**********　　2023年 4月
＊　「部材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 11　　・・・.NET 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

****

「部材３次元体解析K（Ｂａｒｓ３Ｄ）」の構造データと非線形弾性の材料データを用いて、部材３次元体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「部材３次元体解析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	12
第5章 「計算」プログラム	16
第6章 「後処理」プログラム	24
[参考文献]	35

第1章 有限要素法

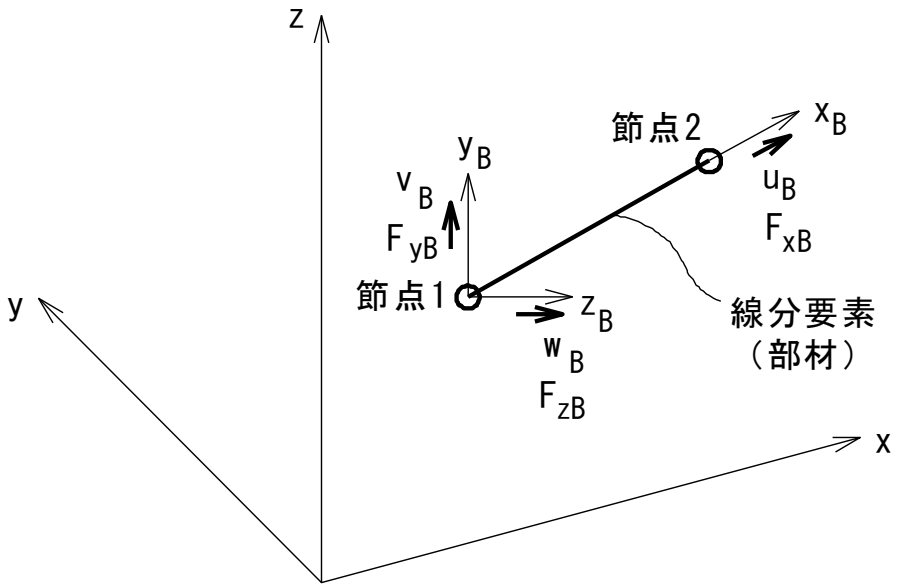
有限要素法の構造解析については、算生会「部材３次元体解析」ソフトの説明書を参照してください。ここでは、非線形弾性解析を主体に説明します。

1.1 使用要素

本ソフトはトラス構造、ラーメン構造、およびトラス・ラーメン混合構造を対象としています。トラスとラーメンの線分要素を図1-1および図1-2に示します。それらの要素の詳しい説明は、構造解析の説明書を参照してください。各節点の変位は、トラスでu,v,wの３つ、ラーメンではu,v,w, θ_x, θ_y, θ_zの６つです。

注）u,v,wの替わりにδ_x, δ_y, δ_zの記号を用いることもあります。

また、トラス・ラーメン混合構造における２種類の特殊要素を図1-3、1-4に示します。それらの特殊要素は一端が回転自由、多端が固定接続になっています。



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。

x_B、y_B、z_B：部材座標系

部材軸方向をx_Bとする。

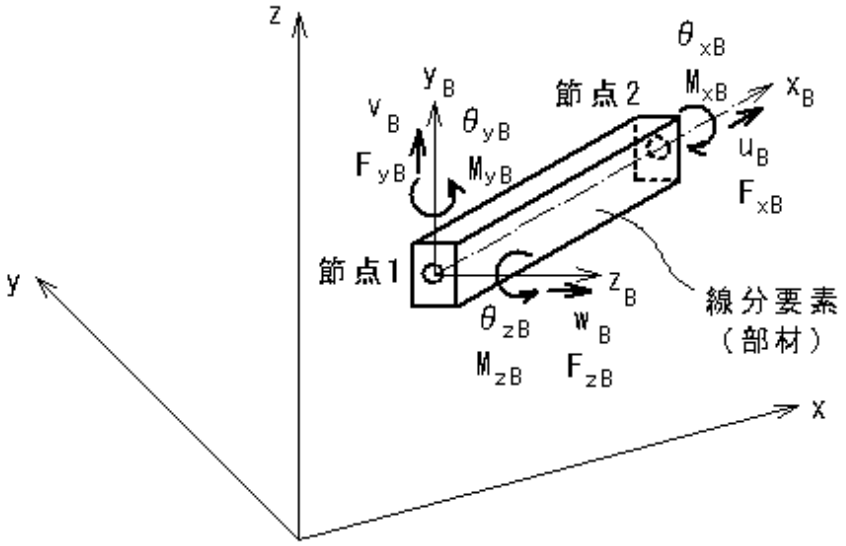
各方向変位、力等は上記変数に添え字Bを付して表わす。

線分要素の物性

E：ヤング率

γ：比重量（重力）、　A：断面積、　L：長さ

図1-1　トラス用の線分要素



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：サンブナン捩り定数

図1-2　　ラーメン用の線分要素

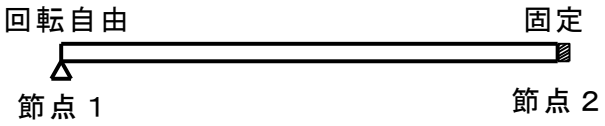


図1-3　左端回転自由・右端固定の要素

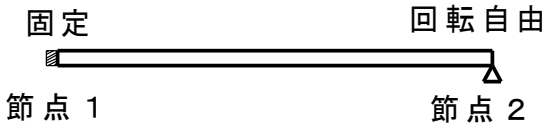


図1-4　左端固定・右端回転自由の要素

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、「部材３次元体解析」の構造データに設定された値を用います。

先ず、図1-5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に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。

$$E=\sigma_a/\varepsilon_a \qquad (1\text{-}1)$$

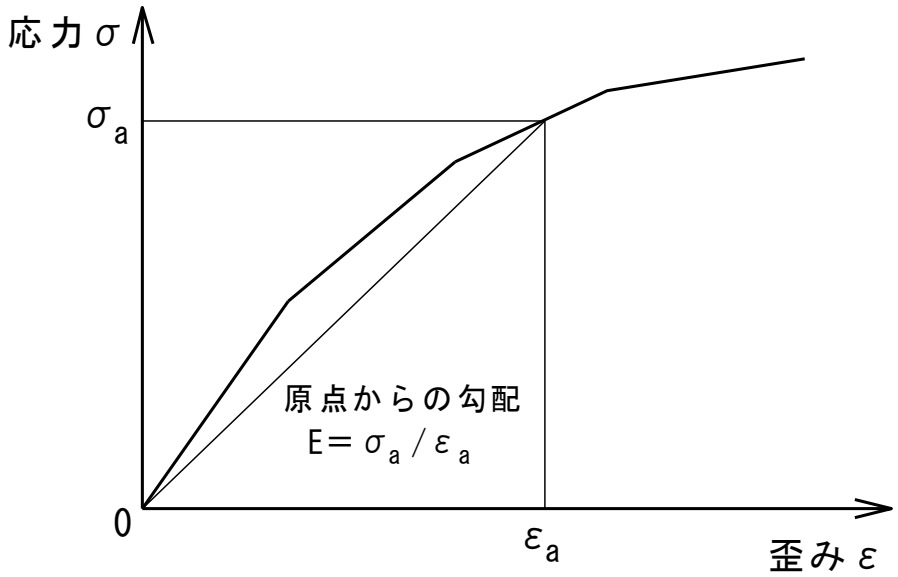


図1-5　　非線形弾性の説明図

ここで、相当応力σ_aには次式のMises応力σ_{Mises}を用います。

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

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_{xz}、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。

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］Ｂａｒｓ３ＮＬ

本ソフトでは部材３次元体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。

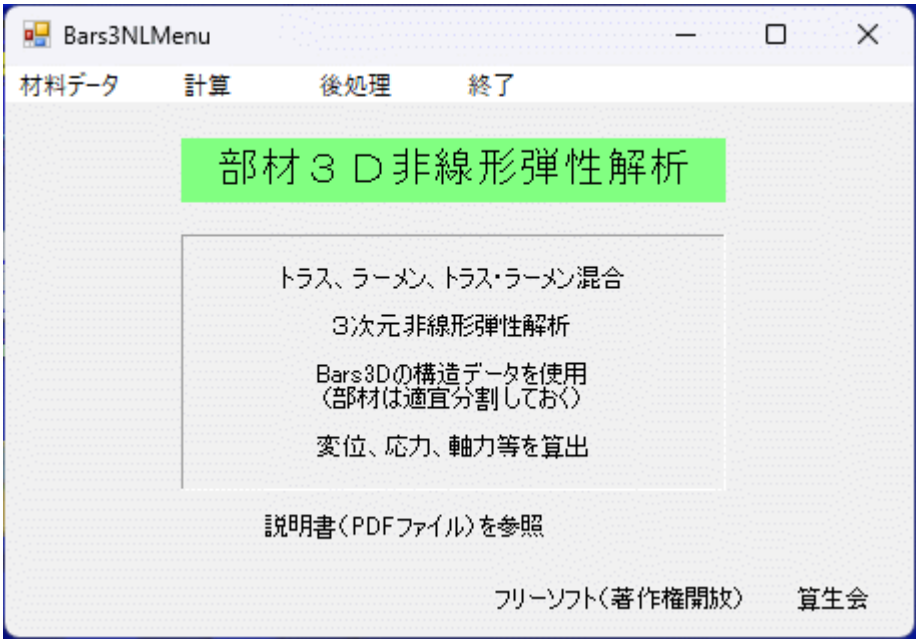


図2-1　「Ｂａｒｓ３ＮＬ」ソフトのメニュー画面

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Bars3NLMenu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、あらかじめ部材３次元体構造解析（Ｂａｒｓ３Ｄ）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。

