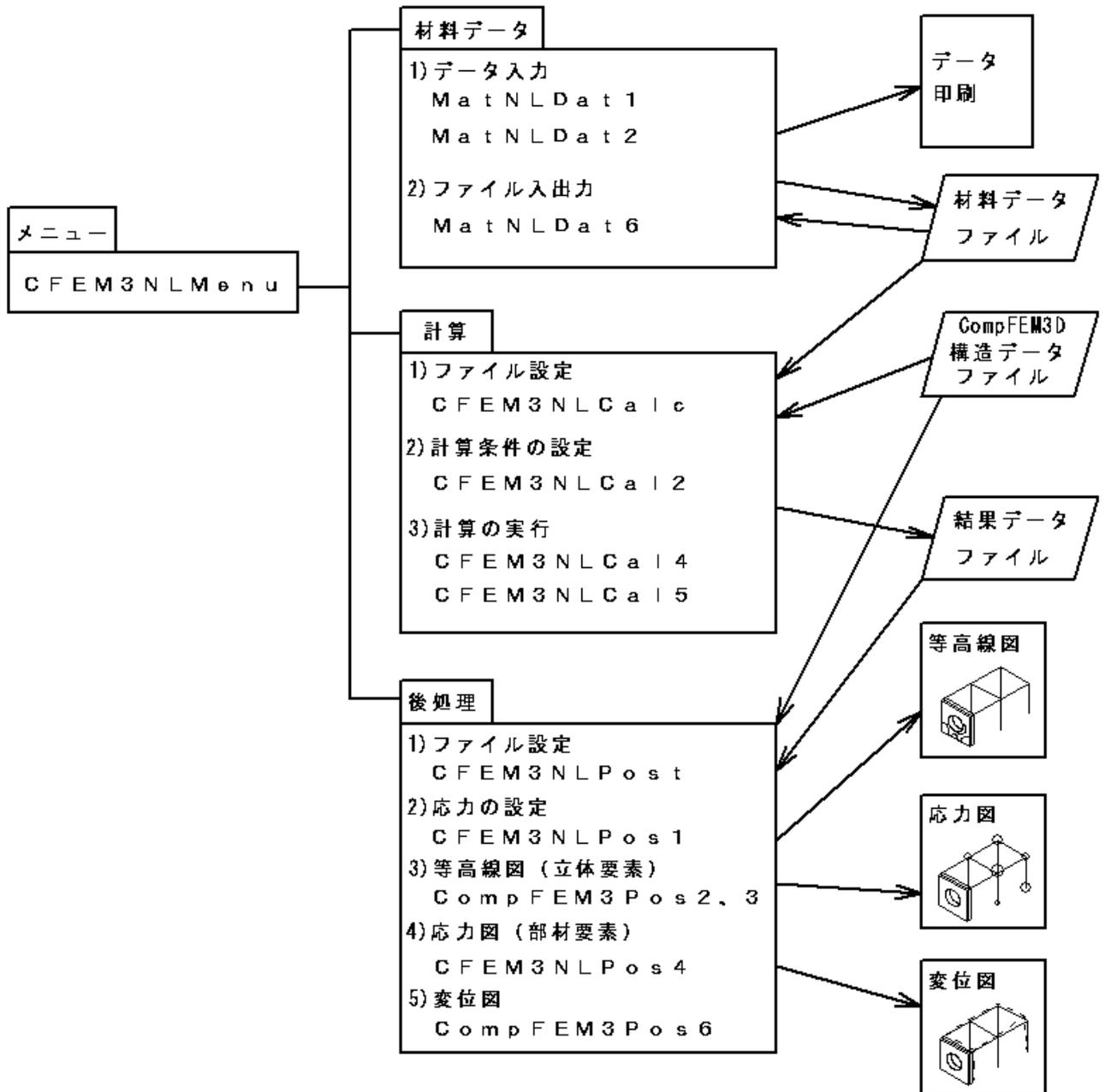


図2-2 「ComFEM3NL」ソフトのプログラム構成

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MatNLDat1とMatNLDat2は、各種データを画面入力するためのものです。特にMatNLDat2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 「ComFEM3NL」ソフトのファイルリスト

[全般]

ファイル名	内容
CFEM3NLCom.vb	共通変数の宣言とサブルーチンの定義
CFEM3NLMenu.vb	メニューの提示・選択

[材料データ]

ファイル名	内容
MatNLDat1.vb	データ仕様の入力
MatNLDat2.vb	各データの入力
MatNLDat6.vb	データファイルの入出力

[計算]

ファイル名	内容
CFEM3NLCalc.vb	計算に使用するファイルの設定
CFEM3NLCal2.vb	計算条件の設定
CFEM3NLCal4.vb	解析計算の実行（バンドマトリックス法）
CFEM3NLCal5.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
CFEM3NLPost.vb	後処理に使用するファイルの設定
CFEM3NLPos1.vb	等高線図・応力図の変数の指定
CompFEM3Pos2.vb	等高線図の仕様設定
CompFEM3Pos3.vb	等高線図の作画実行（立体要素）
CFEM3NLPos4.vb	応力図の作画（部材要素）
CompFEM3Pos6.vb	変位図の作画
E3DPlaneCut.vb	3次元画面の面切断の設定（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）

第3章 データの準備

構造データについては、「複合3次元構造解析 (CompFEM3D)」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。

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同じで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、相当応力 σ_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。
- ◇最左端は (0, 0) とします。

