

\*\*\*\*\*

\* 「異方性3D構造解析K」の紹介 \* [著者] 黒田 英夫

\*\*\*\*\*

## &lt;プログラム開発環境&gt;

OS : Windows 11 . . . .NET Framework 4.8が必要

言語 : Visual Basic 2022 (Visual Studio 2022 Community)

## &lt;プログラムと本書の著作権&gt;

フリーソフトで、著作権を開放します

\*\*\*\*\*

汎用的な異方性3次元構造解析ソフトを提供します。このソフトは、有限要素法により、直交異方性3次元構造の弾性問題を解くものです。ただし、別途、算生会の「FEM立体データK」ソフトが必要です。構造の自動メッシュ方法については同ソフトを参照してください。

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

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

なお、本書で使用説明のための解析事例は有限要素数の少ないものを取り上げていますので、実用に当たっては必要に応じて要素数を増やしてください。

[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

## &lt;目次&gt;

## 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 -----	11
第3章 構造データの作り方 -----	14
第4章 「解析データ」処理プログラム -----	19
第5章 「計算」プログラム -----	52
第6章 「後処理」プログラム -----	63
第7章 計算事例 -----	75
[補足] 中心穴なし軸回転体の注意事項 -----	83
[参考文献] -----	84

## 第1章 有限要素法

有限要素法は、対象を有限個の要素に分割し、要素毎にその節点変数に関する方程式を作成し、それを合わせて要素全体の方程式として解く解析方法です。ここでは、有限要素法の計算方法について概説します。詳細は、添付ソフトおよび参考文献を参照してください。

### 1.1 使用要素

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

また、面の番号は、六面体要素の定義に必要なはありませんが、変数固定・非固定の境界条件や流束の境界条件を設定する際に使用します。すなわち、六面体要素を定義する節点順序に対して、正しい面番号で境界条件を設定する必要があります。

注) 節点番号はまちまちであってもよく、六面体要素を定義する際に図1-1の節点に付した番号の順序に本来の節点番号を入力するという意味です。また、節点番号、面番号とも構造図画面で表示することができます。

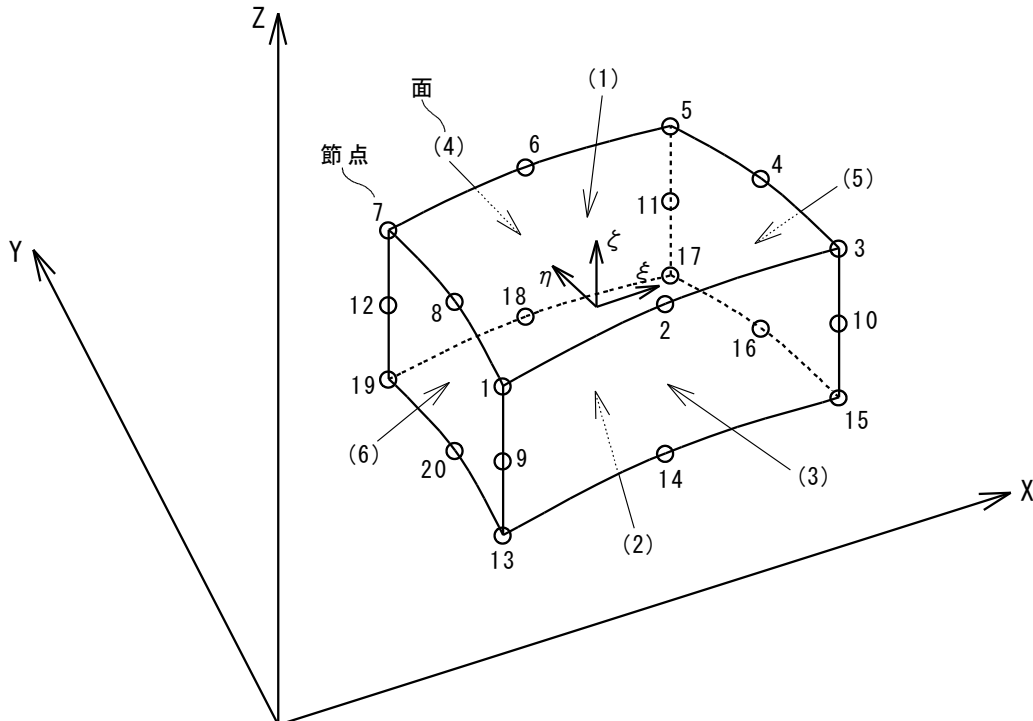


図1-1 六面体2次要素

図1-1のように、全体座標系を右手系のXYZで表わします。そして、六面体要素の中央部に要素の無次元化座標 $\xi$   $\eta$   $\zeta$ を示します。本座標を使用して、各要素の積分を行ないます。その際、本ソフトでのガウス積分点は1軸当り3点を使用し、その3乗の27点が1要素当りの積分点数となります。

本ソフトでは、六面体2次要素をアイソパラメトリック要素として使用します。アイソパラメトリック要素とは、要素の幾何形状と変量が同一の内挿関数で表わされる要素のことです。図1-1のように各辺に中間節点のある要素は2次要素と呼ばれ、中間節点のない1次要素に比べ、はるかに少ない要素数で精度良く計算できます。図1-1に示す無次元化された局所座標 $\xi$   $\eta$   $\zeta$ を用いて、20節点の形状関数が下記のように定義されます。そして、要素内の任意位置の変数値が、20節点の変数値と形状関数の合成式により表わされます。

[形状関数]

$$N_1 = (1-\xi)(1-\eta)(1+\zeta)(-\xi-\eta+\zeta-2)/8$$

$$N_2 = (1-\xi^2)(1-\eta)(1+\zeta)/4$$

$$N_3 = (1+\xi)(1-\eta)(1+\zeta)(\xi-\eta+\zeta-2)/8$$

$$N_4 = (1+\xi)(1-\eta^2)(1+\zeta)/4$$

$$N_5 = (1+\xi)(1+\eta)(1+\zeta)(\xi+\eta+\zeta-2)/8$$

$$N_6 = (1-\xi^2)(1+\eta)(1+\zeta)/4$$

$$N_7 = (1-\xi)(1+\eta)(1+\zeta)(-\xi+\eta+\zeta-2)/8$$

$$N_8 = (1-\xi)(1-\eta^2)(1+\zeta)/4$$

$$N_9 = (1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta^2)/4$$

$$N_{10} = (1+\xi)(1-\eta)(1-\zeta^2)/4$$

$$N_{11} = (1+\xi)(1+\eta)(1-\zeta^2)/4$$

$$N_{12} = (1-\xi)(1+\eta)(1-\zeta^2)/4$$

$$N_{13} = (1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta)(-\xi-\eta-\zeta-2)/8$$

$$N_{14} = (1-\xi^2)(1-\eta)(1-\zeta)/4$$

$$N_{15} = (1+\xi)(1-\eta)(1-\zeta)(\xi-\eta-\zeta-2)/8$$

$$N_{16} = (1+\xi)(1-\eta^2)(1-\zeta)/4$$

$$N_{17} = (1+\xi)(1+\eta)(1-\zeta)(\xi+\eta-\zeta-2)/8$$

$$N_{18} = (1-\xi^2)(1+\eta)(1-\zeta)/4$$

$$N_{19} = (1-\xi)(1+\eta)(1-\zeta)(-\xi+\eta-\zeta-2)/8$$

$$N_{20} = (1-\xi)(1-\eta^2)(1-\zeta)/4$$

以上(1-1)

[要素内の変数値] 局所座標( $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\zeta$ )における値

$$H = \sum_{i=1}^{20} N_i H_i \quad (1-2)$$

ただし、 $H_i$ は節点における変数値

## 1.2 要素の積分

### 1) 体積積分

有限要素法では、一般に要素の積分はガウス・ルジャンドルの数値積分（略してガウス積分と呼ぶ）によって行ないます。3次元のガウス積分による要素の体積積分は次式で表わされます。

$$\int F(X, Y, Z) dV = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n F(\xi, \eta, \zeta) W_i W_j W_k |J| d\xi d\eta d\zeta \quad (1-3)$$

ただし、 $F(\ )$ ：任意関数

$X, Y, Z$ ：全体座標

$\xi, \eta, \zeta$ ：要素の無次元化された局所座標（各変化範囲は-1～1）

$n$ ：1軸当りのガウス積分点数

$W_i, W_j, W_k$ ：ガウス積分点の位置 $(\xi, \eta, \zeta)$ における重み係数

$|J|$ ：ヤコビアンマトリックスの行列式の値

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial X}{\partial \xi} & \frac{\partial Y}{\partial \xi} & \frac{\partial Z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial X}{\partial \eta} & \frac{\partial Y}{\partial \eta} & \frac{\partial Z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial X}{\partial \zeta} & \frac{\partial Y}{\partial \zeta} & \frac{\partial Z}{\partial \zeta} \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^{20} \begin{pmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} X_i & \frac{\partial N_i}{\partial \xi} Y_i & \frac{\partial N_i}{\partial \xi} Z_i \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} X_i & \frac{\partial N_i}{\partial \eta} Y_i & \frac{\partial N_i}{\partial \eta} Z_i \\ \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} X_i & \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} Y_i & \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} Z_i \end{pmatrix} \quad (1-4)$$

$$\begin{aligned} \therefore |J| &= \frac{\partial X}{\partial \xi} \left( \frac{\partial Y}{\partial \eta} \frac{\partial Z}{\partial \zeta} - \frac{\partial Z}{\partial \eta} \frac{\partial Y}{\partial \zeta} \right) + \frac{\partial Y}{\partial \xi} \left( \frac{\partial Z}{\partial \eta} \frac{\partial X}{\partial \zeta} - \frac{\partial X}{\partial \eta} \frac{\partial Z}{\partial \zeta} \right) \\ &\quad + \frac{\partial Z}{\partial \xi} \left( \frac{\partial X}{\partial \eta} \frac{\partial Y}{\partial \zeta} - \frac{\partial Y}{\partial \eta} \frac{\partial X}{\partial \zeta} \right) \end{aligned} \quad (1-5)$$