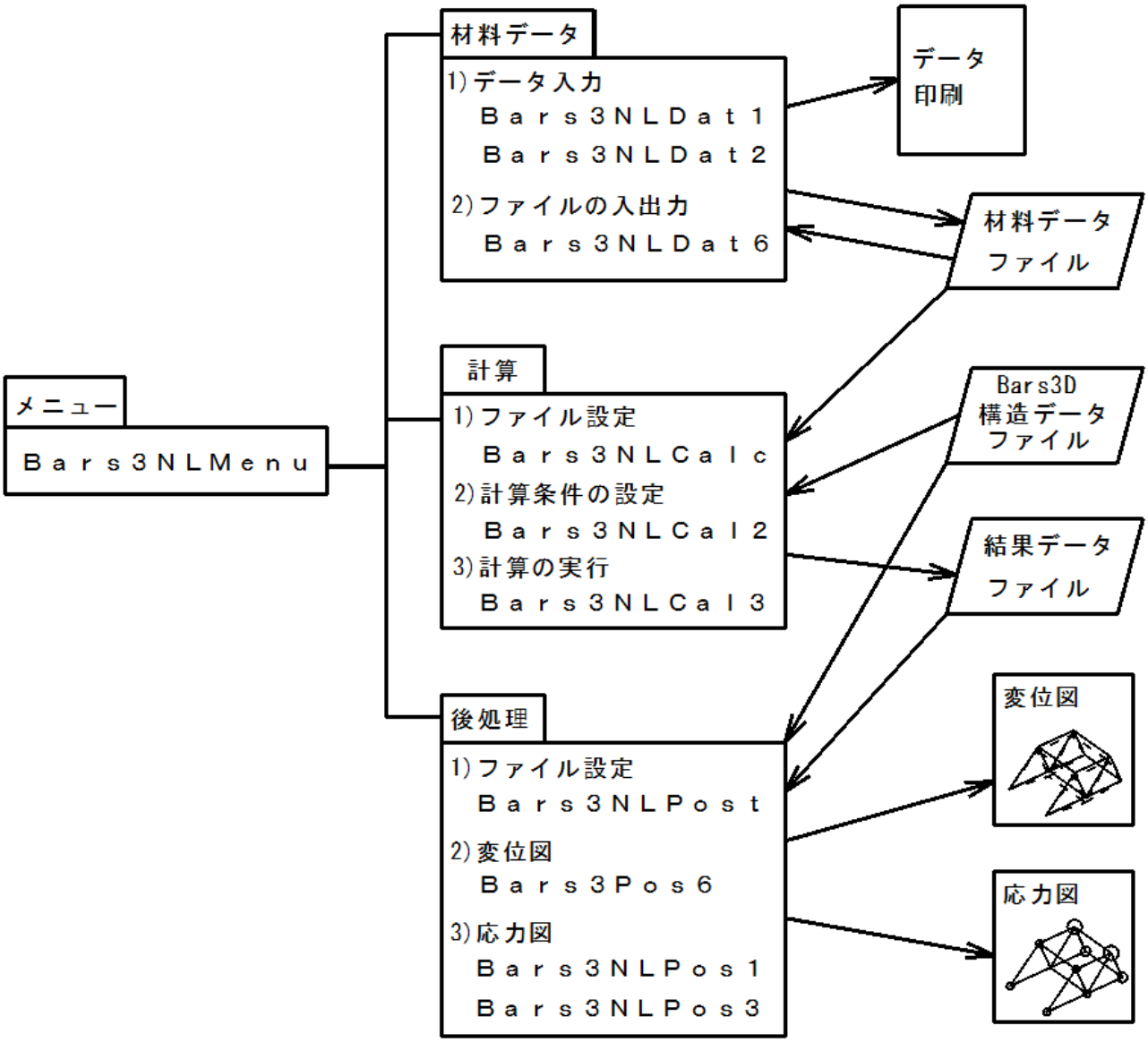


図2-2　　「Ｂａｒｓ３ＮＬ」ソフトのプログラム構成

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Bars3NLDat1とBars3NLDat2は、各種データを画面入力するためのものです。特にBars3NLDat2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　　「Ｂａｒｓ３ＮＬ」ソフトのファイルリスト

［全般］

ファイル名	内容
Bars3NLCom.vb	共通変数の宣言とサブルーチンの定義
Bars3NLMenu.vb	メニューの提示・選択

［材料データ］

ファイル名	内容
Bars3NLDat1.vb	データ仕様の入力
Bars3NLDat2.vb	各データの入力
Bars3NLDat6.vb	データファイルの入出力

［計算］

ファイル名	内容
Bars3NLCalc.vb	計算に使用するファイルの設定
Bars3NLCal2.vb	計算条件の設定
Bars3NLCal3.vb	解析計算の実行

［後処理］

ファイル名	内容
Bars3NLPost.vb	後処理に使用するファイルの設定
Bars3NLPos1.vb	応力図の設定
Bars3NLPos3.vb	応力図の作画
Bars3Pos6.vb	変位図の作画
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、「部材３次元体解析（Ｂａｒｓ３Ｄ）」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。

◇材料データの数は、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。

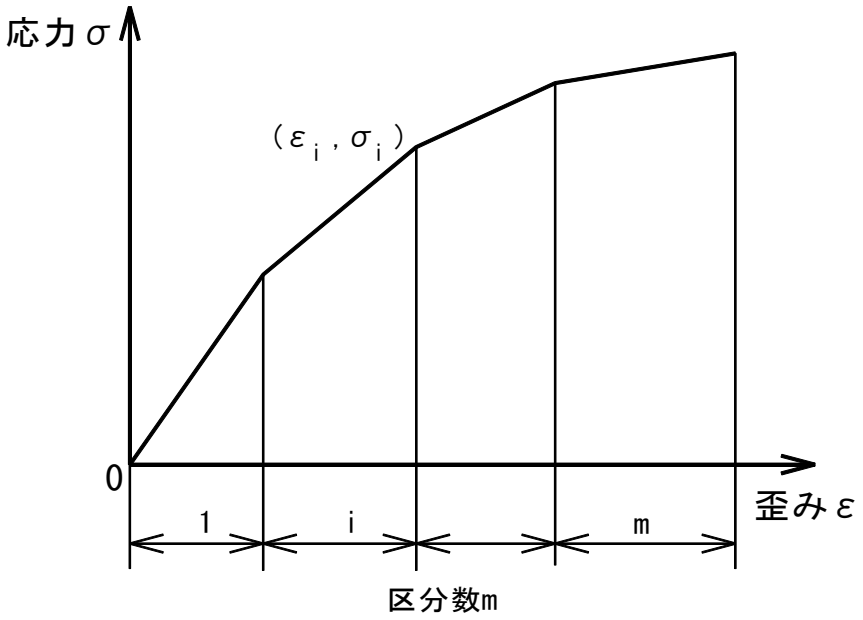
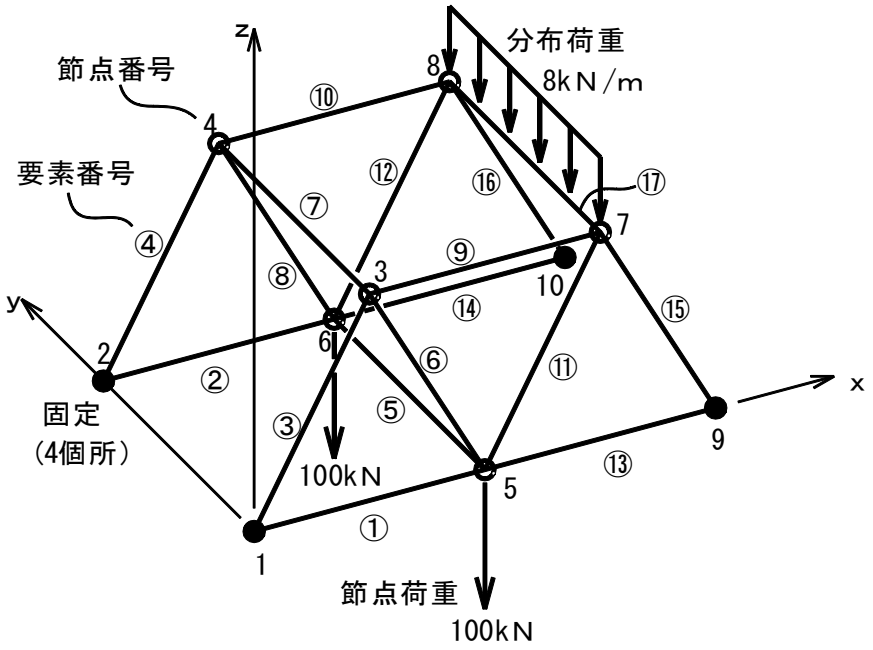


図3-1　　非線形弾性の歪み・応力グラフ

以降では、図3-2に示すラーメン構造テストモデル（初期データ用）を例に取って説明します。同図のように、4隅の節点1,2,9,10が固定され、節点荷重、表面圧分布荷重、および自重が作用します。ただし、同図の構造は初期データ用で、各要素を10等分したデータを解析計算に使用します。また、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。