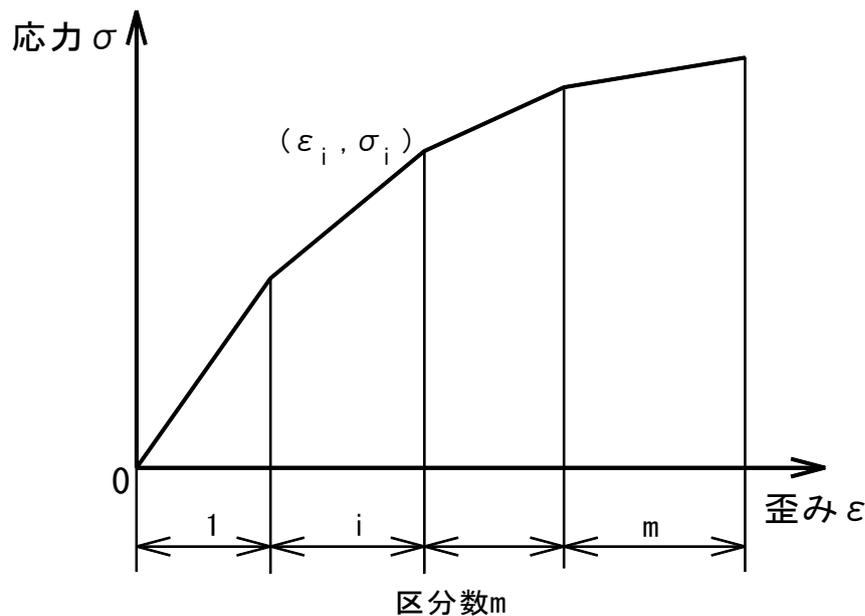


図3-1 非線形弾性の歪み・応力グラフ

以降では、図3-2に示す複合3次元構造テストモデルを例にとって説明します。同図のように、ラーメン構造の左端に立体要素のパネル面を組み込んでいます。

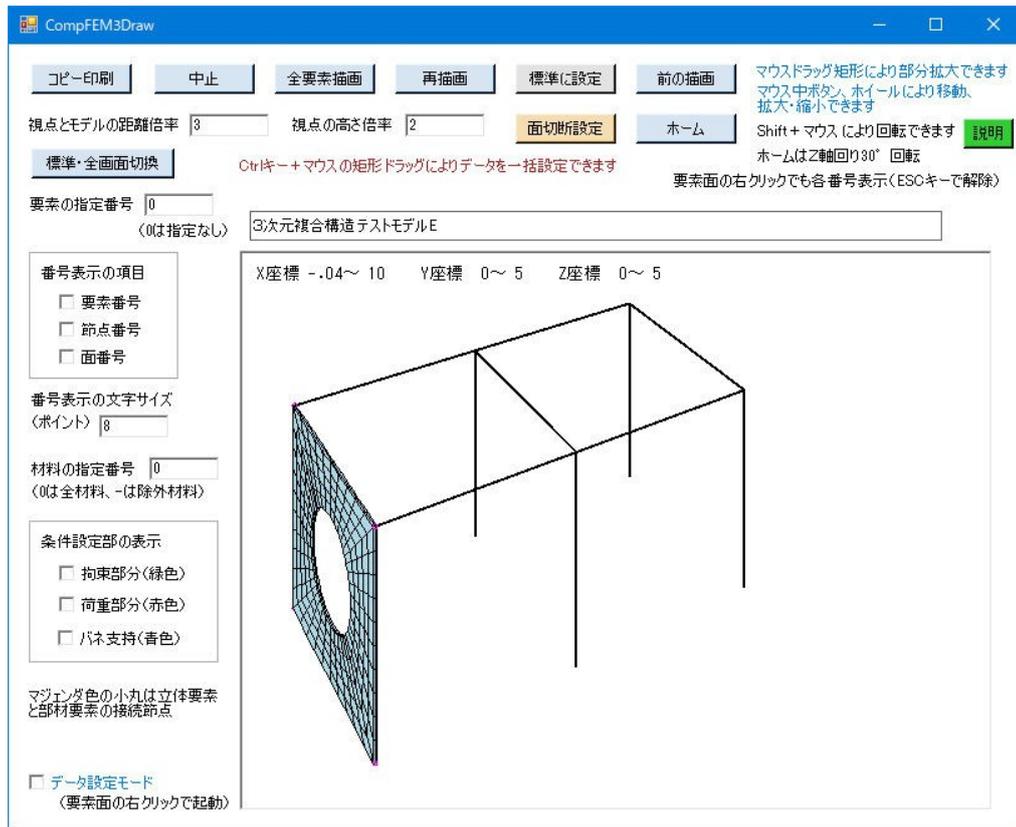


図3-2 複合3次元構造テストモデル

非線形弾性は図3-3の歪み・応力グラフによります。

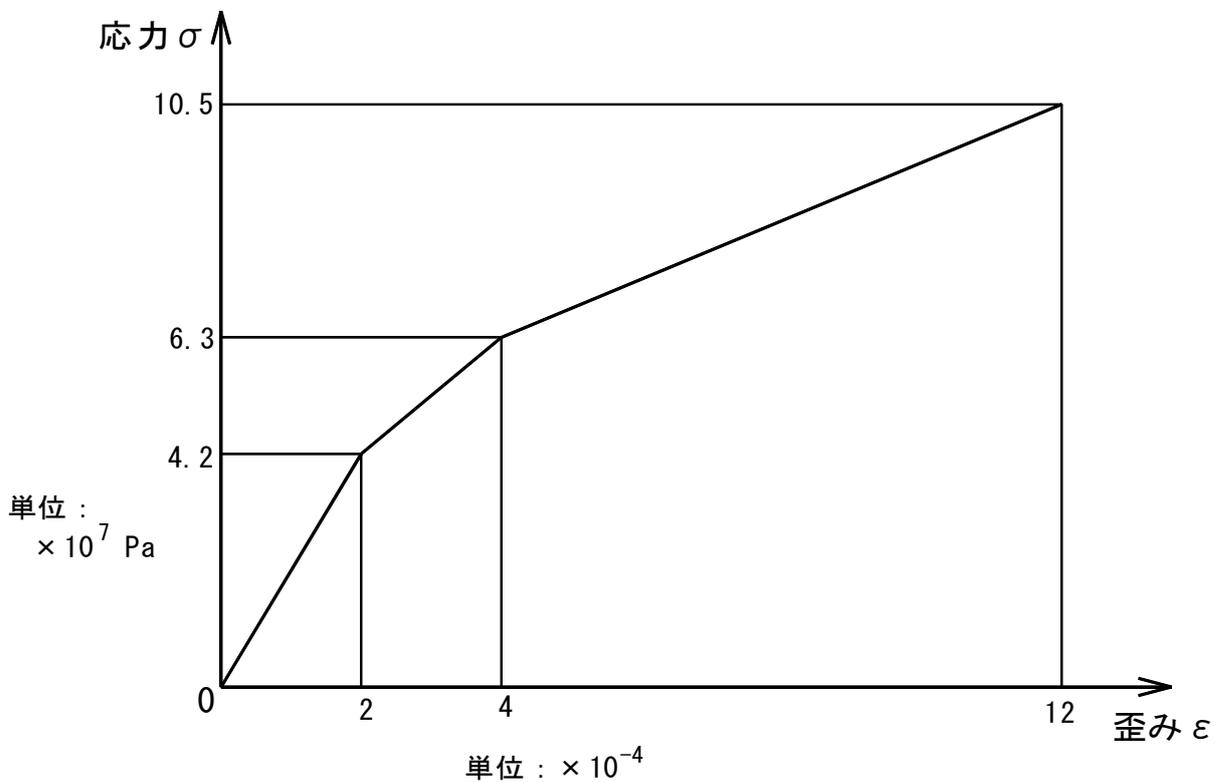


図3-3 テスト用歪み・応力グラフ

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。

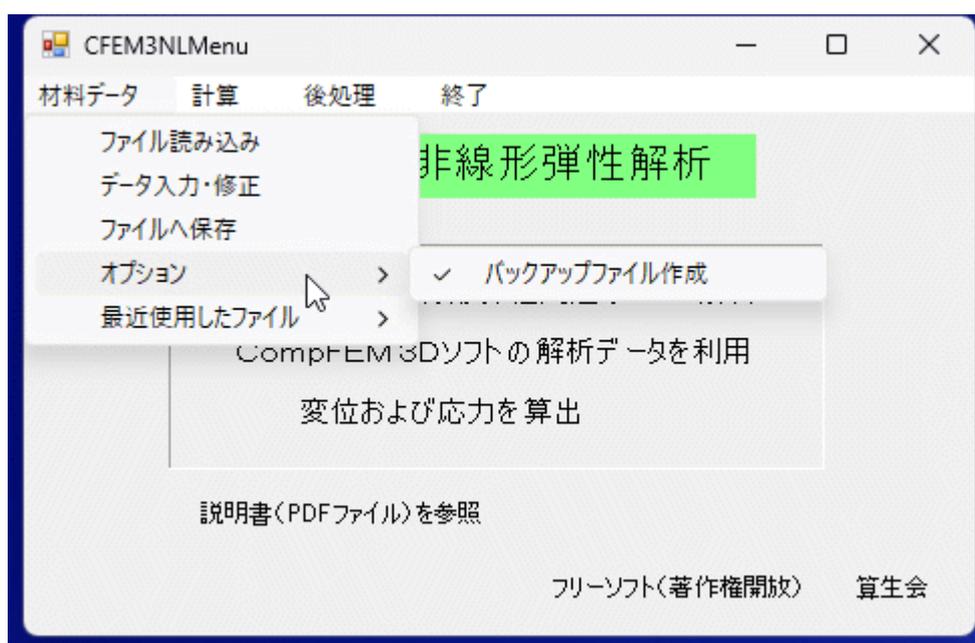


図4-1 「材料データ」サブメニュー画面

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

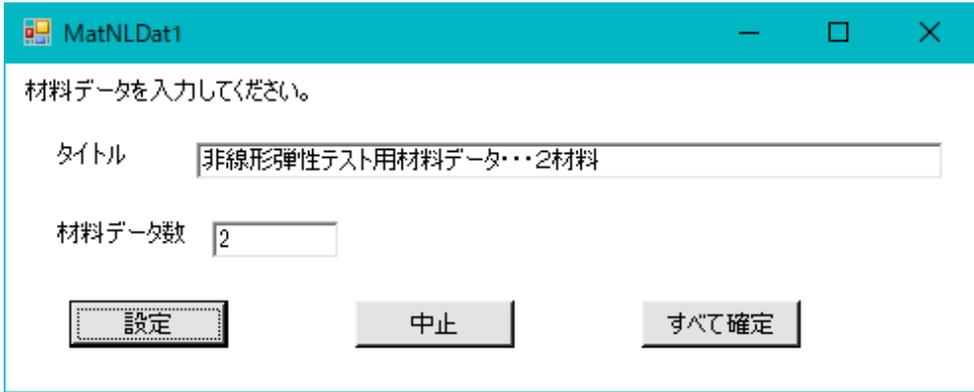
サブメニューの「データ入力・修正」を選択すると、図4-2のデータ仕様入力画面となります。同図では図3-2、3-3のテストモデルを取り上げており、以降も同じです。本画面の入力について、以下に補足説明します。

- 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。



The screenshot shows a dialog box titled "MatNLDat1" with the instruction "材料データを入力してください。" (Please input material data.). It contains two input fields: "タイトル" (Title) with the text "非線形弾性テスト用材料データ...2材料" and "材料データ数" (Number of material data) with the value "2". At the bottom, there are three buttons: "設定" (Settings), "中止" (Cancel), and "すべて確定" (All OK).

図4-2 データ仕様入力画面

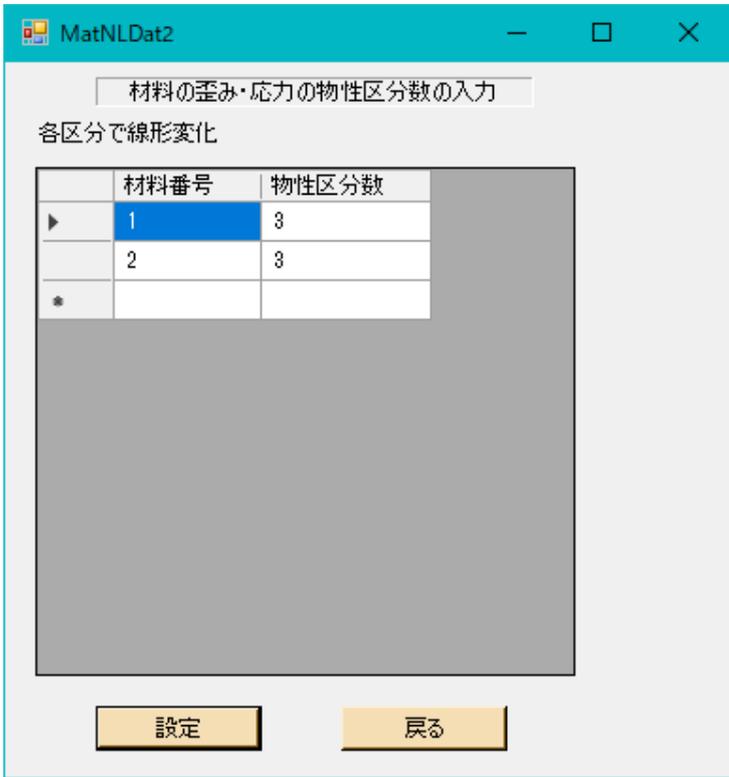
4.4 物性区分数の入力画面

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。



The screenshot shows a dialog box titled "MatNLDat2" with the instruction "材料の歪み・応力の物性区分数の入力" (Input of material property division numbers for strain and stress). Below the instruction, it says "各区分で線形変化" (Linear change in each division). A table is displayed with the following data:

	材料番号	物性区分数
▶	1	8
	2	8
*		

At the bottom, there are two buttons: "設定" (Settings) and "戻る" (Back).