また、ヤコビアンマトリックスの逆行列は次式で表わされます。

$$J^{-1} = \frac{1}{|J|} \begin{pmatrix} \frac{\partial Y}{\partial \eta} \frac{\partial Z}{\partial \zeta} - \frac{\partial Z}{\partial \eta} \frac{\partial Y}{\partial \zeta} & \frac{\partial Z}{\partial \xi} \frac{\partial Y}{\partial \zeta} - \frac{\partial Y}{\partial \xi} \frac{\partial Z}{\partial \zeta} & \frac{\partial Y}{\partial \xi} \frac{\partial Z}{\partial \eta} - \frac{\partial Z}{\partial \xi} \frac{\partial Y}{\partial \eta} \\ \frac{\partial Z}{\partial \eta} \frac{\partial X}{\partial \zeta} - \frac{\partial X}{\partial \eta} \frac{\partial Z}{\partial \zeta} & \frac{\partial X}{\partial \xi} \frac{\partial Z}{\partial \zeta} - \frac{\partial Z}{\partial \xi} \frac{\partial X}{\partial \zeta} & \frac{\partial Z}{\partial \xi} \frac{\partial X}{\partial \eta} - \frac{\partial X}{\partial \xi} \frac{\partial Z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial X}{\partial \eta} \frac{\partial Y}{\partial \zeta} - \frac{\partial Y}{\partial \eta} \frac{\partial X}{\partial \zeta} & \frac{\partial Y}{\partial \xi} \frac{\partial X}{\partial \zeta} - \frac{\partial X}{\partial \xi} \frac{\partial Y}{\partial \zeta} & \frac{\partial X}{\partial \xi} \frac{\partial Y}{\partial \eta} - \frac{\partial Y}{\partial \xi} \frac{\partial X}{\partial \eta} \end{pmatrix} \quad (1-6)$$

1軸当りのガウス積分点数 $n$ が3の場合について、ガウス積分点の位置と重み係数を表1-1に示しておきます。

表1-1 ガウス積分点の位置と重み係数

1 軸当りの積分点数 n	位置 (各 $\xi, \eta, \zeta$ )	重み係数
3	0.77459667	0.55555556
	0	0.88888889
	-0.77459667	0.55555556

## 2) 面積積分

次に六面体要素の面積積分について説明します。面積積分は、表面分布荷重境界の場合に必要なになります。その境界条件においては、境界の面について面積積分を行いません。図1-1に示した六面体要素の各面の面積積分の式は以下のようになります。<sup>(4)</sup>  
ただし、各式の各偏微分項の計算は、面の8節点を用いて、(1-4)式のヤコビアンマトリックスと同様に計算します。

[面(1)、(2)] 面(1)では $\zeta = 1$ 、面(2)では $\zeta = -1$

$$dA = \left[ \left( \frac{\partial Y}{\partial \xi} \frac{\partial Z}{\partial \eta} - \frac{\partial Z}{\partial \xi} \frac{\partial Y}{\partial \eta} \right)^2 + \left( \frac{\partial Z}{\partial \xi} \frac{\partial X}{\partial \eta} - \frac{\partial X}{\partial \xi} \frac{\partial Z}{\partial \eta} \right)^2 + \left( \frac{\partial X}{\partial \xi} \frac{\partial Y}{\partial \eta} - \frac{\partial Y}{\partial \xi} \frac{\partial X}{\partial \eta} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \times d\xi d\eta \quad (1-7)$$

[面(3)、(4)] 面(3)では $\eta = -1$ 、面(4)では $\eta = 1$

$$dA = \left[ \left( \frac{\partial Y}{\partial \xi} \frac{\partial Z}{\partial \xi} - \frac{\partial Z}{\partial \xi} \frac{\partial Y}{\partial \xi} \right)^2 + \left( \frac{\partial Z}{\partial \xi} \frac{\partial X}{\partial \xi} - \frac{\partial X}{\partial \xi} \frac{\partial Z}{\partial \xi} \right)^2 + \left( \frac{\partial X}{\partial \xi} \frac{\partial Y}{\partial \xi} - \frac{\partial Y}{\partial \xi} \frac{\partial X}{\partial \xi} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \times d\xi d\xi \quad (1-8)$$

[面(5)、(6)] 面(5)では $\xi = 1$ 、面(6)では $\xi = -1$

$$dA = \left[ \left( \frac{\partial Y}{\partial \eta} \frac{\partial Z}{\partial \xi} - \frac{\partial Z}{\partial \eta} \frac{\partial Y}{\partial \xi} \right)^2 + \left( \frac{\partial Z}{\partial \eta} \frac{\partial X}{\partial \xi} - \frac{\partial X}{\partial \eta} \frac{\partial Z}{\partial \xi} \right)^2 + \left( \frac{\partial X}{\partial \eta} \frac{\partial Y}{\partial \xi} - \frac{\partial Y}{\partial \eta} \frac{\partial X}{\partial \xi} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \times d\eta d\xi \quad (1-9)$$

### 1.3 直交異方性 3次元構造強度の有限要素法解析

本ソフトでは、全体座標系のXYZ各座標軸方向に直交異方性を持つと定義します。そして、表1-2に示す9個の弾性定数を定義します。

表1-2 直交異方性材料の弾性定数

定数区分	定数記号	内容
ヤング率	$E_x$	X方向のヤング率
	$E_y$	Y方向のヤング率
	$E_z$	Z方向のヤング率
剪断弾性係数	$G_{xy}$	XY平面の剪断弾性係数
	$G_{yz}$	YZ平面の剪断弾性係数
	$G_{zx}$	ZX平面の剪断弾性係数
ポアソン比	$\nu_{xy}$	X方向荷重によるY方向歪のポアソン比
	$\nu_{yz}$	Y方向荷重によるZ方向歪のポアソン比
	$\nu_{zx}$	Z方向荷重によるX方向歪のポアソン比

ただし、下記のポアソン比は相反定理により、表1-1記載の定数から算出されます。

[算出されるポアソン比]  $\nu_{yx}$ 、 $\nu_{zy}$ 、 $\nu_{xz}$

添え字の意味は、Y方向荷重によるX方向歪のポアソン比、他も同様。

相反定理は以下の式で表わされます。

$$\frac{\nu_{xy}}{E_x} = \frac{\nu_{yx}}{E_y} \quad (1-10)$$

$$\frac{\nu_{yz}}{E_y} = \frac{\nu_{zy}}{E_z} \quad (1-11)$$

$$\frac{\nu_{zx}}{E_z} = \frac{\nu_{xz}}{E_x} \quad (1-12)$$

構造強度解析の支配方程式は、全ポテンシャルエネルギーを最小にすることから導き出されます。弾性変形する系の全ポテンシャルエネルギーは、次のように表わされます。次式において、右辺の第1項は歪エネルギーを表わし、第2項は外力による仕事を表わします。

$$\pi = 0.5 \int \{\sigma\}^T \{\varepsilon\} dV - \int \{\delta\}^T \{p\} dV \quad (1-13)$$

ただし、 $\pi$ ：全ポテンシャルエネルギー

$\{\sigma\}$ ：応力ベクトル。右上付き文字Tは転置を意味する（以下同じ）。

$$\{\sigma\} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} \quad (1-14)$$

$\{\varepsilon\}$  : 歪ベクトル

$$\{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} \quad (1-15)$$

$\{\delta\}$  : 変位ベクトル

$$\{\delta\} = \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix} \quad (1-16)$$

$\{p\}$  : 荷重ベクトル

$$\{p\} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (1-17)$$

$dV$  : 積分体積

ここで、応力 $\sigma$ と歪 $\varepsilon$ 、歪 $\varepsilon$ と変位 $\delta$ の間には、次の関係式が成立します。

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} \quad (1-18)$$

$$\{\varepsilon\} = [B] \{\delta\} \quad (1-19)$$

ただし、 $[D]$  : 弾性マトリックス

$$[\mathbf{D}]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{zx}} \end{bmatrix} \quad (1-20)$$

$$[\mathbf{D}] = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & 0 & 0 & 0 \\ d_{12} & d_{22} & d_{23} & 0 & 0 & 0 \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{zx} \end{bmatrix} \quad (1-21)$$

$$d_{11} = \frac{1}{GE_y} \left( \frac{1}{E_z} - \frac{\nu_{yz}^2}{E_y} \right) \quad (1-22)$$

$$d_{22} = \frac{1}{GE_z} \left( \frac{1}{E_x} - \frac{\nu_{zx}^2}{E_z} \right) \quad (1-23)$$

$$d_{33} = \frac{1}{GE_x} \left( \frac{1}{E_y} - \frac{\nu_{xy}^2}{E_x} \right) \quad (1-24)$$

$$d_{12} = \frac{1}{GE_z} \left( \frac{\nu_{yz} \nu_{zx}}{E_y} + \frac{\nu_{xy}}{E_x} \right) \quad (1-25)$$

$$d_{13} = \frac{1}{GE_y} \left( \frac{\nu_{xy} \nu_{yz}}{E_x} + \frac{\nu_{zx}}{E_z} \right) \quad (1-26)$$

$$d_{23} = \frac{1}{GE_x} \left( \frac{\nu_{zx} \nu_{xy}}{E_z} + \frac{\nu_{yz}}{E_y} \right) \quad (1-27)$$

$$C = \frac{1}{E_x E_y E_z} \left( 1 - 2 \nu_{xy} \nu_{yz} \nu_{zx} - \frac{E_y}{E_x} \nu_{xy}^2 - \frac{E_z}{E_y} \nu_{yz}^2 - \frac{E_x}{E_z} \nu_{zx}^2 \right) \quad (1-28)$$