［部材条件］全部材共通

ヤング率：2.1×10^{5}MPa　　ポアソン比：0.3

比重量：78kN/m^3

断面積：0.0112m^2　　長さ：10m

断面2次モーメント（第1軸）：2.22×10^{-4} m^4

（第2軸）：3.57×10^{-6} m^4

サンブナン捩り定数：1.52×10^{-6} m^4

図3-2　　ラーメン構造テストモデル（初期データ用）

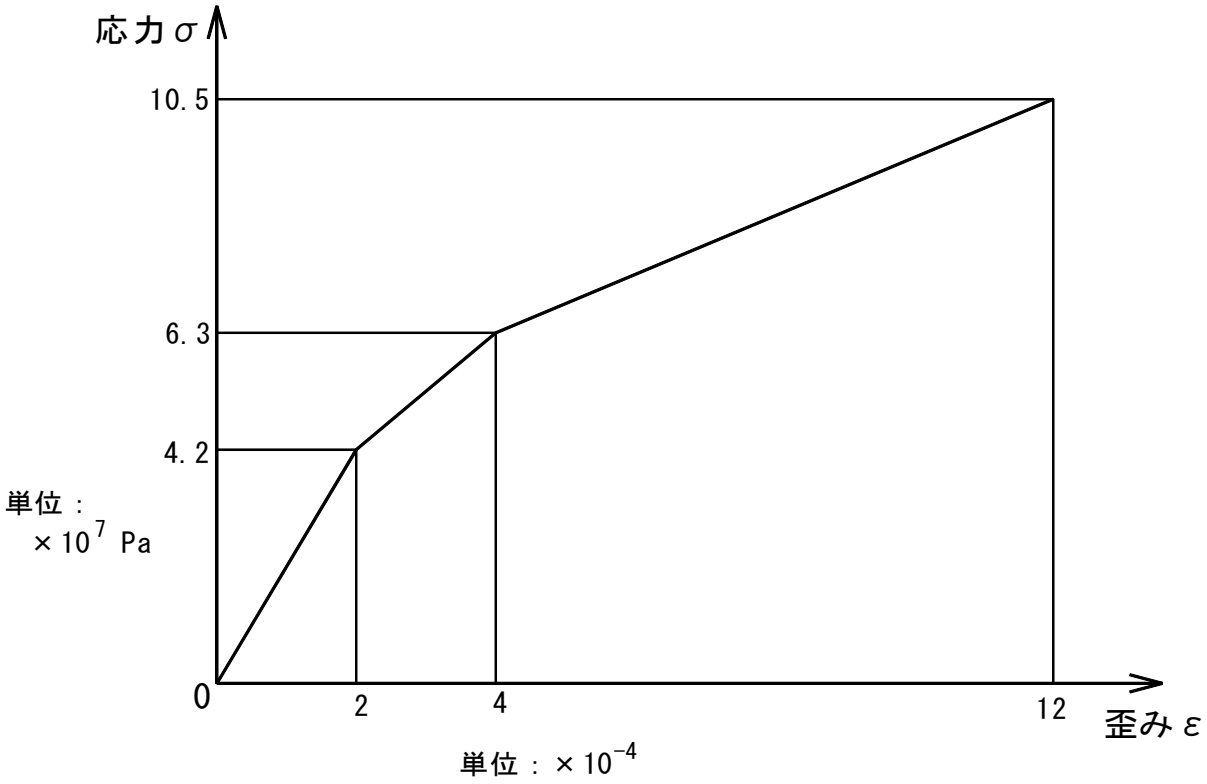


図3-3　　テスト用歪み・応力グラフ

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」では、２つの項目についてチェックの有無により採否を選択できます。「バックアップファイル作成」は、データ読み込み時にバックアップファイル（.bak）を自動作成するものです。同じく「材料別色分け」のチェックを外すと、構造図等が全要素一色で作画されます。

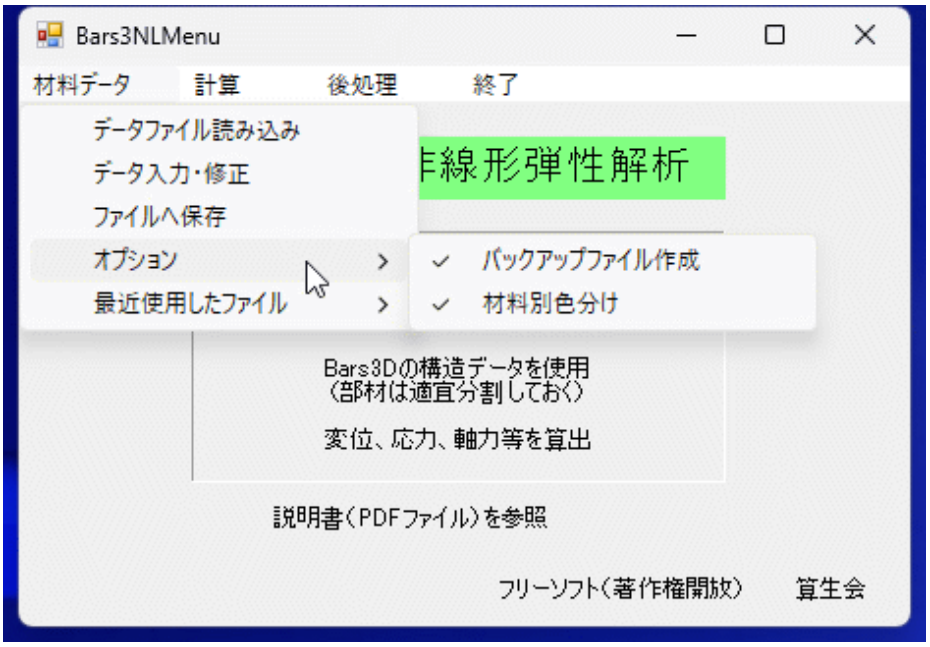


図4-1　　「材料データ」サブメニュー画面

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ールトの拡張子は、「.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。