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、計算時に相当応力 σ_a が最大区間をはみ出した場合は、最大区間の延長線上になります。

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	.0002	3E+07
2	.0004	4.5E+07
3	.0012	7.5E+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、部材3次元体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。

図4-5に材料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, ComFEM3NL
非線形弾性テスト用材料データ . . . 2 材料
材料データ数, 2
各材料の物性区分数（材料番号、区分数）
  1, 3
  2, 3
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, .0002, 3E+07
    2, .0004, 4.5E+07
    3, .0012, 7.5E+07
材料番号, 2
  区分番号、歪み、応力
    0, 0, 0
    1, .0002, 4.2E+07
    2, .0004, 6.3E+07
    3, .0012, 1.05E+08
```

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 「計算」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「計算」のサブメニュー画面を図5-1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ります。

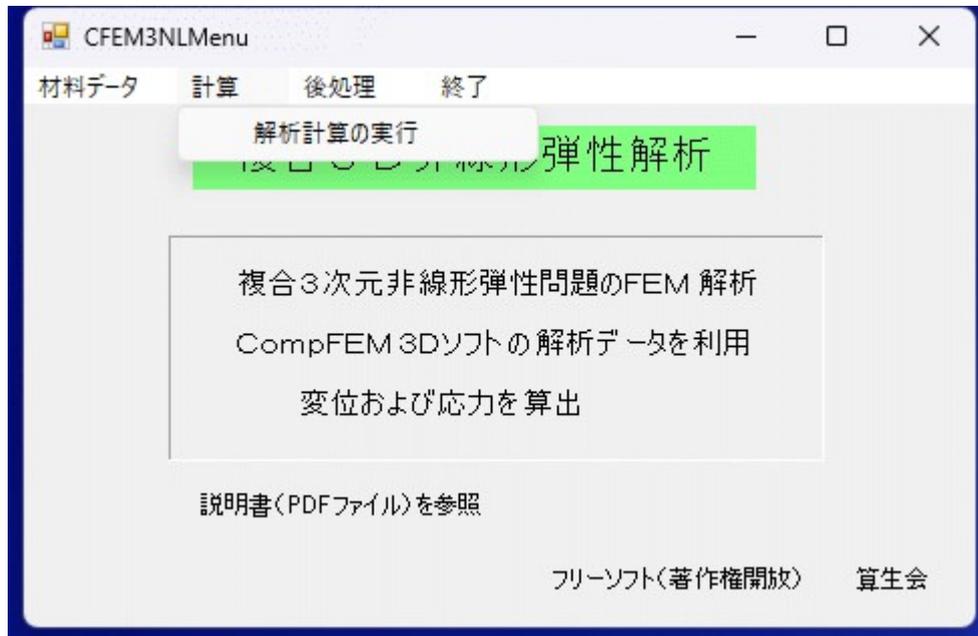


図5-1 「計算」サブメニュー画面

5.2 「計算」ファイル設定

図5-2に「計算」ファイル設定画面を示します。

- ① 「CompFEM3D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、「CompFEM3D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 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。

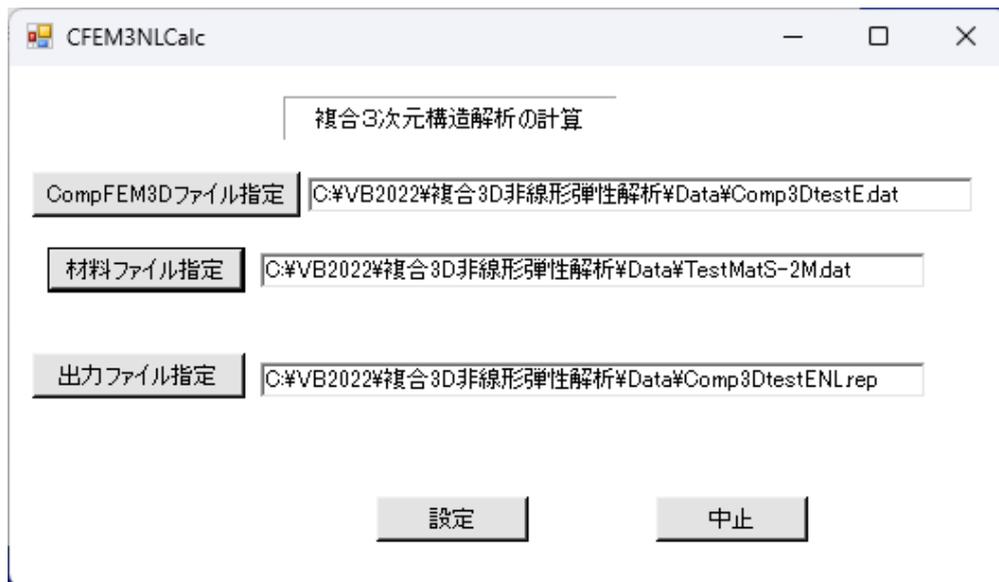


図5-2 「計算」ファイル設定画面

5.3 計算条件入力画面

図5-3に計算条件入力画面を示します。

- ①変形区分で「小変形」か「大変形」を選択できます。「大変形」を選択すると同図のように、最大繰返し計算回数等が入力表示されます。
 - ◇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。
- ②次に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。
- ③さらに曲げ応力の評価係数と剪断応力の評価係数を入力します。これは部材要素に対して適用されます。
 - ◇評価係数は、歪み・応力関係評価で適用する対象応力の最大値に対する比で、1以下とします。初期設定では0.8にしており、実際の構造に合わせて適宜調整します。
 - ◇問題タイプがトラスの場合、曲げ応力の評価係数がありません。
- ④ソルバー選択で、「スカイライン法」と「バンドマトリックス法」のいずれかを選択します。
 - ◇通常は「スカイライン法」を使用してください。
 - ◇「バンドマトリックス法」では、FEM行列が必要に応じて分割され、大規模構造のメモリー不足を解決できます。

⑤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。

The screenshot shows a dialog box titled "CFEM3NLCal2" with the following settings:

- 変形区分 (Deformation Type): 小変形 (Small Deformation), 大変形 (Large Deformation)
- 最大繰返し計算回数 (Maximum Iteration Count): 20
- 収束基準誤差率 (Convergence Criterion Error Rate): .005
- 部材の曲げ応力の評価係数 (Evaluation Coefficient for Bending Stress): .8
- 部材の剪断応力の評価係数 (Evaluation Coefficient for Shear Stress): .8
- ソルバー選択 (Solver Selection): スカイライン法 (Skyline Method), バンドマトリクス法 (Band Matrix Method)

Buttons: 設定 (Settings), 戻る (Back)

Text: 計算条件を入力してください。 (Please enter calculation conditions.)

Text: 評価係数は、歪み・応力関係評価で適用する対象応力の最大値に対する比率(1以下) (Evaluation coefficient is the ratio of the maximum value of the target stress to be applied in the strain-stress relationship evaluation to the maximum value of the target stress (1 or less))

図5-3 計算条件入力画面

5.4 計算終了

図5-4に計算終了画面、図5-5に計算確認ダイアログ画面を示します。図5-4では、かかった計算時間も表示され、本テスト構造モデルでは3min46ssとなっています。また、図5-5の計算確認ダイアログ画面では、繰返し計算回数と最大値等データも表示されます。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。

The screenshot shows a dialog box titled "CompFEM3Cal5" with the following information:

- 計算終了! (Calculation Complete!)
- 計算結果をファイルへ出力しました。 (Calculation results were output to file.)
- END 0h 3min 47s 5697MB free
- 応力 計算中 0h 3min 47s (Stress Calculation in Progress)
- 残り 0h 27min 48s (Remaining)

A progress bar is shown at the bottom of the dialog.

図5-4 計算終了画面

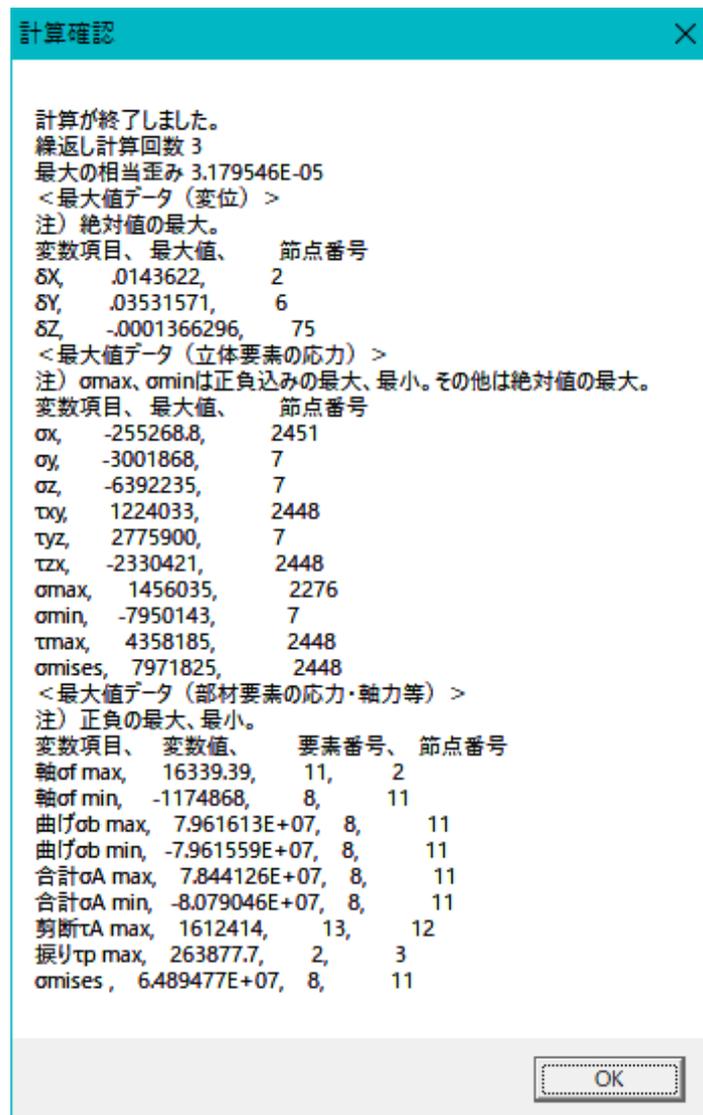


図5-5 計算確認ダイアログ画面

5.5 計算結果

5.2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5-6に結果ファイルへの出力例を示します。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本行以下に計算条件が示されています。

②計算結果の（ ）内にソルバー種類が出力されています。

③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が、それぞれ7584、4761、14324799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。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。

④収束計算回数は3回です。

⑤収束時の誤差率は2.849117E-08になっています。

⑥最大の相当歪みは3.179546E-05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。

⑦変位の出力1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。

⑧変位の出力2では、部材要素の節点について、回転変位 (θx 、 θy 、 θz) が出力されています。

⑨立体要素の節点応力が出力されています。

◇ 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部材要素の応力・軸力等が出力されています。出力項目は、要素No.、節点No.、軸応力 σ_{fz} 、軸力、剪断 FyB 、 FzB 、振りモーメント MxB 、曲げモーメント MyB 、 MzB 、曲げ応力 σ_{bU} 、 σ_{bL} 、合計応力 σ_{AU} 、 σ_{AL} 、合成剪断応力 τ_A 、振り応力 τ_p 、およびMises応力 σ_{mises} です。

⑪拘束節点の反力が出力されています。

⑫最大値データ（変位）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。

⑬最大値データ（立体要素の応力）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。

⑭最大値データ（部材要素の応力・軸力等）として、各変数について最大値、要素番号、節点番号が出力されています。

⑮最後に計算時間（本例では3min47s）と空きメモリー容量も出力されます。