[B]：歪マトリックス。要素節点の形状関数の演算形となる。

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial X} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial Y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial Z} \\ \frac{\partial}{\partial Y} & \frac{\partial}{\partial X} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial Z} & \frac{\partial}{\partial Y} \\ \frac{\partial}{\partial Z} & 0 & \frac{\partial}{\partial X} \end{bmatrix} \quad (1-29)$$

(1-19)式を(1-18)式に代入すると、次式が得られます。

$$\{\sigma\} = [D][B]\{\delta\} \quad (1-30)$$

(1-19)式と(1-30)式を(1-13)式に代入すると、全ポテンシャルエネルギーは次式のようにになります。

$$\pi = 0.5 \int \{\delta\}^T [B]^T [D] [B] \{\delta\} dV - \int \{\delta\}^T \{p\} dV \quad (1-31)$$

ここで、1つの有限要素について考え、(1-31)式の右辺を要素の各節点変位を用いて表わします。そして、この全ポテンシャルエネルギーを最小化するため、 $\pi$ を各節点変位で偏微分した式を0とおきます。そうすると次式となります。

$$\frac{\partial \pi_e}{\partial \{\delta_e\}} = \int [B]^T [D] [B] \{\delta_e\} dV - \int \{p\} dV = 0 \quad (1-32)$$

ただし、添え字eは要素を示す（以下同じ）。

$$\therefore \int [B]^T [D] [B] \{\delta_e\} dV = \int \{p\} dV \quad (1-33)$$

$$\therefore [K_e] \{\delta_e\} = \{F_e\} \quad (1-34)$$

ただし、 $[K_e]$ ：要素の剛性マトリックス

$$[K_e] = \int [B]^T [D] [B] dV \quad (1-35)$$

$\{F_e\}$ ：要素の荷重ベクトル

$$\{F_e\} = \int \{p\} dV \quad (1-36)$$

(1-34)式を全要素について加え合わせると、全体の方程式は次の形となります。

$$[K] \{\delta\} = \{F\} \quad (1-37)$$

ただし、 $[K]$ ：構造全体の剛性マトリックス。本行列は、対角部要素以外が0の対称バンドマトリックス形となる。

$\{F\}$ ：構造全体の荷重ベクトル。荷重条件によって決まる。

上記の(1-37)式を解くことにより、節点変位 $\{\delta\}$ が求まります。方程式は、大規模FEMに対応できるICCG（Incomplete Cholesky Conjugate Gradient）法<sup>B16)</sup>により解きます。

#### 1.4 応力の計算方法

(1-16) 式の節点変位  $\{\delta\}$  が求まったら、次式によりガウス積分点の応力を算出します。

$$\{\sigma_G\} = [D][B]\{\delta\} \quad (1-38)$$

ただし、 $\{\sigma_G\}$  : ガウス積分点の応力ベクトル。各ガウス点毎に 6 応力成分。

そして、要素節点の応力は、ガウス積分点の応力を用いて次式により算出します。

$$\{\sigma_{PJ}\} = [N_G]^{-1} \{\sigma_{Gj}\} \quad (1-39)$$

ただし、 $\{\sigma_{PJ}\}$  : 六面体要素の 20 節点の応力ベクトル（応力は 1 成分）。添え字  $j$  ( $j=1 \sim 6$ ) は各応力成分毎に計算することを意味する（以下同様）。

$[N_G]$  : 要素節点値ベクトルからガウス積分点値ベクトルを算出するための形状関数行列。本ソフトでは 27 行  $\times$  20 列となる。その逆行列  $[N_G]^{-1}$  は、20 行  $\times$  27 列となるが、KH 法最適化手法（算生会ソフト参照）を利用して算出しておく。

$\{\sigma_{Gj}\}$  : ガウス積分点 27 点の応力ベクトル（応力は 1 成分）。

(1-39) 式による節点応力の計算は、各六面体要素毎に計算します。そのため、複数の要素間で共用される節点については、複数の要素で算出された応力の平均値を採用します。

次に各節点で、応力ベクトル  $\{\sigma_{PJ}\}$  から最大主応力  $\sigma_{\max}$ 、最小主応力  $\sigma_{\min}$ 、および最大剪断応力  $\tau_{\max}$  を計算します。ただし、 $\sigma_{\max}$  と  $\sigma_{\min}$  は正負の符号の入ったもので、 $\tau_{\max}$  は絶対値とします。

注) 剪断応力は  $\pm$  で同じ絶対値のものが存在します。

3 次元の応力については、(1-14) 式の応力ベクトルに対して、主応力  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  が次式の 3 実根で与えられます。<sup>C13)</sup> そして、その最大のものと最小のものを取って  $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$  とします。

$$\begin{aligned} & \sigma^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \sigma^2 + (\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2) \sigma \\ & - (\sigma_x \sigma_y \sigma_z - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 + 2 \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx}) = 0 \end{aligned} \quad (1-40)$$

(1-40) 式から  $\sigma_{\max}$  と  $\sigma_{\min}$  を計算する方法は、先ず (1-40) 式の左辺を  $f(\sigma)$  とおきます。そして、 $f'(\sigma) = 0$  の 2 根を算出します。そうすると、その 2 根は  $f(\sigma)$  の極値の点に相当しますので、大きい方の根以上の範囲に  $\sigma_{\max}$  が存在し、また小さい方の根以下の範囲に  $\sigma_{\min}$  が存在します。このように  $\sigma_{\max}$  と  $\sigma_{\min}$  の存在範囲がわかれば、Regular Falsi 法を適用して解を得ることができます。なお、Regular Falsi 法については、プログラムおよび算生会ソフト「方程式ソルバー」の説明書を参照してください。

上記により  $\sigma_{\max}$  と  $\sigma_{\min}$  が求まったら、次式により  $\tau_{\max}$  を算出します。

$$\tau_{\max} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2 \quad (1-41)$$

また、Mises 応力  $\sigma_{\text{Mises}}$  は次式により計算します。<sup>C15)</sup>

$$\sigma_{\text{Mises}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right\}} \quad (1-42)$$

## 第2章 プログラムの機能・構成

### [VBプロジェクト名] AnIsoFEM

本ソフトでは直交異方性3次元構造の弾性強度解析を行ないます。また、大変形問題にも対応できます。なお、初期歪みは取り扱いません。

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「解析データ」、「計算」、「後処理」、「終了」の4つです。「解析データ」メニューでは、別途「FEM立体データ」ソフトにより作成した解析データファイルを使用します。「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。なお、「計算」メニューには体積計算の補助機能もあります。

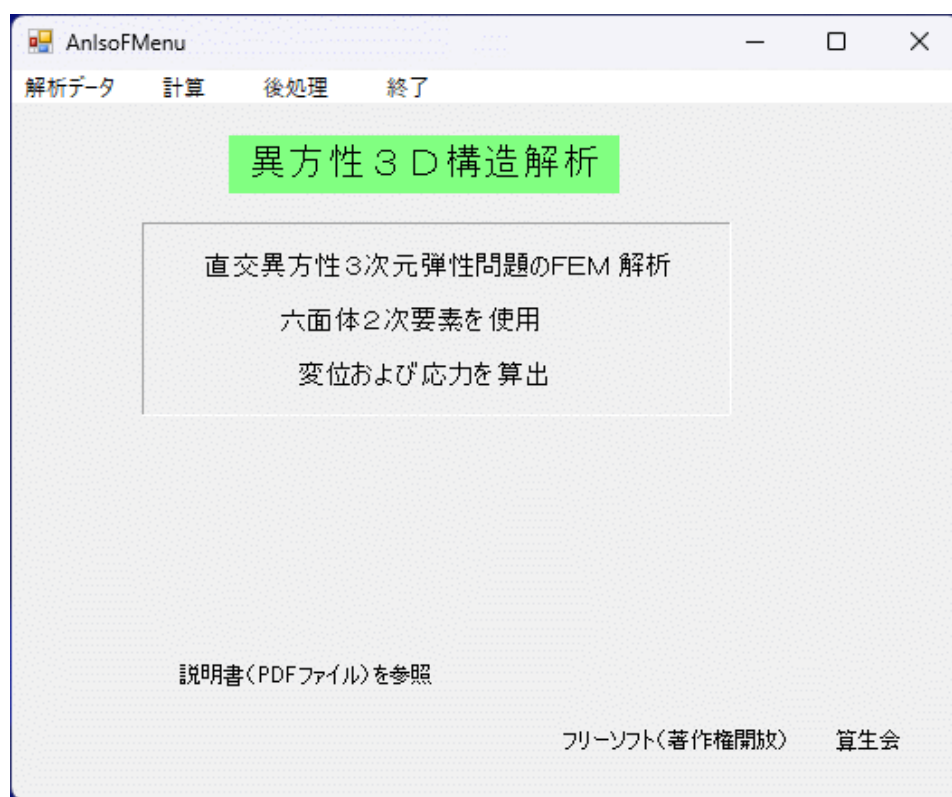


図2-1 「AnIsoFEM」ソフトのメニュー画面

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AnIsoFMenuモジュール\*で制御し、その下に「解析データ」、「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、「入力データファイル」、「結果データファイル」の2種類を使用しています。また、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。