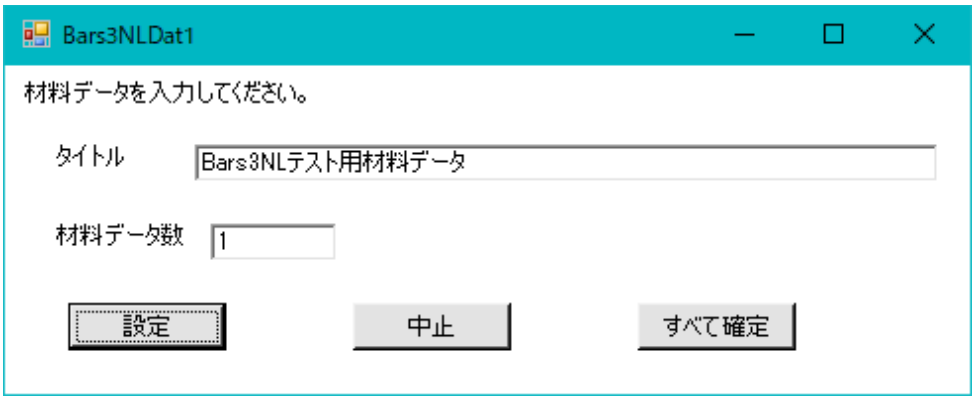


図4-2　　データ仕様入力画面

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。

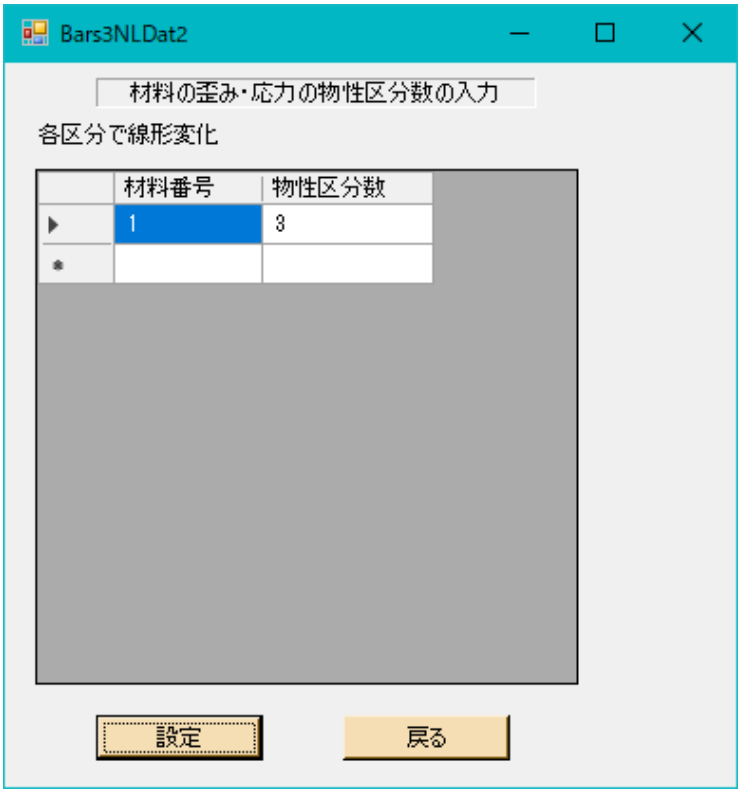


図4-3　　物性区分数の入力画面

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。

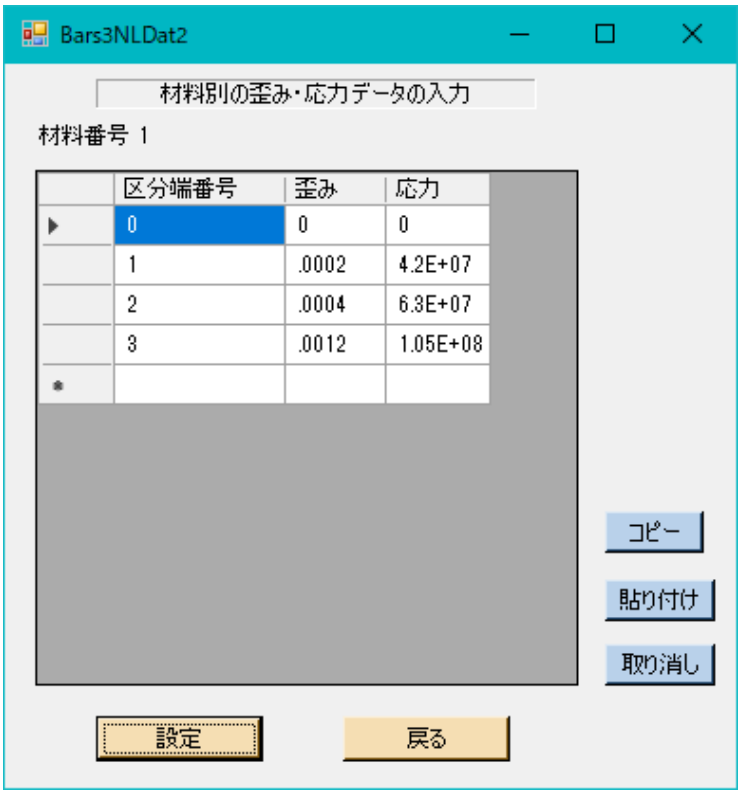


図4-4　　歪み・応力データの入力画面

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、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。

```
Bars3NL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,    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,    4.2E+07
     2,    .0004,    6.3E+07
     3,    .001,    9.45E+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 「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。

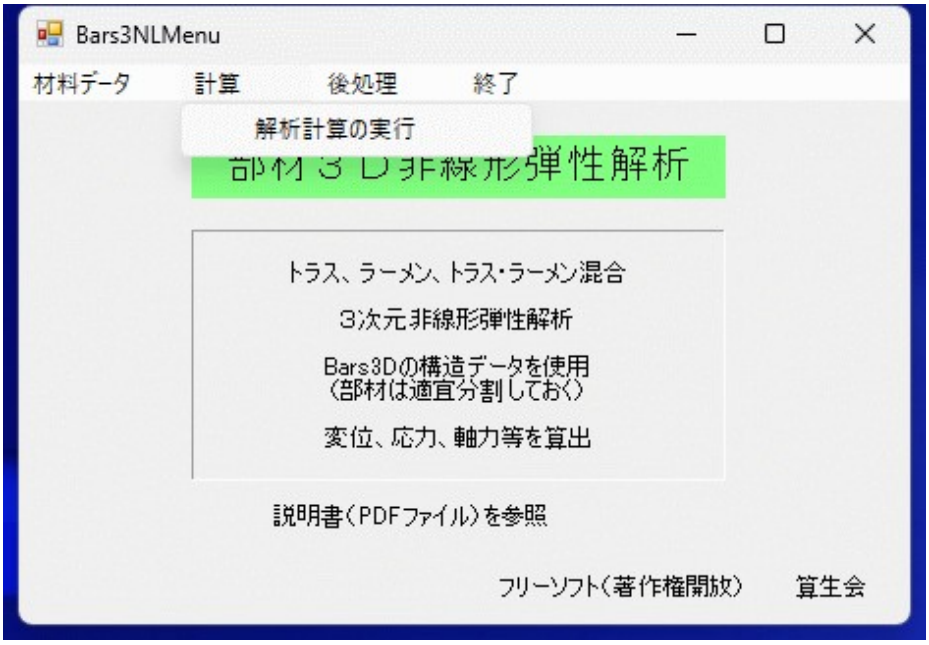


図5-1　　「計算」サブメニュー画面

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「Bars3D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、「Bars3D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。

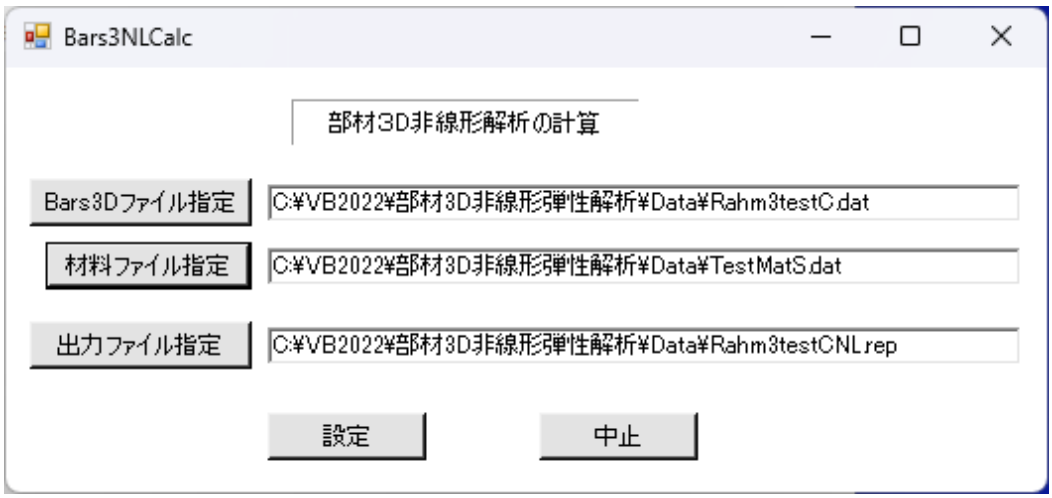


図5-2　　「計算」ファイル設定画面

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先ず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。

◇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。

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、デフォールトは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ールトで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変形区分で「小変形」、「大変形」、「後変形」のいずれかを選択できます。

◇通常は「小変形」のままで問題ありません。「大変形」は長柱の座屈問題のように変形による荷重増加を生じる場合、「後変形」は変形後の荷重により変位減少が生じる場合に選択します。

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。

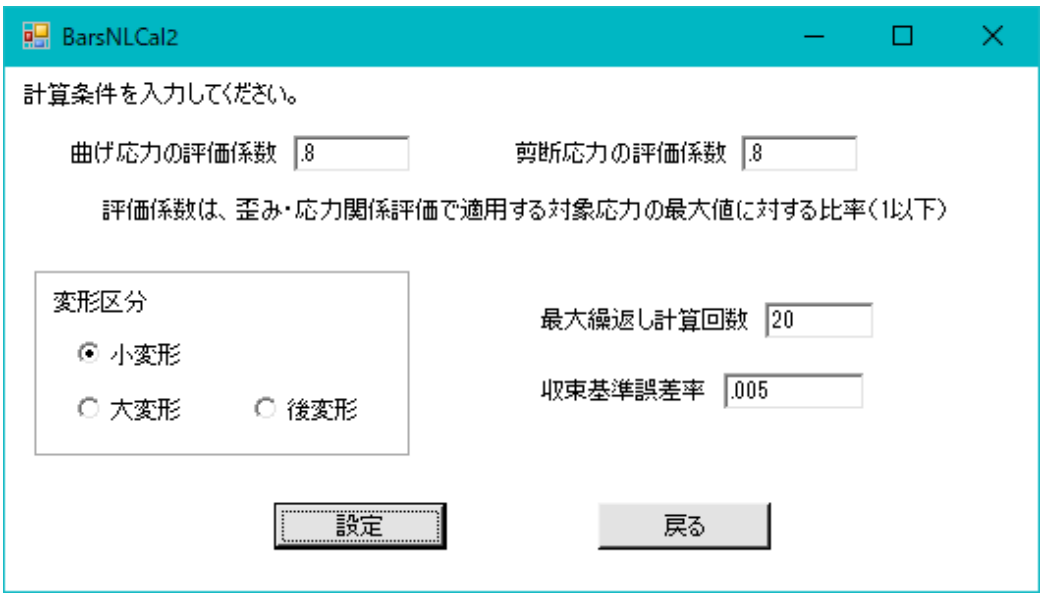


図5-3　　計算条件入力画面

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。

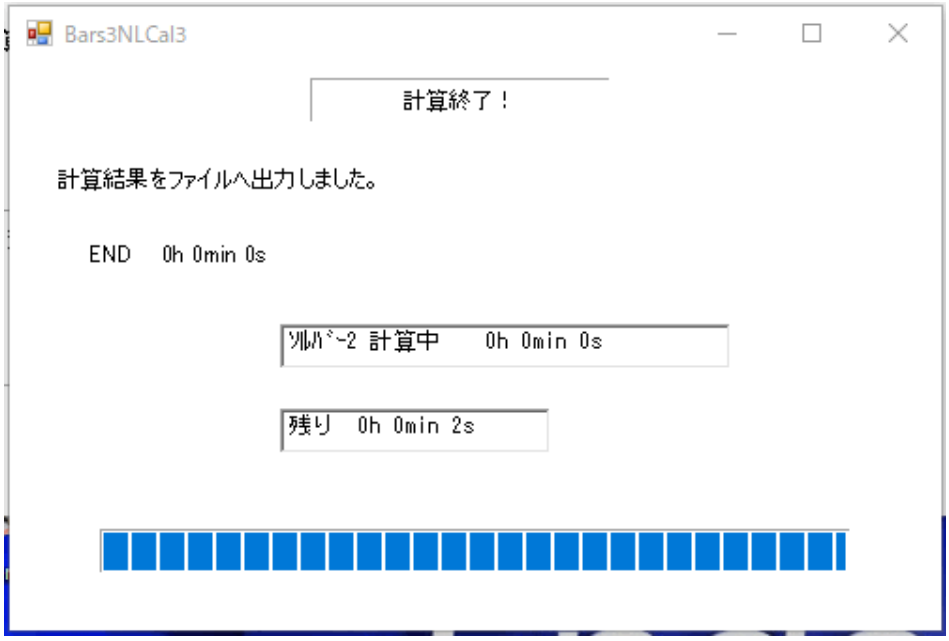


図5-4　　計算終了画面

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。同図の〇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バンド幅が120と出力されています。

③保存配列のインデックス数が35175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。

④収束計算回数は4回です。

⑤収束時の誤差率は0.002583になっています。

⑥最大の相当歪みは0.0006774865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変位等の出力では、すべての節点について、各変位（δX、δY、δZ、θx、θy、θz）が出力されています。

⑧変位の最大値データが出力されています。

◇全δは、δX、δY、δZを合成した変位です。

◇本例では、全δは節点番号159における0.0367mが最大です。

⑨次に応力・軸力等の出力では、要素No.、節点No.、軸応力σf_f、軸力、剪断FyB、FzB、捩りモーメントMxB、曲げモーメントMyB、MzB、曲げ応力σbU、σbL、合計応力σAU、σAL、合成剪断応力τA、捩り応力τp、Mises応力σmises、および第１点超過が出力されています。

◇軸応力と軸力は、引張を正、圧縮を負としています。

◇曲げ応力と合計応力は、添え字U、Lが最大値、最小値を意味します。

◇第１点超過とは、要素のσmisesがε・σ線の第１入力点を超過しているかどうかで、超過なしの場合は0、超過有りの場合は1が出力されます。

⑩応力・軸力等の最大値、最小値データが出力されています。

◇各変数の最大値、最小値と要素番号、節点番号が出力されています。

⑪σmiseは、最大曲げ応力や最大剪断応力に評価係数を掛けて計算されています。

⑫全節点の荷重が出力されています。これらは、自重も含め、外部から作用する力を示しています。なお、分布荷重と自重は、節点に等分されています。

⑬拘束節点の反力が出力されています。

⑭最後に計算時間も出力されます（本例では0s）。