```

<<複合3D非線形弾性解析の計算結果>>
[CompFEM3Dデータファイル], C:\VB2022\複合3D非線形弾性解析\Data\Comp3DtestE. dat
3次元複合構造テストモデルE
[材料データファイル], C:\VB2022\複合3D非線形弾性解析\Data\TestMatS-2M. dat
非線形弾性テスト用材料データ・・・2材料
曲げ応力の評価係数, .8
剪断応力の評価係数, .8
最大繰返し計算回数, 20
収束基準誤差率, .005
-----
*** 計算結果 (スカイライン法) ***
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
    7584,    4761,    14324799
-----
収束計算回数, 3
誤差率, 2.849117E-08
最大の相当歪み, 3.179546E-05
-----
** 変位の出力1 **
<節点番号、 $\delta X$ 、 $\delta Y$ 、 $\delta Z$ >
1,    0,    0,    0
2,    .0143622,    2.035446E-06,    -2.184068E-05
3,    0,    0,    0
4,    .01435016,    .01096613,    -2.493249E-05
5,    0,    0,    0
6,    .0143449,    .03531571,    -1.579836E-05
7,    0,    0,    0
.....
2522,    .01260265,    -6.040305E-06,    8.306315E-05
2523,    .01260265,    2.027103E-06,    -2.340738E-05
2524,    .01260265,    1.009083E-05,    -.0001298774
2525,    .01326793,    -5.878047E-06,    8.304611E-05
2526,    .01326792,    -1.64927E-06,    2.981798E-05
2527,    .01326791,    6.777449E-06,    -7.665293E-05
2528,    .01326791,    1.098143E-05,    -.0001298897
** 変位の出力2 **
<節点番号、 $\theta x$ 、 $\theta y$ 、 $\theta z$ >
1,    .01326791,    1.098143E-05,    -.0001298897
2,    .01326791,    1.098143E-05,    -.0001298897
3,    .01326791,    1.098143E-05,    -.0001298897
4,    .01326791,    1.098143E-05,    -.0001298897
5,    .01326791,    1.098143E-05,    -.0001298897
6,    .01326791,    1.098143E-05,    -.0001298897
7,    .01326791,    1.098143E-05,    -.0001298897
8,    .01326791,    1.098143E-05,    -.0001298897
9,    .01326791,    1.098143E-05,    -.0001298897
10,    .01326791,    1.098143E-05,    -.0001298897
11,    .01326791,    1.098143E-05,    -.0001298897
12,    .01326791,    1.098143E-05,    -.0001298897

```

①

②

③

④

⑤

⑥

⑦

⑧

図5-6 (1/3) 結果ファイルへの出力例

**** 立体要素の節点応力の出力 **** ⑨
 <節点番号、 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 、 σ_{max} 、 σ_{min} 、 τ_{max} 、 σ_{mises} >
 1, -237540.3, -2852786, -6062275, 46168.64, -2632261, 46168.65, -236769, -
 7540927, 3652079, 6806844
 2, 2438.552, -11966.69, 43464.71, -46168.87, -6815.024, 46168.64,
 84601.63, -58623.09, 71612.36, 124138.3
 7, -250162.6, -3001868, -6392235, 46168.53, 2775900, -46168.74, -252440.7,
 -7950143, 3848851, 7178121
 8, 6810.814, 162170.5, 36723.17, -46168.09, 58159.38, -46168.08,
 203526.7, -26837.32, 115182, 208136.2
 13, 57362.23, -1810698, -4632416, 838455.8, -2289015, 1597640, 561896.6,
 -6413249, 3487573, 6496771

 2526, -15065.53, 143974, 25069.2, 22705.29, -56440.69, -11163.11, 169938,
 -18563.2, 94250.62, 178881.1
 2527, 20152.28, 142412.5, 23507.73, -90042.75, 158500.3, -56174.34,
 293381.1, -86678.17, 190029.7, 351717.7
 2528, 10378.18, 113878.3, 977.9468, -62043.49, 262095.5, -38459.77,
 341390.7, -211065.2, 276228, 483571.5

**** 部材要素の応力・軸力等の出力 **** ⑩
 <要素No.、節点No.、 σ_f 、軸力、 F_yB 、 F_zB 、 M_xB 、 M_yB 、 M_zB 、
 σ_{bU} 、 σ_{bL} 、 σ_{AU} 、 σ_{AL} 、 τ_A 、 τ_p 、 σ_{mises} >
 1, 1, -850220.3, -1788.858, -451.6703, 43.04876, -.4238241, -71.71533, -
 1388.825, 2.150265E+07, -2.150254E+07, 2.065243E+07, -2.235276E+07,
 808077.4, 92451.26, 1.810099E+07
 1, 2, -460220.3, -968.3008, 451.6706, -43.04876, .4238241, -143.5285, -
 869.527, 1.715692E+07, -1.715688E+07, 1.66967E+07, -1.76171E+07, 808077.9,
 92451.26, 1.424769E+07
 2, 3, -942974.6, -1984.013, -658.7068, -136.956, -1.209694, 403.9168, -
 1733.353, 3.861397E+07, -3.861371E+07, 3.767099E+07, -3.955668E+07,
 1119342, 263877.7, 3.190656E+07
 2, 4, -552974.6, -1163.455, 658.707, 136.956, 1.209694, 280.8631, -
 1560.182, 3.165847E+07, -3.165826E+07, 3.11055E+07, -3.221123E+07, 1119342,
 263877.7, 2.596886E+07

 12, 10, -20486.94, -43.10439, 580.1689, 231.1555, -.02731865, 577.8375, -
 568.228, 2.934304E+07, -2.934285E+07, 2.932256E+07, -2.936333E+07,
 941963.4, 5959.177, 2.35456E+07
 13, 6, -400631.1, -842.9253, -136.1768, -221.4229, .06921864, 553.6415, -
 1222.813, 3.73053E+07, -3.730505E+07, 3.690467E+07, -3.770568E+07,
 272323.7, 15099.07, 3.02476E+07
 13, 12, -400631.1, -842.9253, 956.7344, 221.4229, -.06921864, 553.4731, -
 1509.466, 4.118268E+07, -4.118241E+07, 4.078205E+07, -4.158304E+07,
 1612414, 15099.07, 3.344372E+07

**** 拘束境界の節点反力 **** ⑪
 <節点番号、 F_x 、 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z >
 1, 2.83044E+08, 9920209, 9664445, -71.71534, -1388.826, -.4238466
 3, -609.6762, -159.0665, 685.1417, 477.6449, -1610.644, -1.213817
 5, -504.8784, -558.858, 108.5976, 1533.999, -1435.747, -1.167635
 7, 2.661677E+08, -9311039, 1927793, 145.546, -1153.632, -.4281345

図5-6 (2/3) 結果ファイルへの出力例