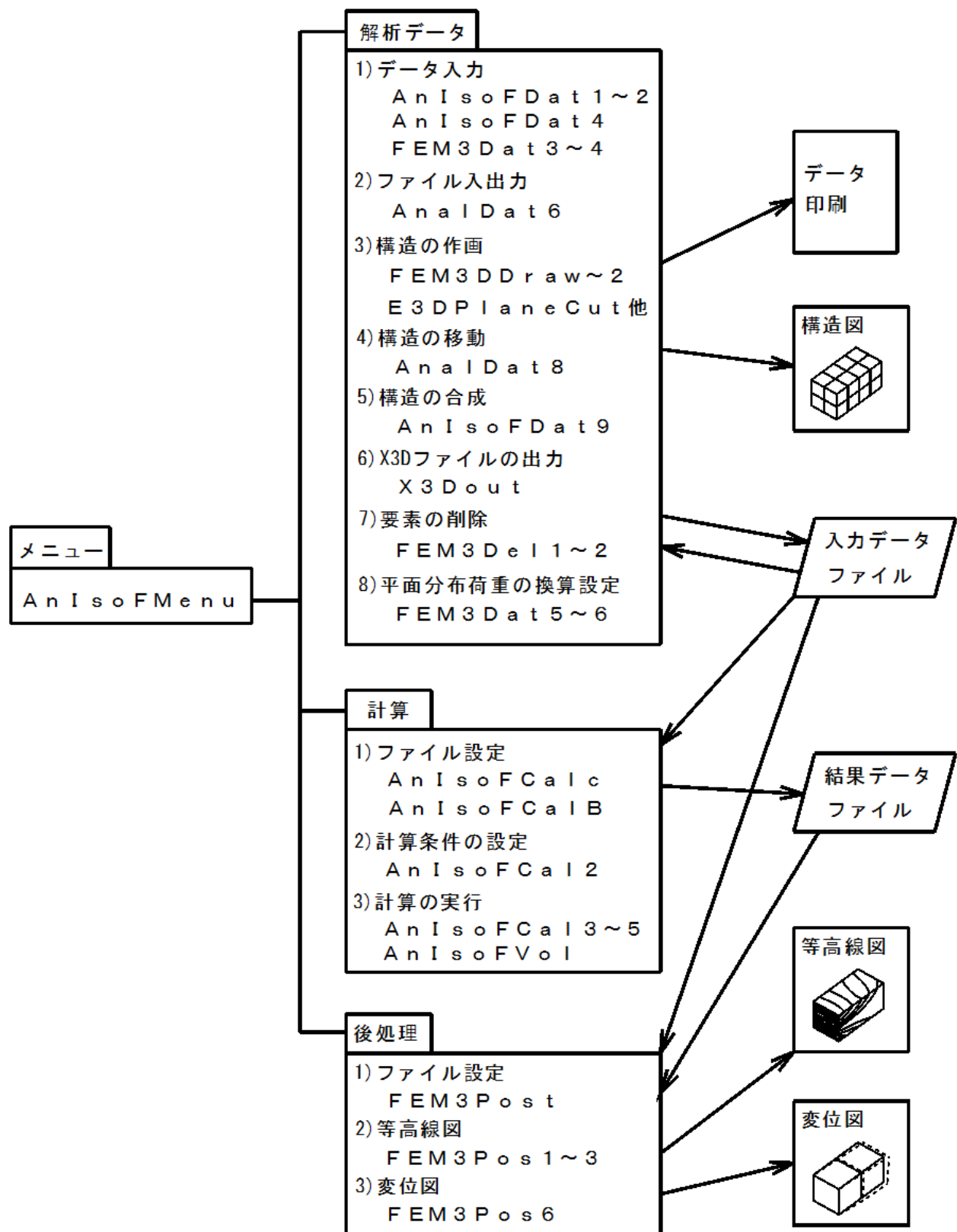


図2-2 「AnIsoFEM」ソフトのプログラム構成

表2-2に本ソフトのファイルリストを示します。同表で、〔解析データ〕のAnIsoFDat1~2、4、FEMDat3~4は、各種データを画面入力するためのものです。特に、AnIsoFDat2では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2-2 「AnIsoFEM」ソフトのファイルリスト

[全般]

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

[解析データ]

ファイル名	内 容
AnIsoFDat1. vb	データ仕様の入力
AnIsoFDat2. vb	各データの入力
AnIsoFDat4. vb	材料データの入力
AnaIDat6. vb	データファイルの入出力
AnaIDat8. vb	構造の移動
AnIsoFDat9. vb	構造の合成
FEM3Dat3. vb	固定境界の一括設定
FEM3Dat4. vb	表面分布荷重の一括設定
FEM3Dat5. vb	矩形分布荷重の換算設定
FEM3Dat6. vb	円形分布荷重の換算設定
FEM3DDraw. vb	構造の作画
FEM3DDraw1. vb	構造図でデータ入力項目の選択
FEM3DDraw2. vb	構造図でデータの入力
E3DPlaneCut. vb	3次元構造の面切断の設定（各3次元図に共通）
MouseShift. vb	マウス回転操作の説明（各3次元図に共通）
X3Dout. vb	X3Dファイルの出力
FEM3Del1. vb	要素の削除数の入力と削除の実行
FEM3Del2. vb	要素削除の要素指定

[計算]

ファイル名	内 容
AnIsoFCalc. vb	計算に使用するファイルの設定
AnIsoFCal2. vb	計算条件の設定
AnIsoFCal3. vb	解析計算の実行（反復法）
AnIsoFCal4. vb	解析計算の実行（バンドマトリックス法）
AnIsoFCal5. vb	解析計算の実行（スカイライン法）
AnIsoFCalB. vb	解析計算のバッチ処理
AnIsoFVol. vb	体積計算のファイル設定と実行

[後処理]

ファイル名	内 容
FEM3Post. vb	後処理に使用するファイルの設定
FEM3Pos1. vb	等高線図作画の変数の指定
FEM3Pos2. vb	等高線図の仕様設定
FEM3Pos3. vb	等高線図の作画実行
FEM3Pos6. vb	変位図の作画実行

### 第3章 構造データの作り方

一般には自動メッシュを利用しますので、人手で構造データ全体を作成することは少ないと思われます。しかし、構造データについてよく理解しておく必要があります。有限要素のメッシュデータについては、「FEM立体データ」と同じなので、ここでは補足説明を主体に説明します。また、境界条件等についても説明します。

構造データはすべて3次元のXYZ座標を用います。使用する要素は図1-1で示した六面体20節点のアイソパラメトリック要素です。本要素のガウス積分点は27点ですが、入力データの積分点数は1軸当りの3となります（構造全体で一括）。六面体内の積分点位置をすべて図示するのはわかりにくくなるので、要素の局所座標の $\xi$   $\eta$  面における積分点位置を図3-1に示します。 $\xi$   $\xi$  面や $\eta$   $\eta$  面でも同様です。面での積分点数は、1軸当り積分点数の2乗の9点です。

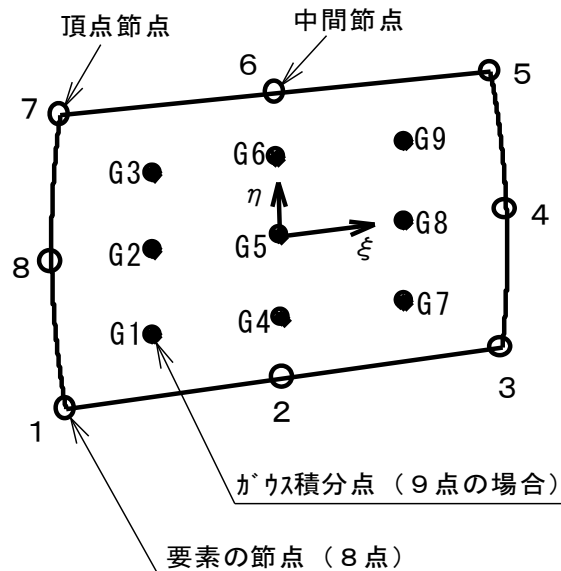


図3-1 要素の1面の積分点位置 ( $\xi$   $\eta$  座標面)