```
<<部材３Ｄ非線形弾性解析の計算結果>>ラーメン
 [Bars3Dデータファイル],C:¥VB2022¥部材3D非線形弾性解析¥Data¥Rahm3testC.dat
３次元ラーメンのテストモデル
 [材料データファイル],C:¥VB2022¥部材3D非線形弾性解析¥Data¥TestMatS.dat
Bars3NLテスト用材料データ
曲げ応力の評価係数, .8                                                ①
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 ＊＊＊
バンド幅, 102                                                         ②
保存配列のインデックス数, 33159                                       ③
---------------------------------------------------
収束計算回数, 4                                                       ④
誤差率, .002583421                                                    ⑤
最大の相当歪み, .0006774865                                           ⑥
---------------------------------------------------
＊＊ 変位等の出力 ＊＊                                                 ⑦
<節点番号, δX、δY、δZ、θx、θy、θz>
 1,    0,    0,    0,    0,    0,    0
 2,    0,    0,    0,    0,    0,    0
 3,    .0001846923,    2.077072E-06,   -.0006050498,
-.0007444618,    .0002157279,    .0001297024
 4,    .0001847035,    1.661163E-06,   -.0006050567,    .00074445,    .0002157317,
-.0001291766
 5,   -2.4378E-05,   -5.810941E-07,   -.001124925,   -.0006172318,    2.081591E-06,
-.0007576001
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
 159,    7.665921E-05,    8.25074E-06,   -.03671258,    2.678822E-06,   -.0002061798,   -
2.131745E-07
 160,    6.335012E-05,    7.629211E-06,   -.0347261,    .003942408,   -.0002061815,
2.684409E-05
 161,    2.476482E-05,    7.091066E-06,   -.02918674,    .00706389,   -.0002061828,
5.033753E-05
 162,   -3.514264E-05,    6.653672E-06,   -.02104071,    .009130059,   -.000206184,
6.948636E-05
 163,   -.0001128541,    6.278794E-06,   -.01126907,    .0102955,   -.0002061849,
8.594434E-05
---------------------------------------------------
<変位の最大値データ>                                                  ⑧
注）絶対値の最大。
変位項目、   最大値、          節点番号
全δ,          .03671267,       159
δX,           .001869617,      51
δY,           .01347502,       148
δZ,          -.03671258,       159
θx,          -.01063704,       7
θy,           .0002903179,     92
θz,           .003922587,      114
---------------------------------------------------
```

図5-6（1/3）　　結果ファイルへの出力例（ラーメン）

```
＊＊ 応力・軸力等の出力 ＊＊                                                    ⑨
＜要素No.、節点No.、σf、軸力、ＦyB、ＦzB、ＭxB、ＭyB, ＭzB、
σbU、σbL、σAU、σAL、τA、τp、σmises、第１点超過＞
 1,   1,  -511938,  -5733.706,   4991.505,   34.07314,   7.577707,  -113.5684,
10407.23,        1.096425E+07,  -1.096425E+07,   1.045232E+07,  -1.147619E+07,
787343.6,   151857.9,   9376886,   0
 1,   11,  -511938,  -5733.706,  -4117.905,  -34.07314,  -7.577707,   79.49528,  -
5852.525,        6384368,  -6384368,   5872430,  -6896306,   649289.7,   151857.9,
5732494,   0
 2,   2,  -511934.4,  -5733.665,   4991.506,  -34.0648,  -7.577546,   113.5271,
10407.25,        1.096369E+07,  -1.096369E+07,   1.045176E+07,  -1.147562E+07,
787344.2,   151854.6,   9376435,   0
 2,   20,  -511934.4,  -5733.665,  -4117.906,   34.0648,   7.577546,  -79.46225,  -
5852.541,        6383920,  -6383920,   5871985,  -6895854,   649290.3,   151854.6,
5732138,   0
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
 169,   162,  -74251.73,  -831.6194,  -26620.72,  -.03260183,   .0001119887,  -
11.62126,  -66035.36,        5.965385E+07,  -5.965385E+07,   5.95796E+07,  -5.97281E+07,
4207023,   2.244262,   4.815151E+07,   1
 169,   163,  -74251.73,  -831.6194,   35494.32,   .03260183,  -.0001119887,
11.65387,   34977.84,        3.167456E+07,  -3.167456E+07,   3.160031E+07,  -
3.174881E+07,   5609369,   2.244262,   2.657592E+07,   0
 170,   163,  -74251.73,  -831.6194,  -35494.32,  -.03260183,   .0001119887,  -
11.65387,  -34977.84,        3.167456E+07,  -3.167456E+07,   3.160031E+07,  -
3.174881E+07,   5609369,   2.244262,   2.657592E+07,   0
 170,   8,  -74251.73,  -831.6194,   44367.92,   .03260183,  -.0001119887,   11.68647,
-4953.276,        4625859,  -4625859,   4551607,  -4700110,   7011714,   2.244262,
1.042331E+07,   0
--------------------------------------------------
＜応力・軸力等の最大・最小値データ＞                                            ⑩
注）正負の最大、最小。
変数項目、    変数値、         要素番号、   節点番号
軸σf max,      7597264,         6,          3
軸σf min,     -1.146285E+07,    152,        9
軸力 max,      85089.35,        6,          3
軸力 min,     -128383.9,        152,        9
剪断ＦyB max,   44368.08,        17,         7
剪断ＦyB min,  -35494.48,        17,         155
剪断ＦzB max,   419.0255,        11,         101
剪断ＦzB min,  -419.0255,        11,         5
捩りＭxB max,   121.4504,        9,          3
捩りＭxB min,  -121.4504,        9,          83
曲げＭyB max,   2770.259,        116,        7
曲げＭyB min,  -2769.895,        125,        8
曲げＭzB max,   105966.3,        165,        159
曲げＭzB min,  -105966.3,        166,        159
曲げσb max,     9.562632E+07,    165,        159
曲げσb min,    -9.562632E+07,    165,        159
合計σA max,     9.555207E+07,    165,        159
合計σA min,    -9.570057E+07,    165,        159
```

図5-6（2/3）　　結果ファイルへの出力例（ラーメン）