```

9, -502.3199, -302.8485, 907.6921, 813.3426, -1336.082, -1.215329
11, -409.272, -702.473, 1055.176, 1869.215, -1180.486, -1.168769

```

<最大値データ (変位) >

⑫

注) 絶対値の最大。

変数項目、	最大値、	節点番号
$\delta X,$.0143622,	2
$\delta Y,$.03531571,	6
$\delta Z,$	-.0001366296,	75
$\theta X,$	-.002956701,	6
$\theta Y,$.002345216,	2
$\theta Z,$.002627227,	4

<最大値データ (立体要素の応力) >

⑬

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
$\sigma x,$	-255268.8,	2451
$\sigma y,$	-3001868,	7
$\sigma z,$	-6392235,	7
$\tau xy,$	1224033,	2448
$\tau yz,$	2775900,	7
$\tau zx,$	-2330421,	2448
$\sigma_{max},$	1456035,	2276
$\sigma_{min},$	-7950143,	7
$\tau_{max},$	4358185,	2448
$\sigma_{mises},$	7971825,	2448

<最大値データ (部材要素の応力・軸力等) >

⑭

注) 正負の最大、最小。

変数項目、	変数值、	要素番号、	節点番号
軸 $\sigma f_{max},$	16339.39,	11,	2
軸 $\sigma f_{min},$	-1174868,	8,	11
軸力 $_{max},$	34.37798,	11,	2
軸力 $_{min},$	-2471.916,	8,	11
剪断 $FyB_{max},$	956.7344,	13,	12
剪断 $FyB_{min},$	-658.7068,	2,	3
剪断 $FzB_{max},$	622.679,	8,	12
剪断 $FzB_{min},$	-622.679,	8,	11
振り $MxB_{max},$	1.209694,	2,	4
振り $MxB_{min},$	-1.209694,	2,	3
曲げ $MyB_{max},$	1603.276,	8,	11
曲げ $MyB_{min},$	-554.8058,	5,	6
曲げ $MzB_{max},$	143.2339,	11,	2
曲げ $MzB_{min},$	-1733.353,	2,	3
曲げ $\sigma b_{max},$	7.961613E+07,	8,	11
曲げ $\sigma b_{min},$	-7.961559E+07,	8,	11
合計 $\sigma A_{max},$	7.844126E+07,	8,	11
合計 $\sigma A_{min},$	-8.079046E+07,	8,	11
剪断 $\tau A_{max},$	1612414,	13,	12
振り $\tau p_{max},$	263877.7,	2,	3
$\sigma_{mises},$	6.489477E+07,	8,	11
END	0h 3min 47s	5697MB free	

⑮

図5-6 (3/3) 結果ファイルへの出力例

第6章 「後処理」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「後処理」のサブメニュー画面を図6-1に示します。同図のように5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6-1 「後処理」サブメニュー画面

6.2 使用ファイルの設定