以降では、図3-2に示すテスト用構造モデルを例に取り、構造データ作成の手順に沿って説明します。

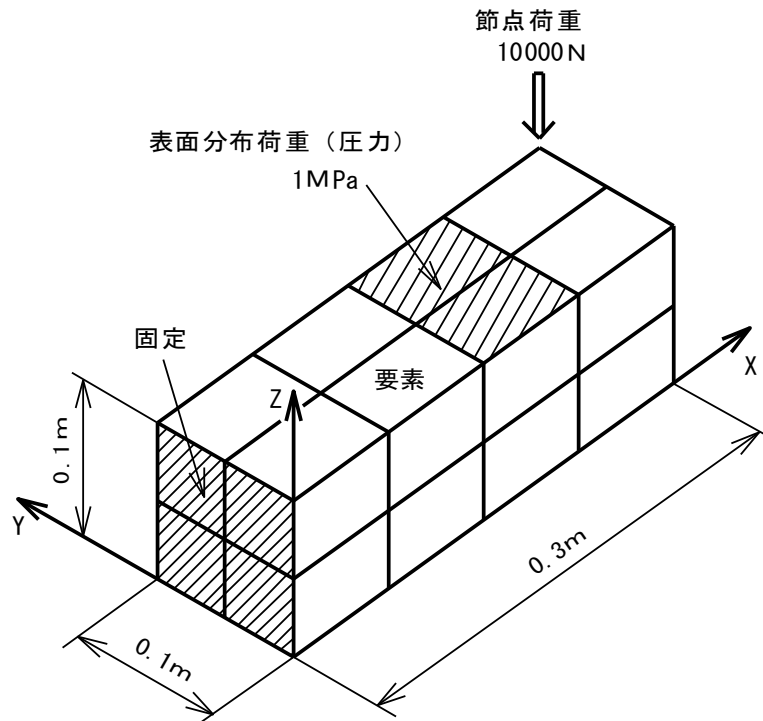
1) 先ず構造を略図に描きます。

略図は図3-2のような斜視図がわかりやすいです。略図には座標軸も明記します。

2) 自動メッシュの場合は、「FEM立体データ」ソフトにより、要素や節点を自動生成します。自動メッシュでない場合は、構造を六面体形要素に分割します。

① 構造すべてを適当な大きさの六面体に分割します。六面体の面は四角形で、その辺（稜線）は直線でも曲線（円弧）でも構いません。また、面の形状は、三角形であっても、その三角形のいずれかの辺の midpoint に頂点節点を設けるような変則の四角形も使用できます。

- ②六面体の大きさは、問題により異なり、全体の一部だけを細かくすることもあります。  
要素分割の際、各要素の頂点などの節点座標が計算しやすいように、なるべく座標軸に平行に分割します。



[材料]  $E_x : 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$        $G_{xy} : 0.84 \times 10^5 \text{ MPa}$   
 $E_y : 1.4 \times 10^5 \text{ MPa}$        $G_{yz} : 0.42 \times 10^5 \text{ MPa}$   
 $E_z : 0.7 \times 10^5 \text{ MPa}$        $G_{zx} : 0.63 \times 10^5 \text{ MPa}$   
 $\nu_{xy} : 0.1$        $\nu_{yz} : 0.2$        $\nu_{zx} : 0.3$   
 比重量 :  $78000 \text{ N/m}^3$  (自重有り)

図3-2 テスト用構造モデル

- 3) 自動メッシュでない場合、全要素に番号を付けます。

要素番号は1番から欠番なしに付けなければなりません。要素番号の順番はどのようにしても問題ありませんが、規則正しく付番した方がわかりやすいです。

- 4) 自動メッシュでない場合、全節点に番号を付けます。

節点番号は1番から欠番なしに付けなければなりません。節点番号の順番はどのようにしても問題ありませんが、規則正しく付番した方がわかりやすいです。FEM行列のバンド幅を小さくするには、規則正しく、短い構造形状（すなわち要素の少ない）方向に入力するのがコツです。

なお、本ソフトで標準のICCG法ソルバーの場合、バンド幅は問題ありません。

また、バンドマトリックス法を選択した場合でも、自動的に節点順序の改良処理を行ないバンド幅を低減しています。従って、節点番号の順番について特に注意しなくても構いません。

5) 自動メッシュでない場合、節点座標を算出しておきます。

すべての六面体要素の頂点節点の座標を求めておきます。要素の辺が直線の場合、中間節点座標は、自動計算機能があるので求めておかなくても構いません。なお、要素の辺が円弧等の場合、節点座標の算出に表計算ソフトを利用すると便利です。

6) 拘束（支持点および境界）を決めます。

拘束条件は節点の各変位方向(X, Y, Z軸方向)に規定します。従って、最初に要素分割する際、拘束する節点を考慮して分割する必要があります。

表3-1に本ソフトの拘束の種類を示します。同表のように、節点毎でも要素の面毎でも拘束条件を設定できます。要素の1つの面は8節点ありますので、面の全節点を同一に拘束する場合は、②の「面拘束」を選択する方が、データ入力が容易です。

表3-1 拘束の種類

拘束種類	内容	拘束条件の設定方法
①節点拘束	個別の節点毎に拘束する。	節点の各座標軸方向の変位を指定量に固定する。
②面拘束	要素の面の全節点を同一拘束する。	要素の1つの面の全節点について、各座標軸方向変位を同一指定量に固定する。

注) 変位の指定量を0以外にすると、その量の強制変位となる。

7) 荷重条件を決めます。

表3-2に荷重の種類を示します。同表のように、節点荷重、座標位置荷重、表面分布荷重、自重、回転遠心力の5種類があります。節点荷重と座標位置荷重はX, Y, Zの各座標軸方向に設定できますが、表面分布荷重は圧力に相当する垂直方向だけです。また、自重は、地震荷重も含め、各座標軸方向に任意の自重倍率を負荷できます。

座標位置荷重は、要素メッシュに関係なく使用できます。また、本ソフトでは矩形と円形の平面分布荷重を座標位置荷重に換算設定する機能もあります。従って、平面分布荷重でも要素メッシュに関係なく設定可能です。



表3-2 荷重の種類

荷重種類	内容
①節点荷重	節点に作用する集中荷重 (X, Y, Z方向)
②座標位置荷重	任意の座標位置に作用する集中荷重 (X, Y, Z方向)。計算時に節点に自動分配。
③表面分布荷重	要素の面に垂直に作用する単位面積当りの分布荷重 (外から面へ向かう方向が正)
④自重 (地震荷重を含む)	構造自体の重量で、材料の比重量を与えることにより自動計算。X, Y, Z方向に任意の自重倍率を設定。
⑤回転遠心力	X, Y, Z軸のいずれかの回りの回転数により生じる質量遠心力

#### 8) バネ支持の条件があれば付加します。

節点をバネ支持する場合には、その条件を付加します。バネ支持には次の2種類があります。

##### ①単一節点のバネ

その節点単独のバネで、バネ支持の条件は各変位の座標軸方向に与えます。ただし、同じ変位について、7) 項の拘束設定をしてはなりません（拘束設定するとバネ支持が無効となります）。

1つの座標軸方向において、バネ支持は次式で表わされます。

$$f = k \cdot u + f_s \quad (3-1)$$

ただし、 $f$ ：座標軸正方向のバネ力

$k$ ：バネ定数（座標軸正方向の単位変位当たりの力で負数）

$u$ ：バネ変位（節点変位と同じ）

$f_s$ ：初期バネ力。これは、節点変位が0、すなわち節点が構造モデル定義位置にあるときのバネ力を表わします。

上式の $k$ と $f_s$ を決める必要があります。なお、バネが座標軸に平行でない場合は、各座標軸の方向余弦を掛けて分配します。

##### ②節点間のバネ

2つの節点間に設けるバネで、どちらか片方を第1節点とします。バネの力の方向は2節点を結ぶ直線方向になり、その方向のみに(3-1)式と同様に $k$ と $f_s$ を設定します。また、2節点共、7) 項の拘束設定をしてはなりません（拘束設定するとバネ支持が無効となります）。

◇ 初期バネ力 $f_s$ は、第1節点において、第2節点へ向く力の向きを正とします。

#### 9) データの単位系

本ソフトでは、データの単位系は何でも使用できますが、入力データ全体の単位系は統一しておかねばなりません。表3-3に単位系の例を示しておきます。

表3-3 単位系の例

データ項目	S I 単位系	工業単位系
長さ	m	mm
ヤング率	Pa (=N/m <sup>2</sup> )	kgf/mm <sup>2</sup>
比重量	N/m <sup>3</sup>	kgf/mm <sup>3</sup>
力	N	kgf
分布荷重	Pa (=N/m <sup>2</sup> )	kgf/mm <sup>2</sup>
応力	Pa (=N/m <sup>2</sup> )	kgf/mm <sup>2</sup>
バネ定数	N/m	kgf/mm
加速度	m/s <sup>2</sup>	mm/s <sup>2</sup>

#### 10) 要素の追加変更

作成済の入力データファイルに対して、要素を追加変更する場合は次の点に注意しなければなりません。

- ①要素番号は欠番なしに増加させます。
- ②節点番号も欠番なしに増加させます。
- ③データの修正は、先ず要素数と節点数を正確に修正します。

## 第4章 「解析データ」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「解析データ」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、16個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。