```
剪断τA max,     7011741,          17,           7
捩りτp max,     2433876,          9,            3
σmises ,     7.65753E+07,      165,          159                                    ⑪
-----------------------------------------------
＊＊ 全節点の荷重出力 ＊＊                                                          ⑫
＜節点番号, Ｆx、Ｆy、Ｆz、Mx、My、Mz＞
 1,    1.348453E-05,    0,   -873.5904,    0,    109.1992,    0
 2,    1.348453E-05,    0,   -873.5904,    0,    109.1992,    0
 3,    1.164153E-10,    1.818989E-12,   -1747.181,   -72.8,    72.8,    4.547474E-13
 4,   -1.309672E-10,    1.818989E-12,   -1747.181,    72.8,    72.8,    0
 5,    1.254992E-05,    1.818989E-12,   -102184,   -72.8,   -2.304965E-06,    1.364242E-12
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
 159,    5.684342E-13,    2.364686E-11,   -8873.6,   -2.793968E-09,    0,    1.449507E-12
 160,    3.979039E-13,   -1.273293E-11,   -8873.6,   -1.862645E-09,   -1.065814E-14,
5.684342E-14
 161,   -2.273737E-13,    7.275958E-12,   -8873.6,   -1.862645E-09,    1.065814E-14,
7.673862E-13
 162,    2.557954E-13,   -3.637979E-12,   -8873.6,   -1.862645E-09,   -1.065814E-14,   -
6.394885E-13
 163,    2.114575E-11,   -2.364686E-11,   -8873.6,    6.693881E-10,   -2.842171E-14,
5.798029E-12
-----------------------------------------------
＊＊ 拘束節点の反力 ＊＊                                                            ⑬
＜節点番号, Ｆx、Ｆy、Ｆz、Mx、My、Mz＞
 1,    56794.92,   -2.172507,    97108.02,   -82.88627,   -13329.36,   -57.65279
 2,    56794.92,    2.142821,    97108.09,    82.99383,   -13329.38,    57.54304
 9,   -56794.98,    445.4521,    117147.2,   -1148.583,    13720.5,   -855.0338
 10,   -56794.86,   -445.4224,    117147.1,    1148.714,    13720.76,    855.1114
END    0h 0min 0s                                                                  ⑭
```