図6-2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、コモン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、等高線図と応力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6-2 使用ファイル設定画面

6.3 等高線の指定画面（立体要素のみ）

図6-3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6-4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6-3 等高線指定画面

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
σ_x ,	-255268.8,	2451
σ_y ,	-3001868,	7
σ_z ,	-6392235,	7
τ_{xy} ,	1224033,	2448
τ_{yz} ,	2775900,	7
τ_{zx} ,	-2330421,	2448
σ_{max} ,	1456035,	2276
σ_{min} ,	-7950143,	7
τ_{max} ,	4358185,	2448
σ_{mises} ,	7971825,	2448

図6-4 最大値データの表示例

6.4 等高線図の仕様設定画面

図6-5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6-5 等高線図の仕様設定画面

6.5 等高線図の作画画面

図6-6に等高線図の作画画面を示します。ただし、等高線は立体要素のみに作画されます。

- 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。
- 4) 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。
- 5) 「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。
- 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) 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6-7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。
- 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6-8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。

◇等高線図の「説明」ボタンをクリックすると、図6-8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) 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。
- 10) 「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。
- 11) 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。
- 12) 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。

◇マウスドラッグは、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6-9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（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6-9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6-10に示します。

- 13) マウス右クリックで任意の節点を選択すると、図6-11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。

- 14) 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。

- 15) 「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。

- 16) 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。

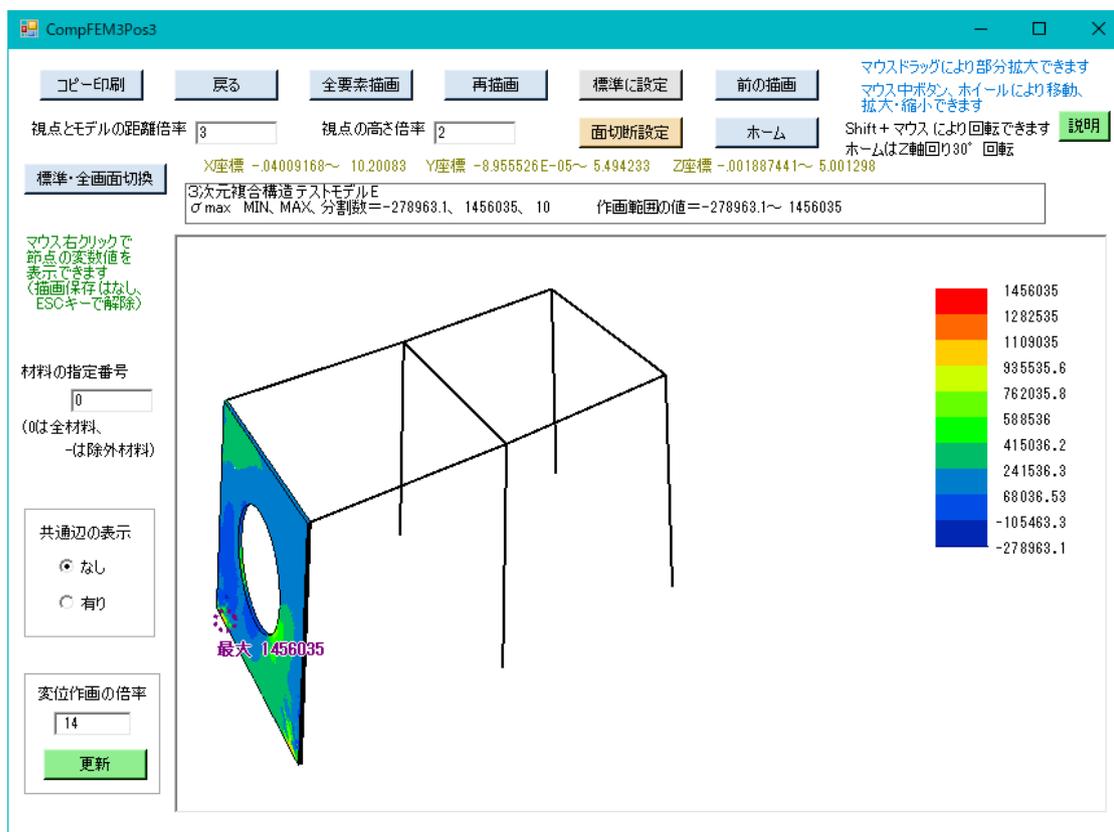


図6-6 等高線図の作画画面

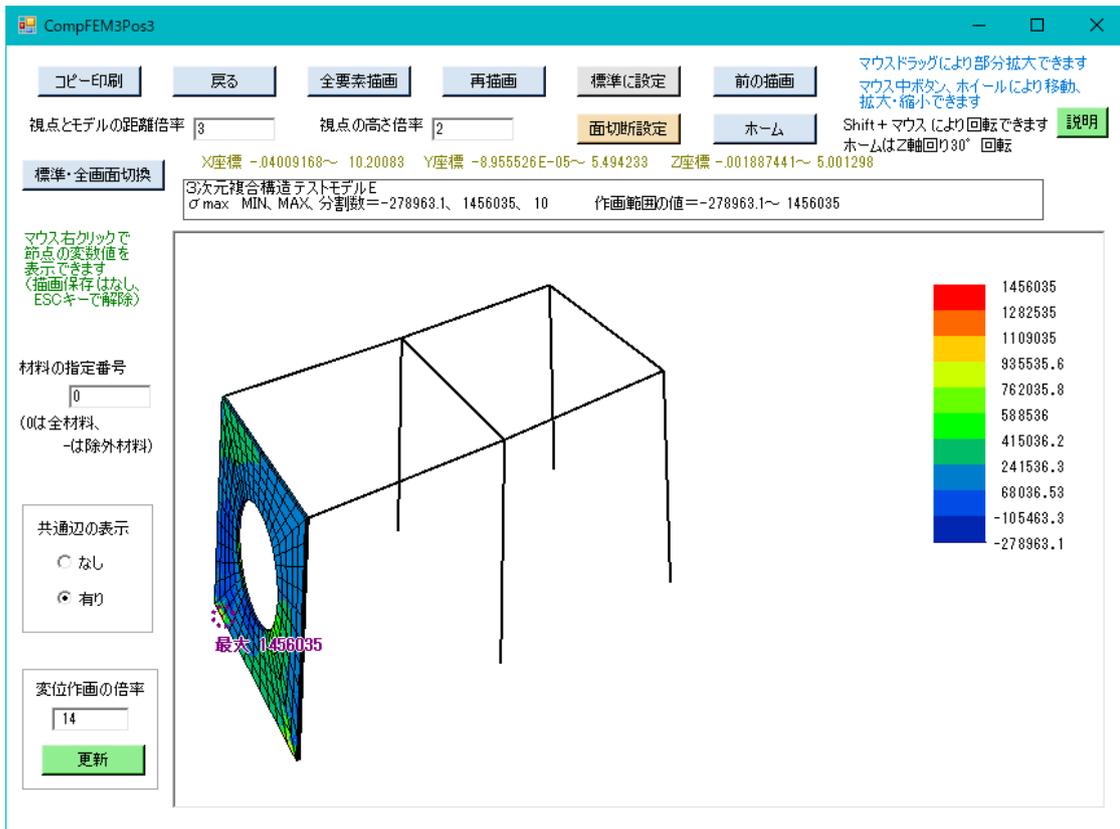


図6-7 等高線図の作画画面（共通辺の表示有り）

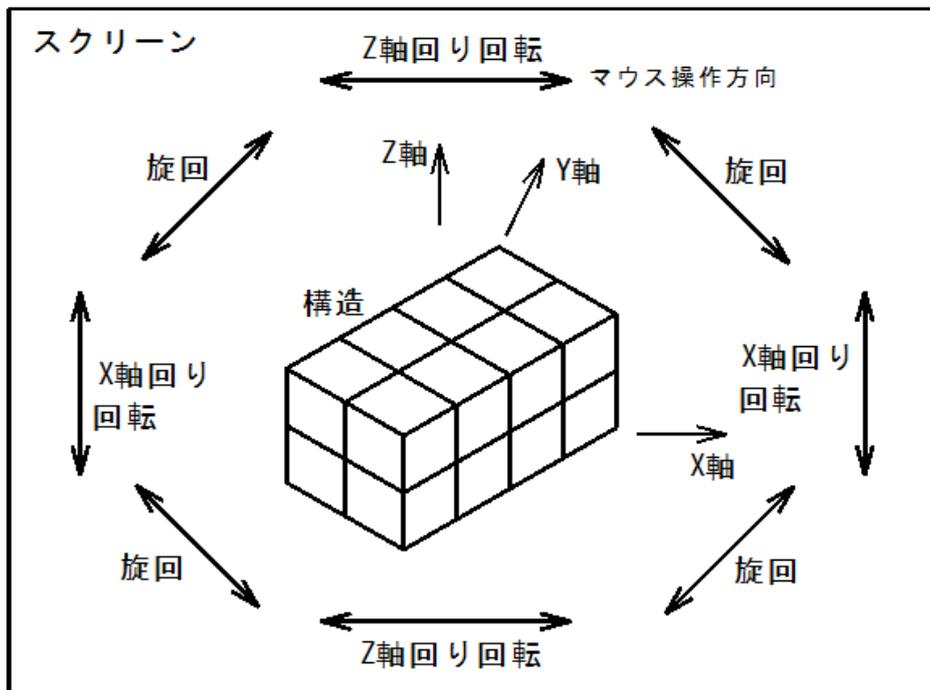


図6-8 マウスの移動方向と回転方向との関係（Shiftキー併用）

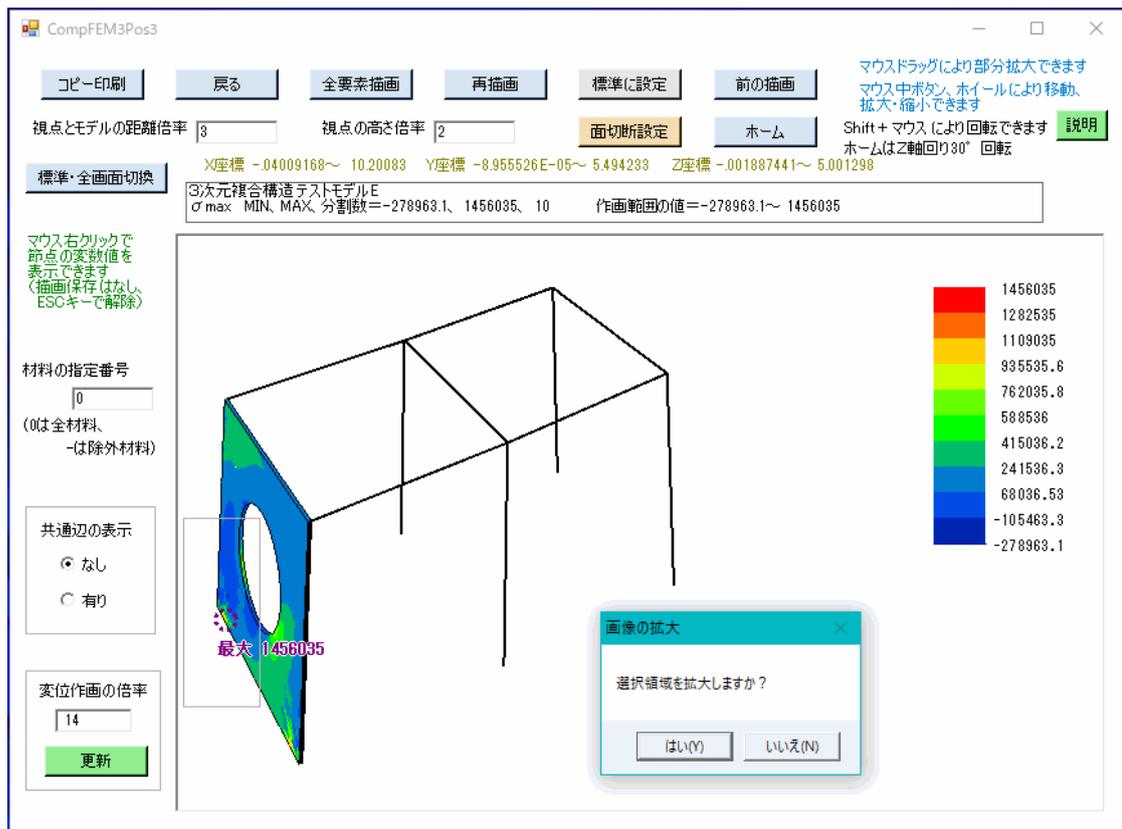


図6-9 等高線図における拡大領域選択例

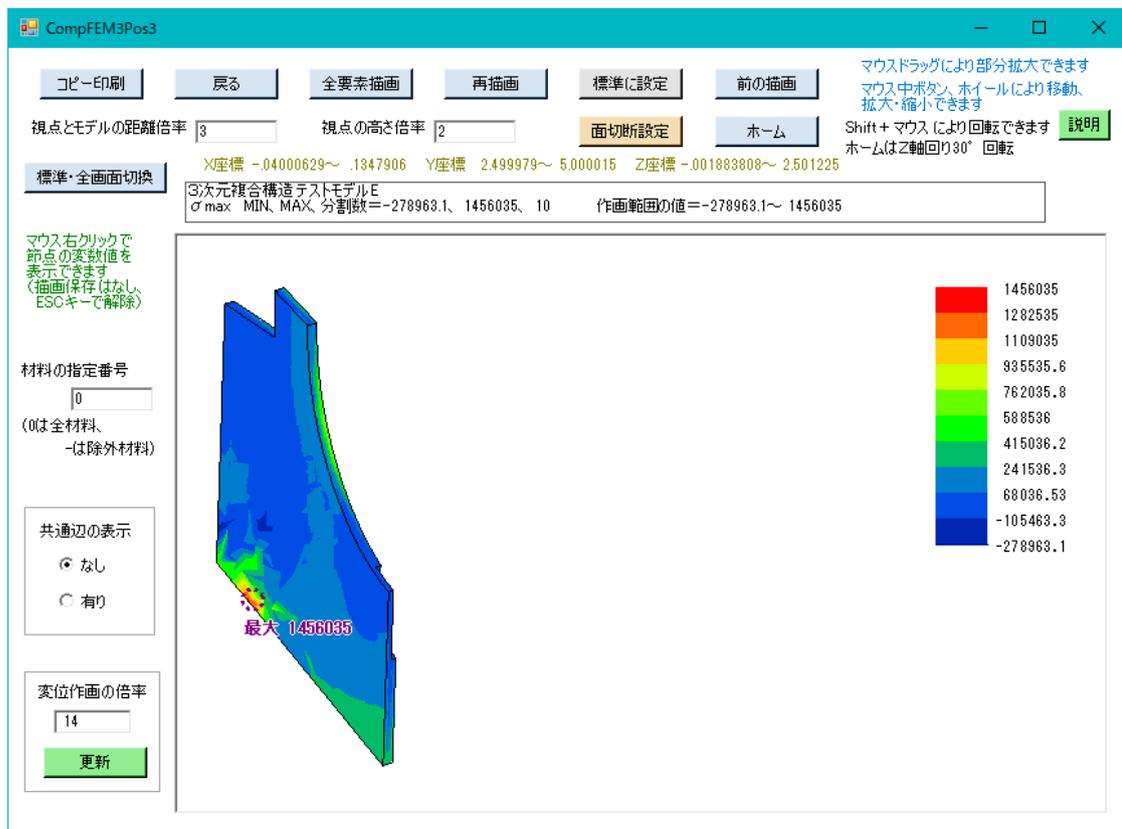


図6-10 等高線図の部分拡大例

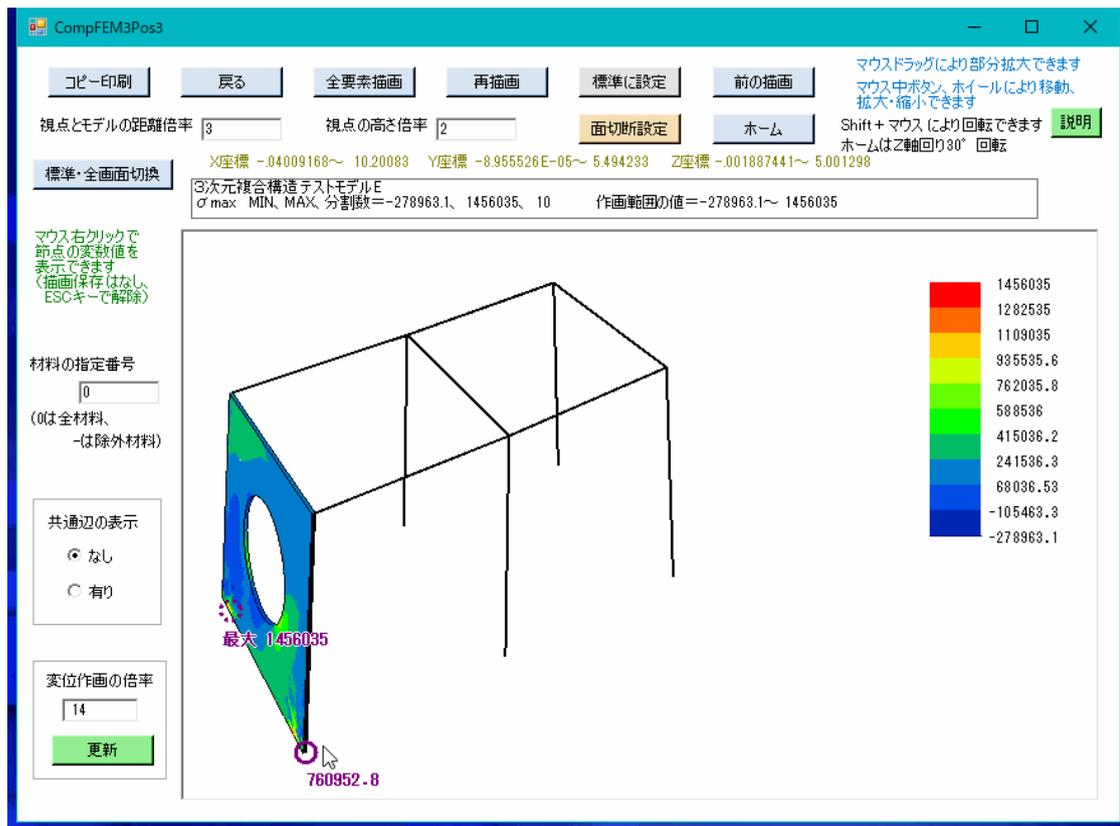


図6-11 等高線図の作画画面（マウス右クリックの節点の変数値表示）

6.6 変位図の作画画面

図6-12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。
 - ◇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6-13のように構造図なしの変位図だけになります。なお、同図ではマウス右クリックの節点の変位値も表示しています。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、マウスド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。
 - ◇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」でマウスド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6-13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。
- 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、変位図の一部を拡大できます。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。

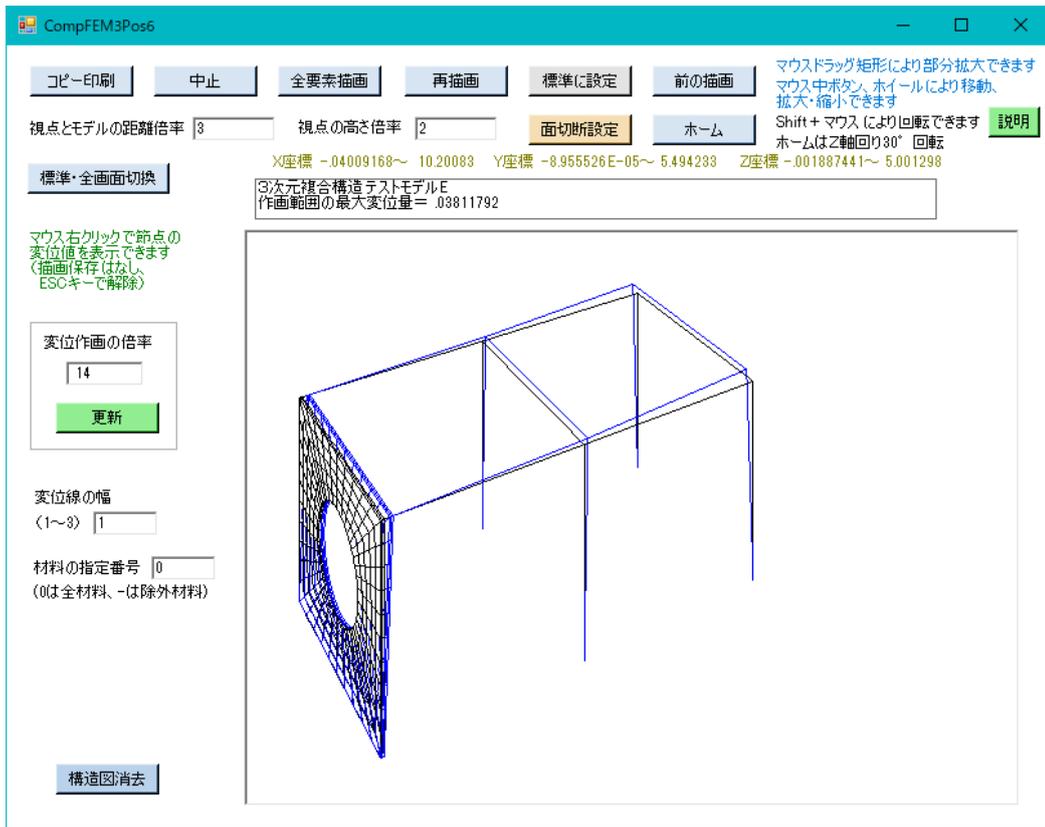


図6-12 変位図の作画画面

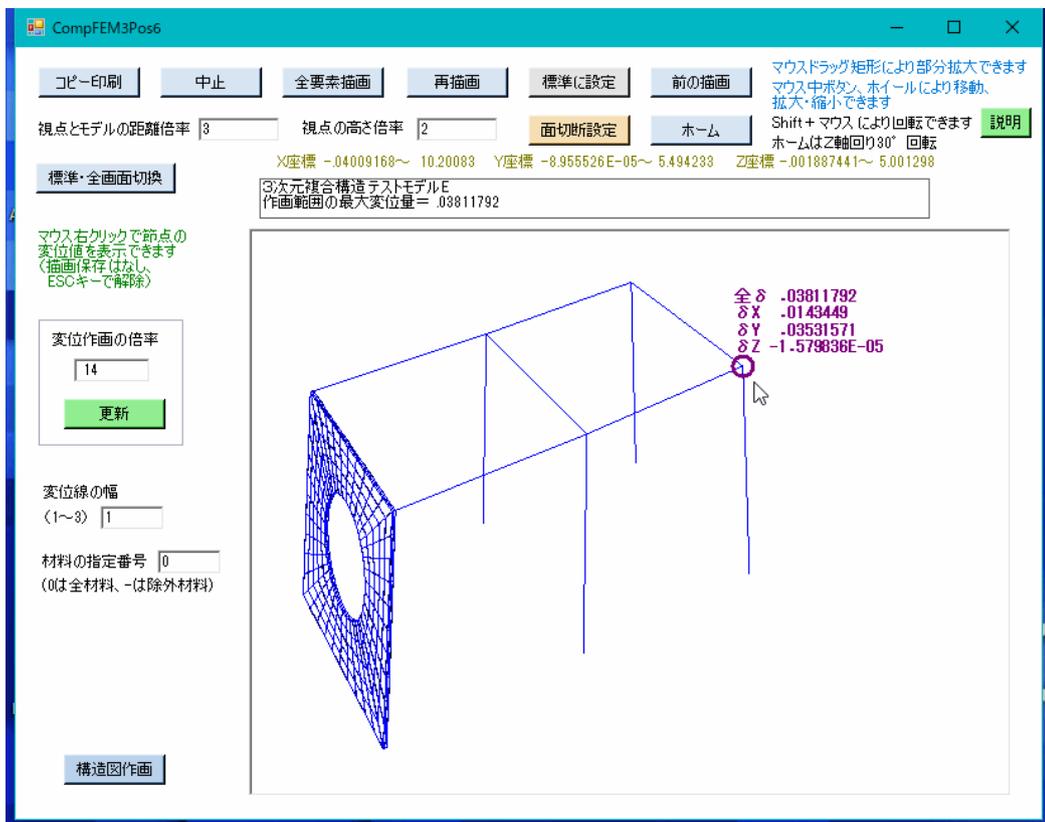


図6-13 変位図の作画画面（構造図消去、マウス右クリックの節点の変位値表示）

6.7 応力図の指定画面（部材要素のみ）

図6-14に応力図指定画面を示します。

①本画面で、指定したい変数項目を選択します。

◇ σ_f は軸荷重による軸応力、 σ_b は曲げ応力、 σ_A は合計応力で、正負（正：引張、負：圧縮）があります。

◇ τ_A は合計剪断応力、 τ_p は振り剪断応力で、正符号（絶対値）のみです。

②本画面で、「最大・最小値データ」のボタンをクリックすると、最大・最小値データが表示されます。

◇図6-15に最大・最小値データの表示例を示します。

③本画面で、「設定」ボタンをクリックすると応力図の作画画面に移ります。



図6-14 応力図指定画面



図6-15 最大・最小値データの表示例

6.8 応力図の作画画面

図6-16に応力図の作画画面を示します。