◇「FEM立体データK」ソフトによる本解析用データファイルを読み込めます。

また、「オプション」では、3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。

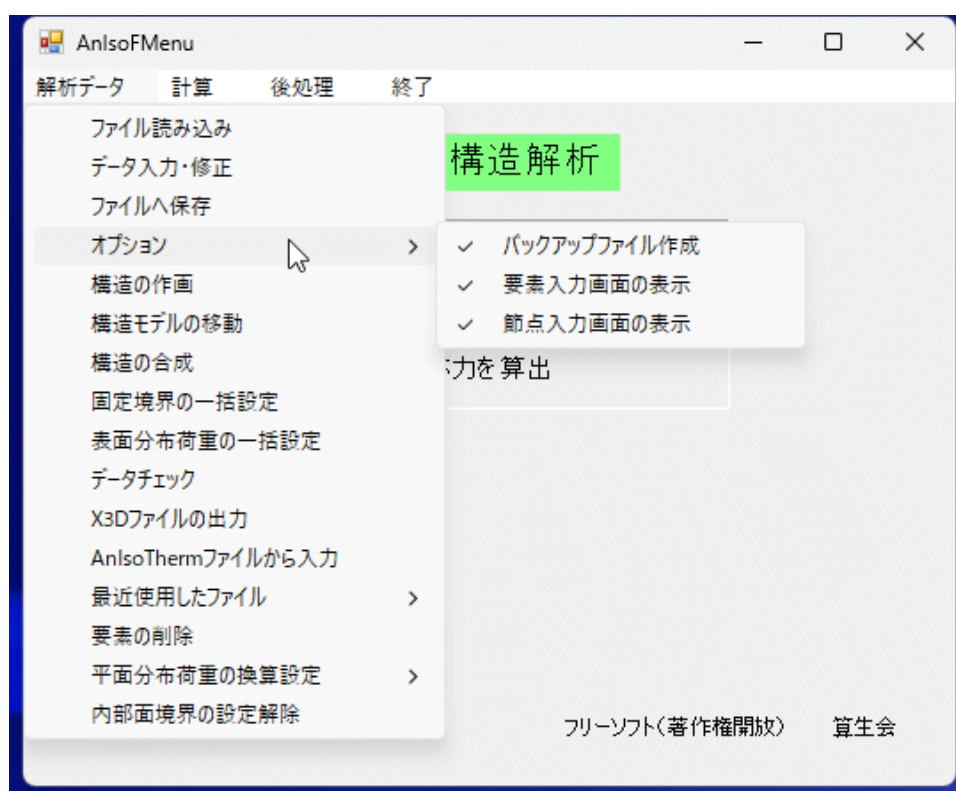


図4-1 「解析データ」サブメニュー画面

### 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。なお、境界条件等のデータ入力・修正は、構造図の画面でも実施できます。

図4-2では図3-2のテスト用構造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節点数～材料データ数、および拘束節点数～バネ支持個数は、各構造モデルに応じた数を入力します。
- ◇拘束する境界については、節点毎に拘束設定できます。それ故、拘束する節点の個数を拘束節点数として入力できます。しかし、要素の1つの面で全節点を同一拘束する場合は、面の8節点を個別に拘束しなくても、面全体でまとめて設定できます。その際は、拘束する面の個数を拘束面数として入力します。
- ◇同一節点について複数の拘束がデータ設定されている場合の解析計算は、すべての拘束が採用され、同一軸方向では最大拘束値（強制変位込み）となります。
- ◇構造が自由に動かないように、すべての座標軸方向について拘束する必要があります。
- ③自重の有無について、なしの場合は0、有りの場合は1を入力します。
- ④回転遠心力の区分で、なしか、X, Y, Z軸回りのいずれかを選択します。回転遠心力有り（X, Y, Z軸回りの選択有り）の場合は図4-3の画面となります。
- ◇図4-3の画面において、回転数（単位時間当たり）と重力加速度を入力します。
- ⑤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。
- ⑥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

データを入力してください。

タイトル

節点数

要素数

材料データ数  荷重節点数

拘束節点数  座標位置荷重数

拘束面数  表面分布荷重数

バネ支持個数

自重の有無(0:なし、1:有り)  回転数(単位時間当たり)

重力加速度

回転遠心力の区分

- ☐ なし
- ☐ X軸回り
- ☐ Y軸回り
- ☒ Z軸回り

図4-3 データ仕様入力画面（回転遠心力有りの場合）

#### 4.4 要素データ入力画面（オプションで省略可能）

図4-4に要素データ入力画面を示します。自動メッシュだけで済む場合は変更不要です。

- ①材料番号は、材料データ数に応じた番号を入力します。
- ②節点順1から順に各要素の全節点番号（六面体では20個、四面体では10個）を、必ず頂点節点を最初に、かつ図1-1または図1-2の節点番号の順に入力します。
- ③「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。
  - ◇表計算ソフトからコピーすることも可能です。
- ④すべての要素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。

#### 4.5 節点データ入力画面（オプションで省略可能）

図4-5に節点データ入力画面を示します。自動メッシュだけで済む場合は変更不要です。

- ①各節点の座標を入力します。
- ②「一括定数掛算」ボタンをクリックして定数値を入力し、全座標に一括掛算することができます。
  - ◇本機能により、座標値の単位を変更したり、構造を拡大・縮小したりできます。
- ③すべての節点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。

AnIsoFdat2

要素データの入力

	要素番号	材料番号	節点順 1	節点順 2	節点順 3	節点順 4	節点順 5	節点順
▶	1	1	1	6	9	10	11	7
	2	1	3	7	11	12	13	8
	3	1	9	14	17	18	19	15
	4	1	11	15	19	20	21	16
	5	1	31	36	39	40	41	37
	6	1	33	37	41	42	43	38
	7	1	39	44	47	48	49	45
	8	1	41	45	49	50	51	46
	9	1	61	66	69	70	71	67
	10	1	63	67	71	72	73	68
	11	1	69	74	77	78	79	75
	12	1	71	75	79	80	81	76
	13	1	91	96	99	100	101	97
	14	1	93	97	101	102	103	98

設定 戻る コピー 貼り付け 取り消し

図4-4 要素データ入力画面

AnIsoFdat2

節点データの入力

	節点番号	X座標	Y座標	Z座標
▶	1	0	.1	0
	2	0	.1	.025
	3	0	.1	.05
	4	0	.1	.075
	5	0	.1	.1
	6	0	.075	0
	7	0	.075	.05
	8	0	.075	.1
	9	0	.05	0
	10	0	.05	.025
	11	0	.05	.05
	12	0	.05	.075
	13	0	.05	.1
	14	0	.025	0
	15	0	.025	.05

設定 戻る 一括数掛算 コピー 貼り付け 取り消し

図4-5 節点データ入力画面

#### 4.6 拘束節点データ入力画面

本入力、拘束節点数が1以上の場合にのみ実施します。図4-6に拘束節点データ入力画面を示します。

- ①拘束節点数の分だけ拘束番号が表示されているので、それぞれ節点番号と各座標軸方向の拘束区分、拘束量を入力します。

◇拘束区分（X拘束など）は、固定（強制変位を含む）する場合に1を入力し、さらに拘束量（ $\delta X$ など）を設定します。通常は拘束量は0にして節点を固定しますが、拘束量（ $\delta X$ など）に0以外の数値を入力するとその量だけの強制変位となります。

注）拘束区分（X拘束など）が自由の0である場合は、拘束量（ $\delta X$ など）は無視されます。

- ②節点番号に「-1」を入力すると、その行を削除して前詰めします。
- ③1つの拘束番号のデータを他の拘束番号範囲へコピーしたい場合は、「一括コピー」ボタンをクリックして、まとめて実施できます。ただし、節点番号はコピーされません。
- ④すべての拘束節点データを入力し終ったなら、「設定」ボタンをクリックして材料データ入力画面に移ります。

拘束番号	節点番号	X拘束	$\delta X$	Y拘束	$\delta Y$	Z拘束	$\delta Z$
1	1	1	0	1	0	1	0
2	2	1	0	1	0	1	0
3	3	1	0	1	0	1	0
4	4	1	0	1	0	1	0
5	5	1	0	1	0	1	0
6	6	1	0	1	0	1	0
7	7	1	0	1	0	1	0
8	8	1	0	1	0	1	0
9	9	1	0	1	0	1	0
10	10	1	0	1	0	1	0
11	11	1	0	1	0	1	0
12	12	1	0	1	0	1	0
13	13	1	0	1	0	1	0
14	14	1	0	1	0	1	0
15	15	1	0	1	0	1	0

図4-6 拘束節点データ入力画面

#### 4.7 拘束面データ入力画面

本入力は、拘束面数が1以上の場合にのみ実施します。図4-7に拘束面データ入力画面を示します。

- ①拘束面数の分だけ拘束番号が表示されているので、それぞれ要素番号、面番号と各座標軸方向の拘束区分、拘束量を入力します。  
◇面番号は、要素内の1～6の面番号で、要素の節点番号順との関係は図1-1に示す通りです。この面番号は、構造の作画画面で表示して確認できます。
- ②要素番号に「-1」を入力すると、その行を削除して前詰めします。
- ③1つの拘束番号のデータを他の拘束番号範囲へコピーしたい場合は、「一括コピー」ボタンをクリックして、まとめて実施できます。ただし、要素番号はコピーされま

せん。

- ④すべての拘束面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。

AnIsoFDat2

拘束面データの入力 要素番号に-1を入力すると、その行を削除・前詰めします。

[拘束区分] 0:自由 1:固定(強制変位も可)

	拘束番号	要素番号	面番号	X拘束	$\delta X$	Y拘束	$\delta Y$	Z拘束	$\delta Z$
▶	1	1	1	1	0	1	0	1	0
	2	2	1	1	0	1	0	1	0
	3	3	1	1	0	1	0	1	0
	4	4	1	1	0	1	0	1	0
*									