図5-6（3/3）　　結果ファイルへの出力例（ラーメン）

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。

「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「変位図の作成」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、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、変位図の場合は作画画面に移り、応力図の場合は同図の指定画面に移ります。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。

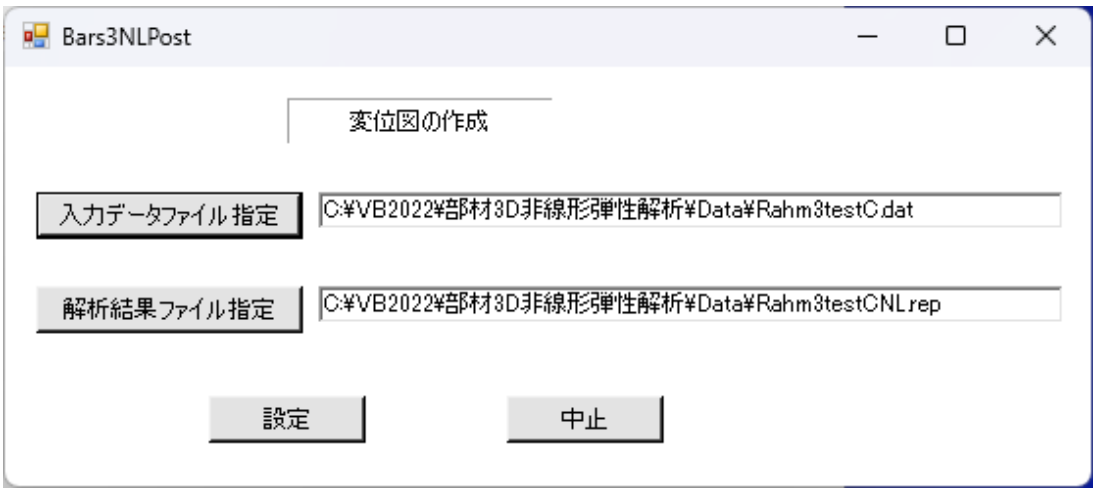


図6-2　　使用ファイル設定画面

6.3 変位図の作画画面

図6-3に変位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状態になっています。

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。

◇回転変位θ_x, θ_y, θ_zは除外しています。

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。

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6-4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。

⑥「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。

⑦「変位線の幅」は1～3が可能で、初期値は2にしてあります。

⑧「番号表示の項目」は、「要素番号」と「節点番号」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。

⑨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。

⑩マウス右クリックで任意の節点を選択すると、図6-5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。

⑪Shift＋マウス」により構造を回転することができます。

◇等高線図の任意の場所で、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6-6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。

◇変位図の「説明」ボタンをクリックすると、図6-6と同じ説明図が表示されます。

⑫「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。

⑬「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。

⑭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。

⑭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。

◇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6-7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、図6-8のように選択領域が拡大されて表示されます。ただし、図6-8では、節点番号を表示してあります。

◇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。

⑮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。

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。

⑰本画面を終了するには、「中止」ボタンをクリックします。