- ①同図のように、変形後の図上に各節点の応力の大きさが円で表示されています。また、応力の最大値と最小値が円の上部に表示されます。
 - ◇ σ の場合は、正が赤色、負が青色の円で表わされます。 τ は赤色のみです。
 - ◇表示された応力が生じる線分要素の端部を、薄緑色の太線で示しています。
- 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。
 - ◇0を設定すると、変位なしで応力図が作画されます。
- ③本画面の上側と左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、構造図の作画と同じです。
 - ◇応力図の「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。
- ④ただし、「応力円の作画倍率」と「全節点の応力値表示」のパラメーターが追加になっています。
 - ◇「応力円の作画倍率」は、応力円の大きさを調整するもので、倍率を大きくすると円も大きくなります。
 - ◇「全節点の応力値表示」のチェックを入れると、全節点の応力値が表示されます。
 - ◇「表示の文字サイズ」は、応力値、要素番号、節点番号に共通の文字サイズで、自由に変更できます。
- ⑤「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สด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สดラッグ矩形により、応力図の一部を拡大できます。操作方法は4.17節の構造図と同じです。
- ⑧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。
- 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、「戻る」ボタンをクリックして、応力図指定画面に戻ります。

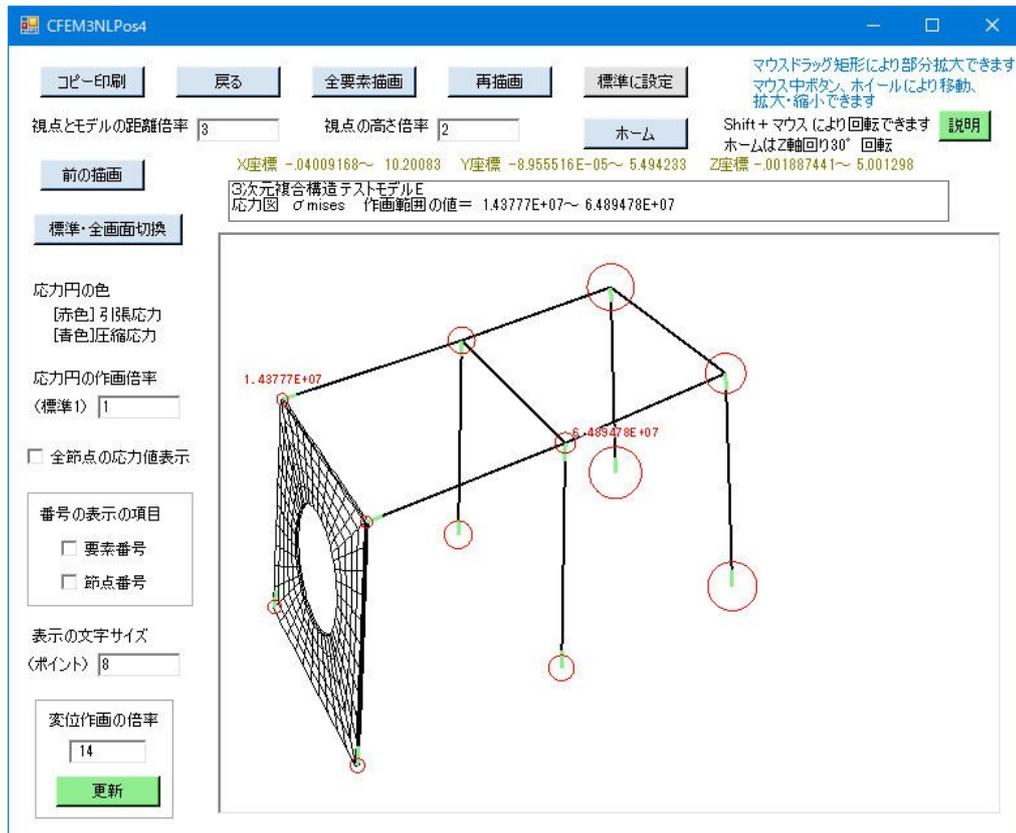


図6-16 応力図の作画画面

6.9 解析結果の主要値表示

図6-17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。

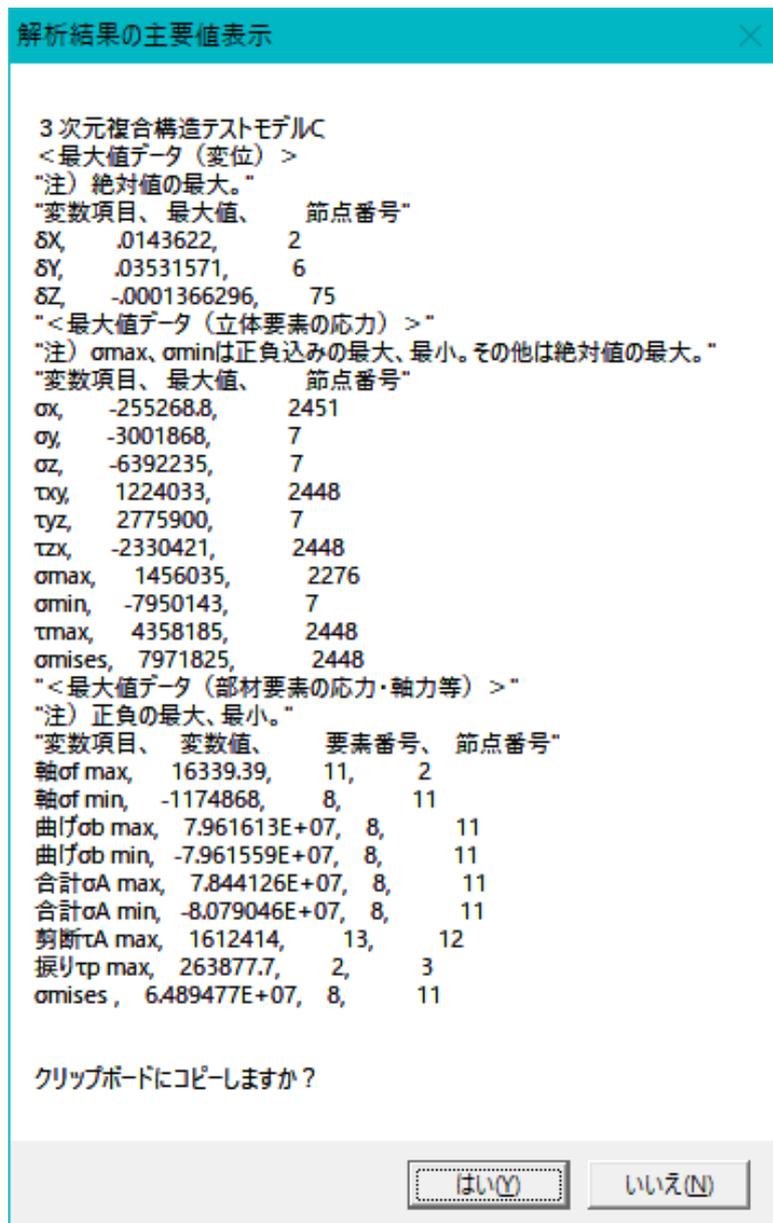


図6-17 解析結果の主要値表示の画面

[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) 「Visual Basicによる工学計算プログラム」、黒田 英夫、
CQ出版社、2001
- B6) 「Visual Basicによる数値解析プログラム」、黒田 英夫、
CQ出版社、2002

<C> 有限要素法・差分法・工学一般

- C1) 「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
- C2) 「有限要素プログラミング」、E. Hinton 他、川井 忠彦 監訳、
丸善 (株)、1981
- C3) 「マイコンによる有限要素解析」、戸川 隼人、
(株) 培風館、1982
- C4) 「流れと熱伝導の有限要素法入門」、矢川 元基、
(株) 培風館、1983
- C5) 「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
- C6) 「The Finite Element Method (Linear Static and Dynamic Finite Element
Analysis)」、Thomas J. R. Hughes、Dover Publications、2000

- C7) 「パソコンで解く骨組の静的・動的・弾塑性解析」、藤谷 義信 他
丸善（株）、2001
- 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) 「弾塑性力学の基礎」、吉田 総仁、
共立出版（株）、2005