設定 戻る 一括コピー コピー 貼り付け 取り消し

図4-7 拘束面データ入力画面

#### 4.8 節点荷重データ入力画面

本入力、節点荷重がある場合（荷重節点数が1以上）にのみ実施します。図4-8に節点荷重データ入力画面を示します。

- ①荷重節点の分だけ荷重番号が表示されているので、それぞれ要素番号と各座標軸方向の荷重を入力します。
- ②節点番号に「-1」を入力すると、その行を削除して前詰めします。
- ③1つの荷重番号のデータを他の荷重番号範囲へコピーしたい場合は、「一括コピー」ボタンをクリックして、まとめて実施できます。ただし、節点番号はコピーされません。
- ④すべての節点荷重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。



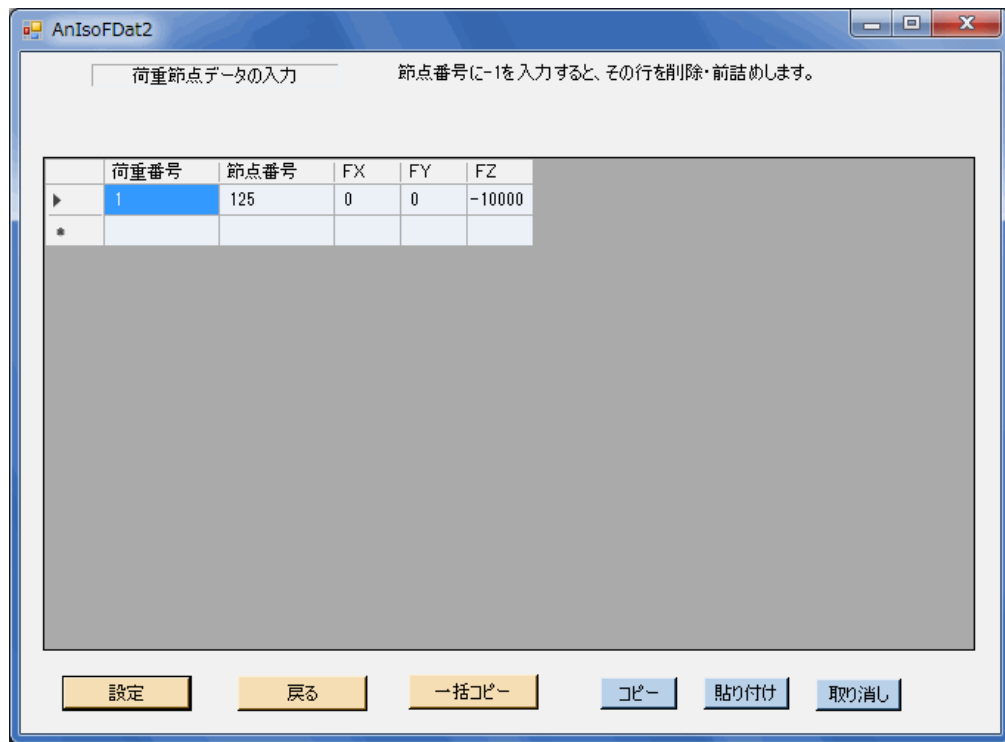


図4-8 節点荷重データ入力画面

#### 4.9 座標位置荷重データ入力画面

本入力、座標位置荷重がある場合（座標位置荷重数が1以上）にのみ実施します。

図4-9に座標位置荷重データ入力画面を示します。

- ①座標位置荷重数の分だけ荷重番号が表示されているので、それぞれX、Y、Z座標と各軸方向の荷重を入力します。

注）X、Y、Z座標は3次元構造の外表面上の座標です。構造内部の座標を入力しても計算は可能ですが、実際の構造には適合しないと考えられます。

- ②最初の座標（X座標）に「-999」を入力すると、その行を削除して前詰めします。
- ③1つの荷重番号のデータを他の荷重番号範囲へコピーしたい場合は、「一括コピー」ボタンをクリックして、まとめて実施できます。ただし、座標値はコピーされません。
- ④すべての座標位置荷重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。



図4-9 座標位置荷重データ入力画面

#### 4.10 表面分布荷重データ入力画面

本入力、表面分布荷重がある場合（表面分布荷重数が1以上）にのみ実施します。

図4-10に表面分布荷重データ入力画面を示します。

- ①表面分布荷重数の分だけ荷重番号が表示されているので、それぞれ要素番号、面番号と分布荷重を入力します。

◇面番号は、要素内の1～6の面番号で、要素の節点番号順との関係は図1-1に示す通りです。この面番号は、構造の作画画面で表示して確認できます。

◇分布荷重は面に垂直方向の単位面積当りの荷重（圧力に相当）で、外から面に向かう方向を正とします。

- ②要素番号に「-1」を入力すると、その行を削除して前詰めします。
- ③1つの荷重番号のデータを他の荷重番号範囲へコピーしたい場合は、「一括コピー」ボタンをクリックして、まとめて実施できます。ただし、要素番号はコピーされません。
- ④すべての表面分布荷重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。

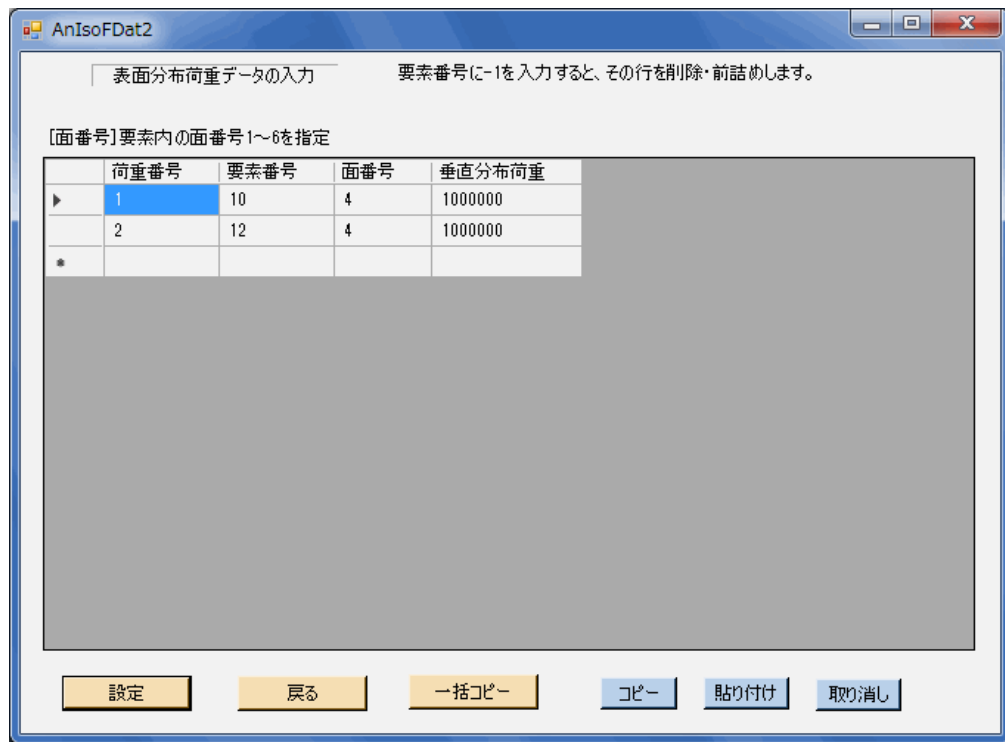


図4-10 表面分布荷重データ入力画面

#### 4.11 バネ支持データ入力画面

本入力、バネ支持節点がある場合（バネ支持個数が1以上）にのみ実施します。図4-11にバネ支持節点データ入力画面を示します。

- ①バネ支持個数だけNo.が表示されているので、それぞれ節点番号1、節点番号2および各軸方向のバネ定数（負数）と初期バネ力を入力します。もちろん、バネ支持のない軸方向は入力不要です。

◇節点番号2は節点間バネの場合にのみ入力します。

◇バネ定数と初期バネ力については、第3章の(3-1)式を参照してください。ただし、節点間バネの場合は、2節点を結ぶ直線方向のデータを、最初の座標軸方向欄に入力します（初期バネ力は節点番号1において節点番号2への向きが正）。

- ②節点番号に「-1」を入力すると、その行を削除して前詰めします。
- ③1つの番号のデータを他の番号範囲へコピーしたい場合は、「一括コピー」ボタンをクリックして、まとめて実施できます。ただし、節点番号はコピーされません。
- ④すべてのバネ支持節点データを入力し終わったら、「設定」ボタンをクリックして次の画面に移ります。

#### 4.12 自重倍率データ入力画面

本入力、自重がある場合にのみ実施します。また、次項の材料データに比重量を入力する必要があります。図4-12に自重倍率データ入力画面を示します。

- ①各座標軸方向の自重倍率を入力します。

◇座標軸の負方向の荷重であれば、自重倍率も負となります。

◇単なる自重の場合は、自重倍率は自重方向の各座標軸方向に対する方向余弦と

同じです。

◇地震荷重の場合は、各座標軸方向の荷重を自重の倍率で入力します。

- ②すべての自重倍率データを入力し終ったなら、「設定」ボタンをクリックして、次の材料データ入力画面に移ります。

AnIsoFDat2

バネ支持データの入力 節点番号1に-1を入力すると、その行を削除・前詰めします。

節点間バネの場合、節点番号1と節点番号2を入力し、バネ物性は $K_x$ と $F_{sx}$ （に節点番号1基準）。

[ $K_x$ 等]バネ定数（正方向単位変位当たりの力で負数） [ $F_{sx}$ 等]初期バネ力（正方向の力）

	No.	節点番号1	節点番号2	$K_x$	$F_{sx}$	$K_y$	$F_{sy}$	$K_z$	$F_{sz}$
▶	1	137	0	0	0	-1E+07	0	0	0
	2	121	0	0	0	0	0	-1E+07	1000
*									