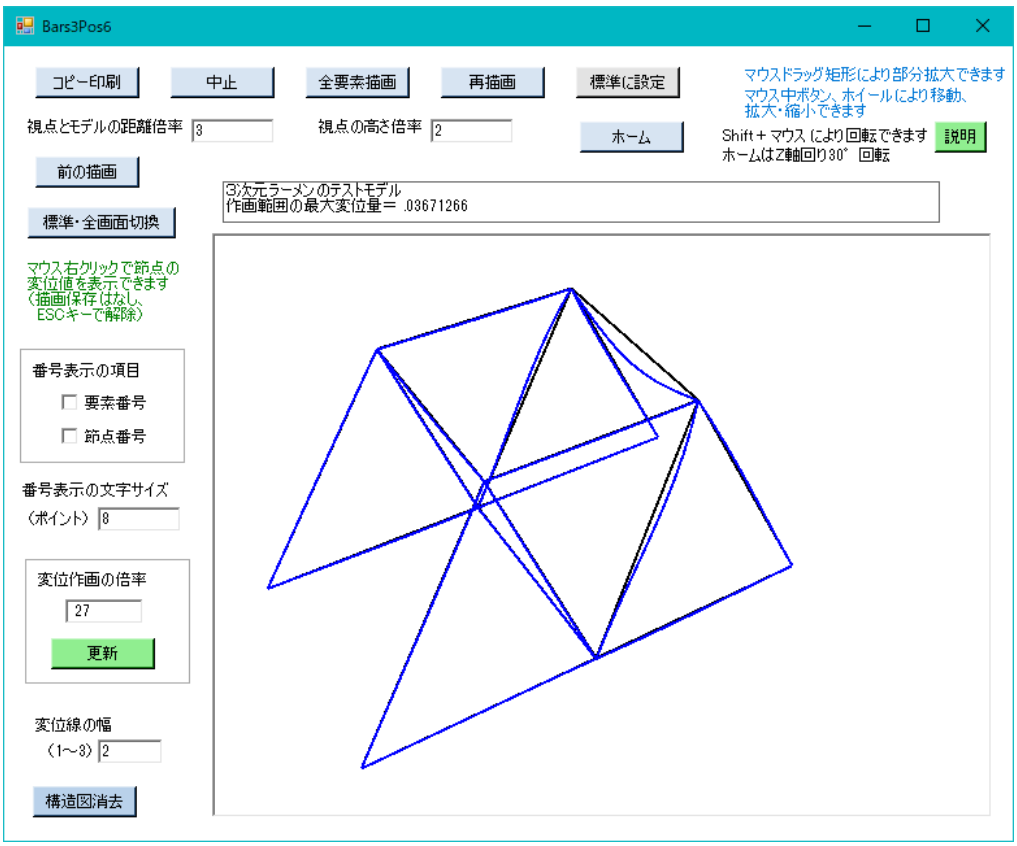


図6-3　　変位図の作画画面

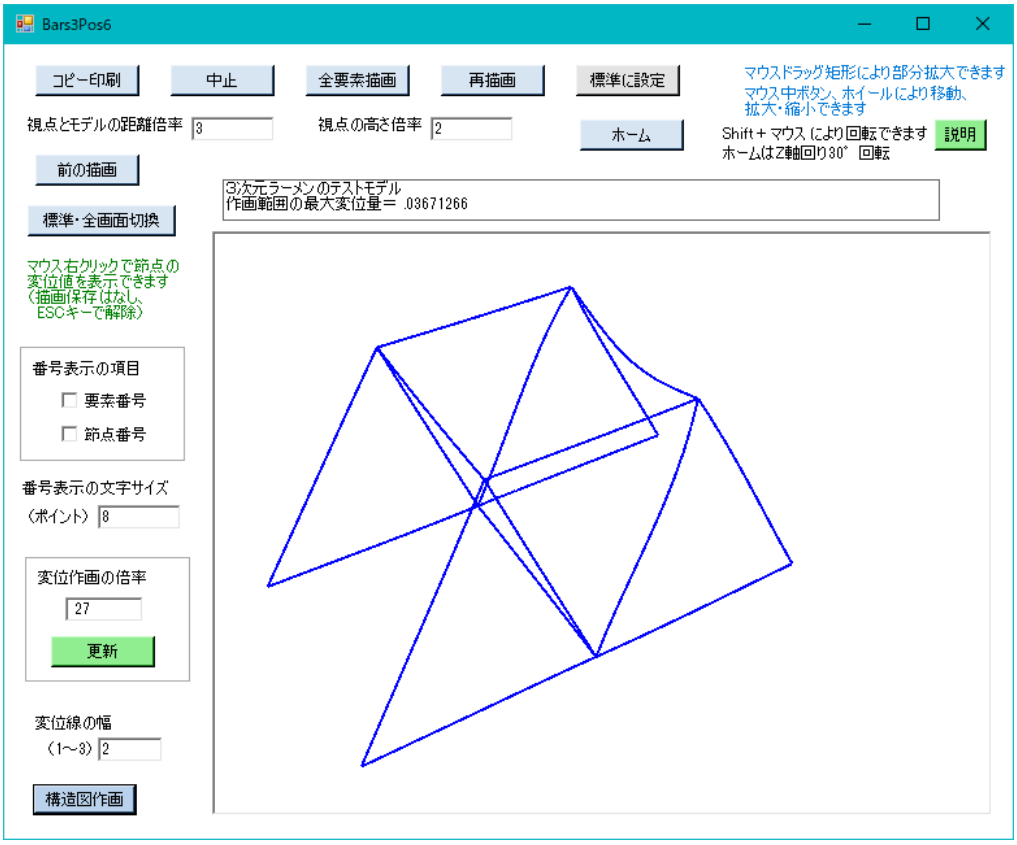


図6-4　　変位図の作画画面（構造図消去）

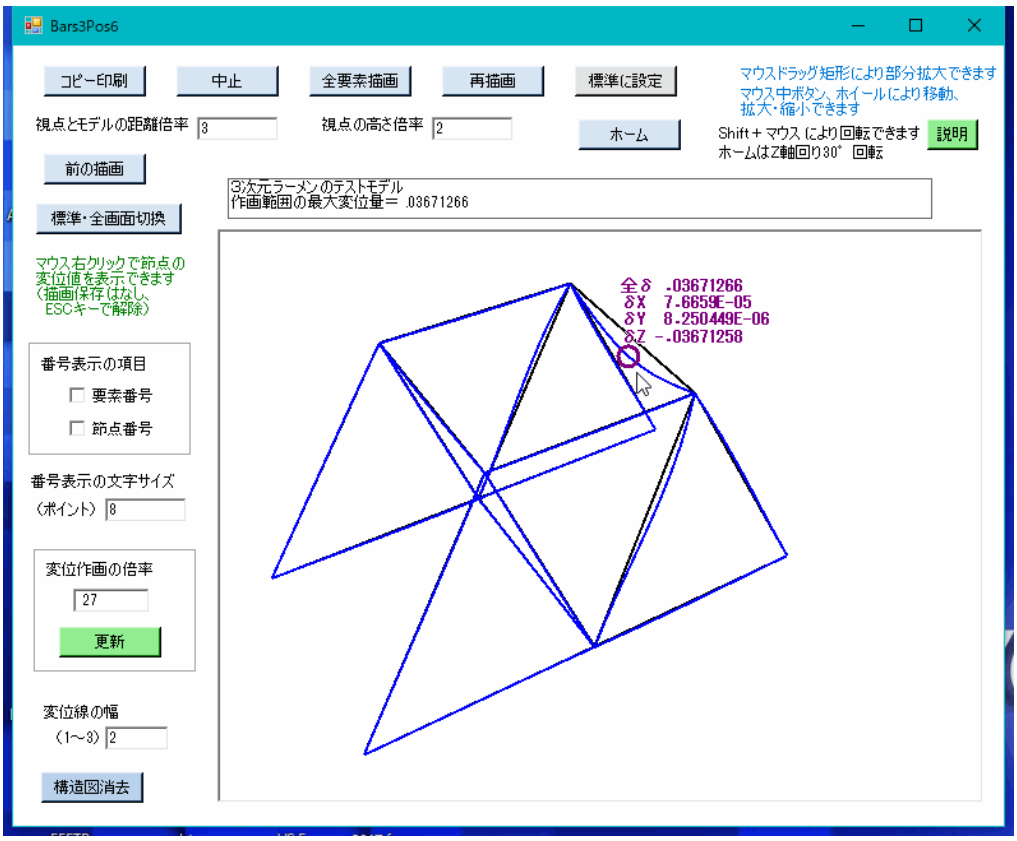


図6-5　　変位図の作画画面（マウス右クリックの節点の変位値表示）

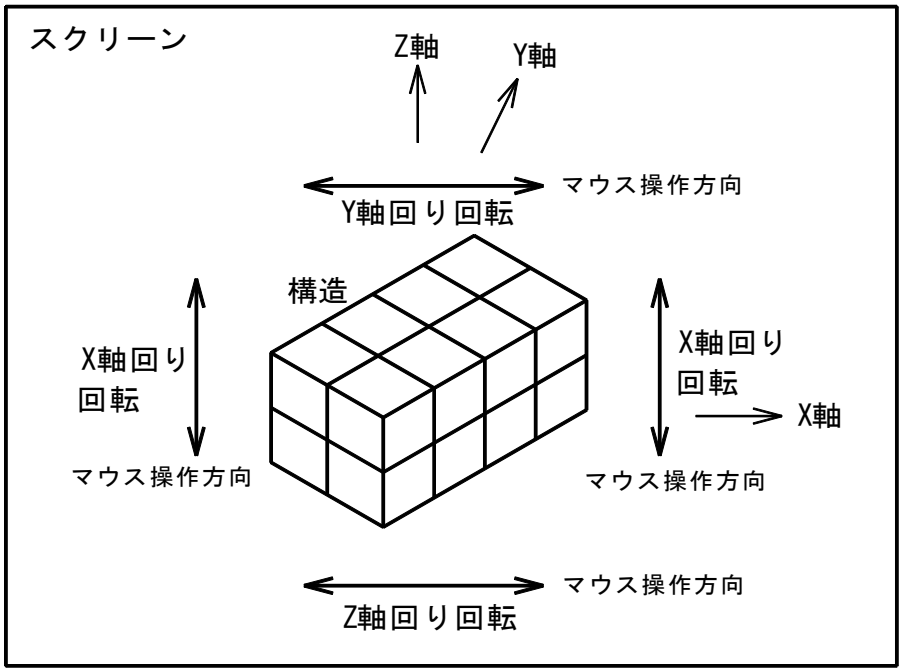


図6-6　　マウスの移動方向と回転方向との関係（Shiftキー併用）

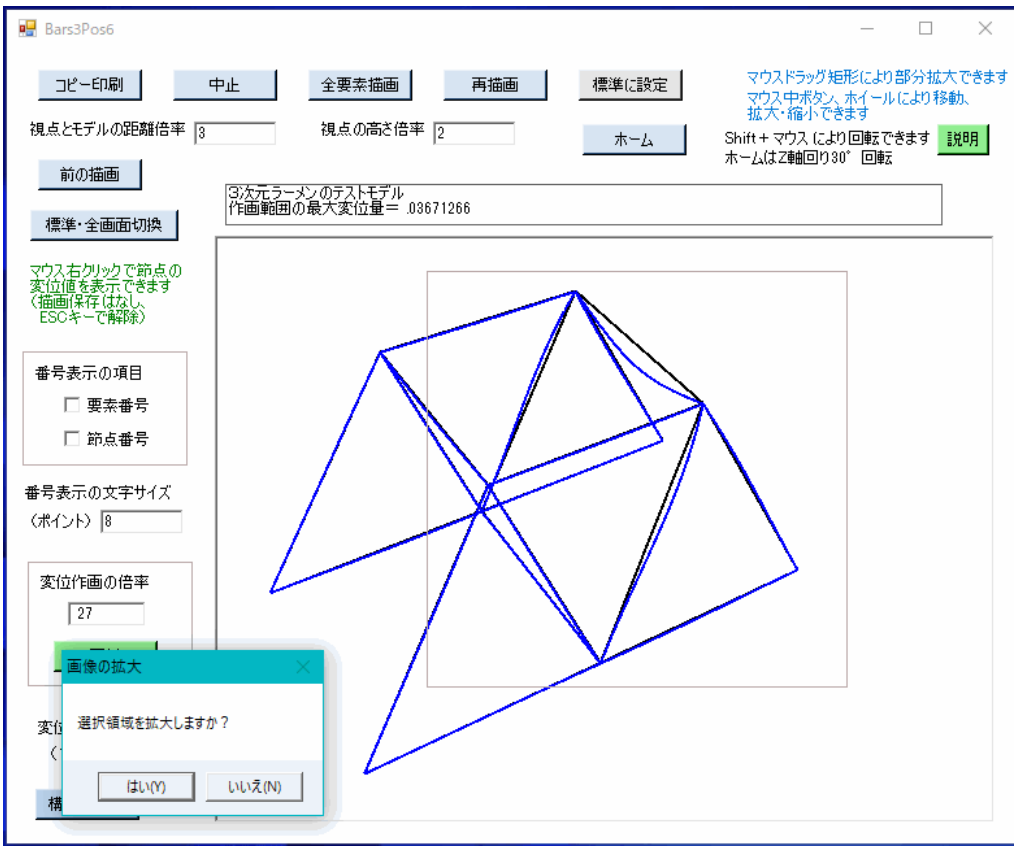


図6-7　　変位図の拡大領域選択例

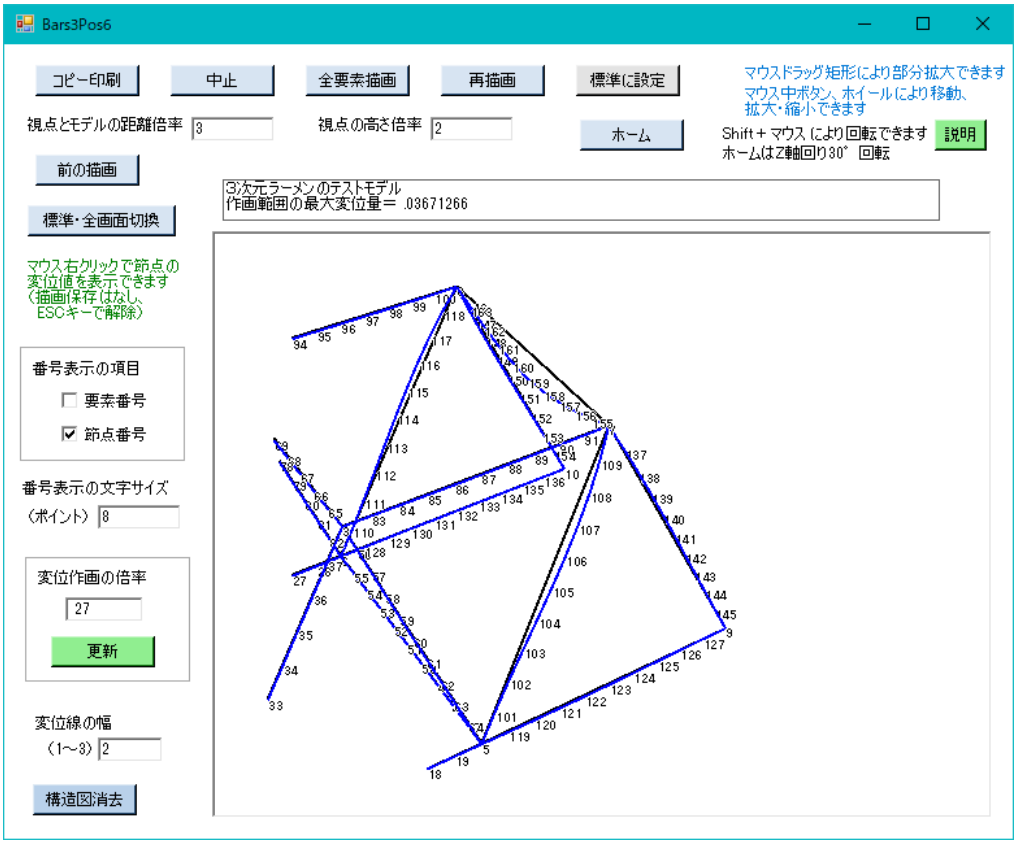


図6-8　　変位図の部分拡大例

6.4 応力図の指定画面

図6-9、6-10に応力図指定画面を示します。図6-9はトラスの場合、図6-10はラーメンとトラス・ラーメン混合の場合です。

①これらの画面で、指定したい変数項目を選択します。

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

◇τAは合計剪断応力、τpは捩り応力で、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6-11にラーメンの最大・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6-9　　応力図指定画面（トラスの場合）

図6-10　　応力図指定画面（ラーメンとトラス・ラーメン混合の場合）

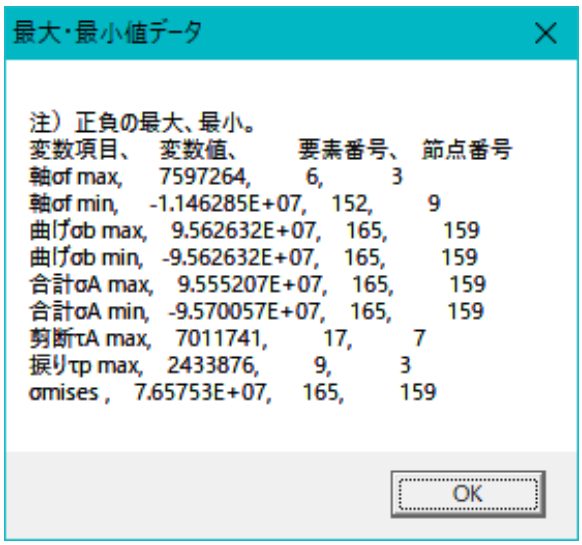


図6-11　　最大・最小値データの表示例（ラーメンの場合）

6.5 応力図の作画画面

図6-12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、マウスドラッグによる部分拡大、回転操作等は、変位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「応力値の表示」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、「応力値の表示」と「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、応力図の一部分を拡大できます。操作方法は前節の変位図と同じです。

⑧「標準モード」では、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、仕様設定画面に戻ります。

図6-13にσmisesの応力図、図6-14はそれを部分拡大して節点番号を表示させた図を示します。

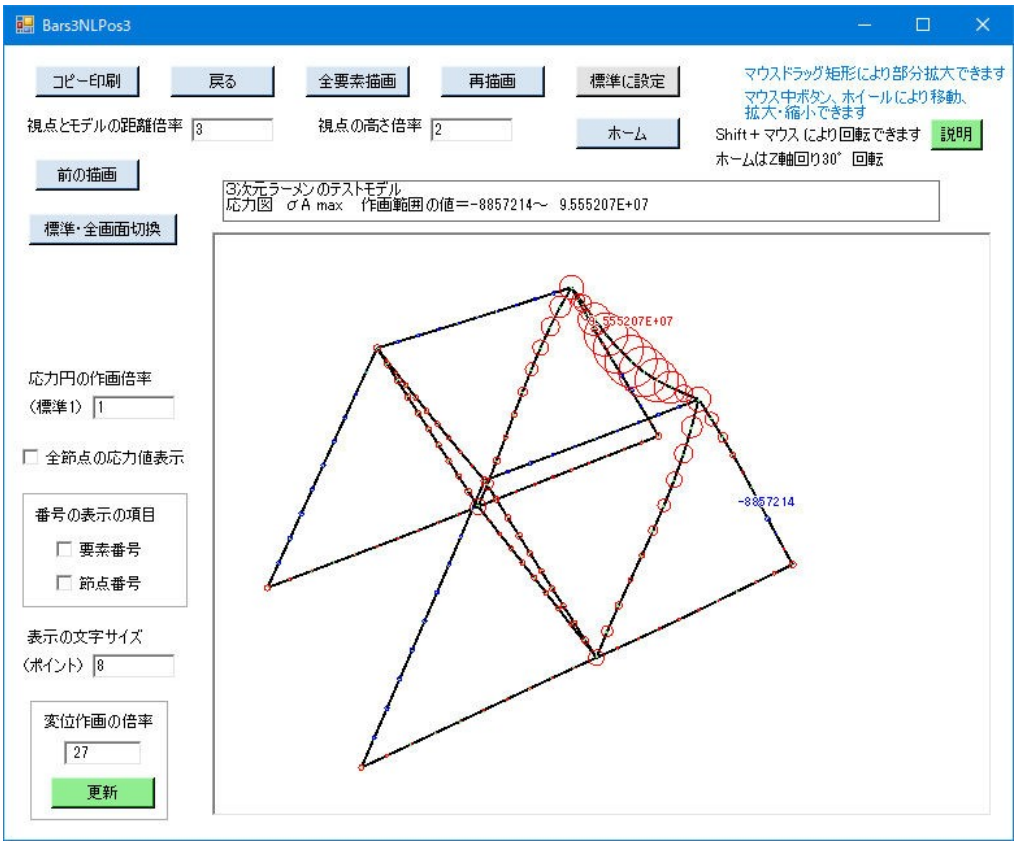


図6-12　応力図の作画画面（σA max）

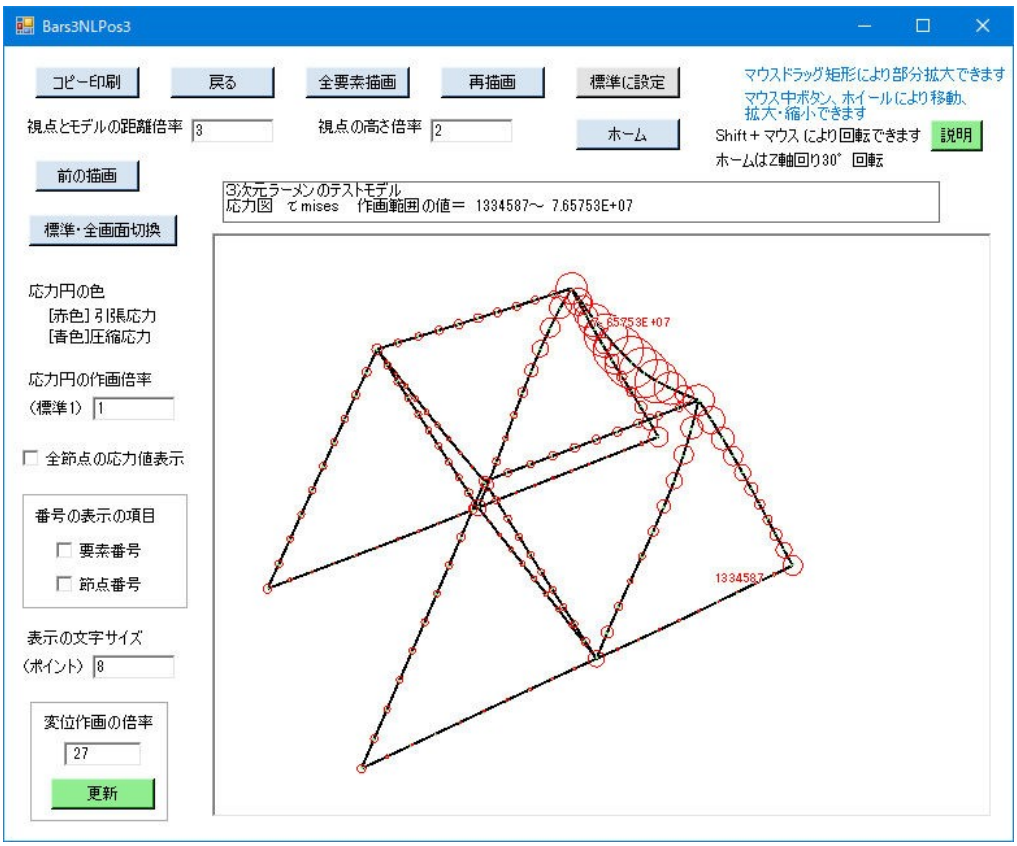


図6-13　　応力図の作画画面（σmises）

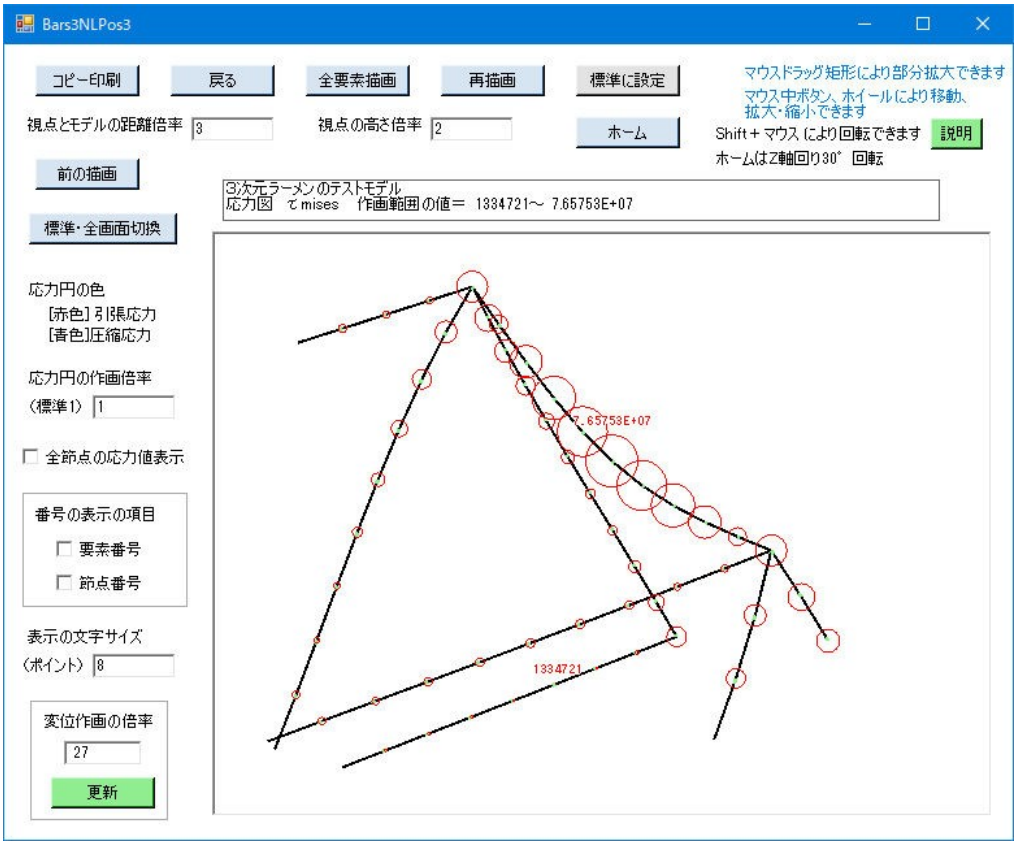


図6-14　　応力図の部分拡大例（σmises）

6.6 解析結果の主要値表示

図6-15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。

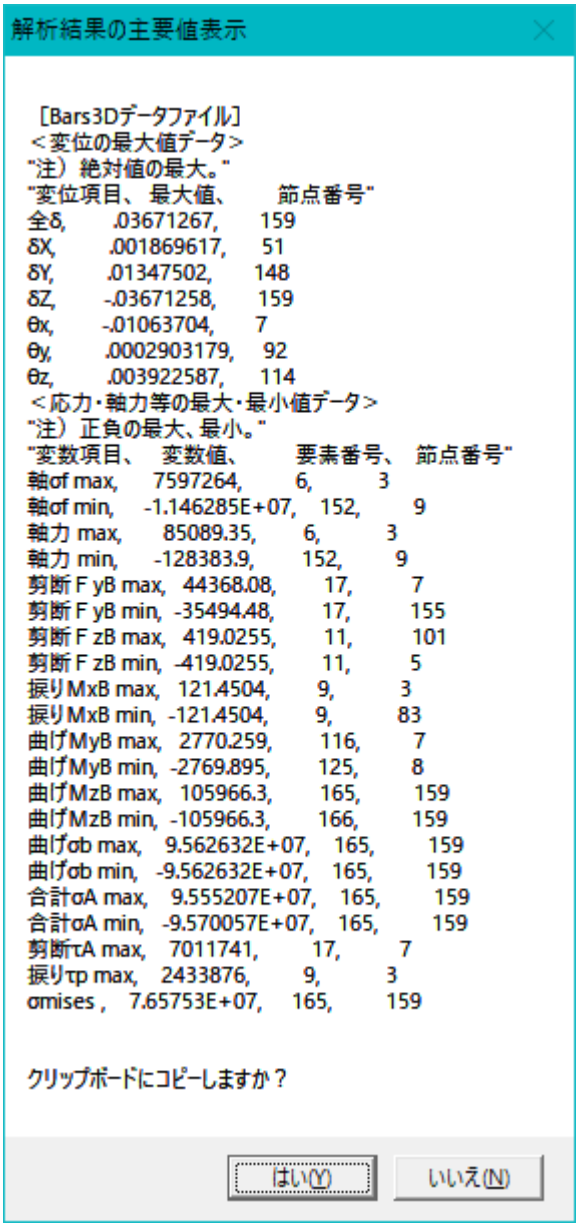


図6-15　　解析結果の主要値表示の画面（ラーメンの場合）

［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

＜Ｂ＞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」、ｽﾋﾟｰｹﾞﾙ 著、氏家 勝巳 訳、
マグロウヒル 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