設定 戻る 一括コピー コピー 貼り付け 取り消し

図4-11 バネ支持節点データ入力画面

AnIsoFDat2

自重倍率データの入力

	座標軸	X方向	Y方向	Z方向
▶	自重倍率	0	0	-1
*				

設定 戻る

図4-12 自重倍率データ入力画面

#### 4.13 材料データ入力画面

図4-13に材料データ入力画面を示します。

- ①材料の比重量と弾性定数 $E_x$ 、 $E_y$ 、 $E_z$ 、 $G_{xy}$ 、 $G_{yz}$ 、 $G_{zx}$ 、 $\nu_{xy}$ 、 $\nu_{yz}$ 、 $\nu_{zx}$ を入力します。  
各弾性定数の意味については表1-1を参照してください。

◇比重量は、自重有りの場合に有効となります。自重なしの場合に比重量を入力しても無視され、後で0に変換されます。

- 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すべての材料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。

項目	データ値
Ex	2.1E+11
Ey	1.4E+11
Ez	7E+10
Gxy	8.4E+10
Gyz	4.2E+10
Gzx	6.3E+10
$\nu_{xy}$	.1
$\nu_{yz}$	.2
$\nu_{zx}$	.3
*	

図4-13 材料データ入力画面

#### 4.14 ファイルへの保存

サブメニューの「ファイルへの保存」を選択すると、コモンダイアログでファイルを保存する画面となり、入力データファイルを設定すると、データが書き出されます。新たなファイル名を入力すると新ファイルが作成されます。先に入力データファイルを読み込んである場合に、同ファイルを選定すると上書きとなります。

図4-14に入力データファイル例を示します。

◇保存ファイルの文字コードはUTF-8です。

◇1行内の複数データは、「,」（コンマ）で区切られます。

図4-14の○印を付した数字の部分について補足説明します。

- ①「要素種類（0:六面体、1:四面体）」は0で、六面体2次要素になっています。

- ②本行以降に、ガウス積分点数、1節点当りの変数の数、材料データの成分数が自動出力されています。

```

プログラム名, AnIsoFEM
要素種類 (0:六面体、1:四面体) , 0
異方性3D構造テストモデル3
節点数, 141
要素数, 16
材料データ数, 1
拘束節点数, 21
拘束面数, 0
荷重節点数, 1
座標位置荷重数, 0
表面分布荷重数, 2
バネ支持個数, 0
自重の有無 (0:なし、1:あり) , 1
回転遠心力の区分 (0:なし、1:X軸回り、2:Y軸回り、3:Z軸回り) , 0
ガウス積分点数, 3
1節点当りの変数の数, 3
材料データの成分数, 10

```

---

```

要素データ (要素番号、材料番号、20節点番号)
1, 1, 1, 6, 9, 10, 11, 7, 3, 2, 22, 25
   26, 23, 31, 36, 39, 40, 41, 37, 33, 32
2, 1, 3, 7, 11, 12, 13, 8, 5, 4, 23, 26
   27, 24, 33, 37, 41, 42, 43, 38, 35, 34
3, 1, 9, 14, 17, 18, 19, 15, 11, 10, 25, 28
   29, 26, 39, 44, 47, 48, 49, 45, 41, 40
4, 1, 11, 15, 19, 20, 21, 16, 13, 12, 26, 29
   30, 27, 41, 45, 49, 50, 51, 46, 43, 42
5, 1, 31, 36, 39, 40, 41, 37, 33, 32, 52, 55
   56, 53, 61, 66, 69, 70, 71, 67, 63, 62
. . . . .
. . . . .
14, 1, 93, 97, 101, 102, 103, 98, 95, 94, 113, 116
   117, 114, 123, 127, 131, 132, 133, 128, 125, 124
15, 1, 99, 104, 107, 108, 109, 105, 101, 100, 115, 118
   119, 116, 129, 134, 137, 138, 139, 135, 131, 130
16, 1, 101, 105, 109, 110, 111, 106, 103, 102, 116, 119
   120, 117, 131, 135, 139, 140, 141, 136, 133, 132

```

---

```

節点データ (節点番号、X座標、Y座標、Z座標)
1, 0, .1, 0
2, 0, .1, .025
3, 0, .1, .05
4, 0, .1, .075
5, 0, .1, .1
6, 0, .075, 0
7, 0, .075, .05
8, 0, .075, .1
9, 0, .05, 0
. . . . .
. . . . .

```

図4-14 (1/2) 入力データファイル例

132,	.3,	.05,	.075
133,	.3,	.05,	.1
134,	.3,	.025,	0
135,	.3,	.025,	.05
136,	.3,	.025,	.1
137,	.3,	0,	0
138,	.3,	0,	.025
139,	.3,	0,	.05
140,	.3,	0,	.075
141,	.3,	0,	.1
-----			
各材料の物性データ			
材料番号, 1			
比重量, 78000			
Ex、Ey、Ez、Gxy、Gyz、Gzx			
2.1E+11,	1.4E+11,	7E+10,	8.4E+10, 4.2E+10, 6.3E+10
νxy、νyz、νzx			
.1,	.2,	.3	
-----			
拘束節点データ (拘束番号、節点番号、X拘束、δX、Y拘束、δY、Z拘束、δZ)			
1,	1,	1,	0, 1, 0, 1, 0
2,	2,	1,	0, 1, 0, 1, 0
3,	3,	1,	0, 1, 0, 1, 0
4,	4,	1,	0, 1, 0, 1, 0
5,	5,	1,	0, 1, 0, 1, 0
.....			
.....			
17,	17,	1,	0, 1, 0, 1, 0
18,	18,	1,	0, 1, 0, 1, 0
19,	19,	1,	0, 1, 0, 1, 0
20,	20,	1,	0, 1, 0, 1, 0
21,	21,	1,	0, 1, 0, 1, 0
-----			
荷重節点 (荷重番号、節点番号、FX、FY、Fz)			
1,	125,	0,	0, -10000
-----			
表面分布荷重 (荷重番号、要素番号、面番号、垂直方向分布荷重)			
1,	10,	4,	1000000
2,	12,	4,	1000000
-----			
自重のX、Y、Z軸方向の倍率			
0,	0,	-1	

図4-14 (2/2) 入力データファイル例

#### 4.15 構造の作画

サブメニューの「構造の作画」を選択すると、全体構造の透視図が画面に作画されます。図4-15に本例題の構造作画の画面例を示します。同図は、本画面に移った状態のもので、作画のパラメーターは標準条件になっています。

- 1) 複数材料の場合は、材料別に色分けして表示されます。
- 2) 本画面の上側と左側に、作画の種々のパラメーターを表示してあり、それらを変更することができます。変更した後は、「再描画」ボタンをクリックすると、新しいパラメーター条件による作画画面に変更されます。
- 3) パラメーターの「視点とモデルの距離倍率」は、透視変換の度合を調整するもので、小さくすると中心投影に近づき、大きくすると平行投影に近づきます。
- 4) 「視点の高さ倍率」は、透視の視点の高さを調整するもので、小さくすると視点が下がり、大きくすると上がります。
- 5) 「番号表示の項目」は、「要素番号」、「節点番号」、「面番号」を重複選択できます。
  - ◇上記のいずれかの番号表示を選択した場合に、「番号表示の文字サイズ」が有効になります。
  - ◇面番号は( )付きの数字で作画されます（後掲の図4-18参照）。

注）要素番号は、隠面処理有りの場合、隠れて見えないことがあります。
- 6) 以上のパラメーターを変更した後、最初の状態に戻すには、「標準条件に設定」ボタンをクリックします。
- 7) 「Shift+マウス」により構造を回転することができます。
  - ◇構造図の任意の場所で、Shiftキーとマウス左ボタンを押したまま、回転したい方向へマウスを移動させ、そこでマウスボタンを離します。そうしますと、回転が実行されます。
  - ◇図4-16にマウスの操作方向と回転方向の関係を示します。同図のように、スクリーンの場所により、Z軸回り、X軸回りの各回転、または構造中心回りの旋回が実施されます。
  - ◇構造図の「説明」ボタンをクリックすると、図4-16と同じ説明図が表示されます。
- 8) 「ホーム」ボタンをクリックすると、初期の回転位置に戻ります。
- 9) 「材料の指定番号」は、作画する材料を選択したい場合に材料番号を入力します。
  - ◇全材料を指定する場合は0を入力します。
  - ◇「-」付きで材料番号を入力すると、その材料だけ除外して作画します。
  - ◇一旦、ある材料番号で作画した後、他の材料番号を選択した場合は、「再描画」ボタンではなく、「全要素描画」ボタンをクリックします。
- 10) 「要素の指定番号」は、作画する要素1個を指定したい場合に要素番号を入力します。
  - ◇要素を指定しない場合は0を入力します。
- 11) 「標準・全画面切換」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。
- 12) マウス中ボタン、ホイールにより移動、拡大・縮小を行なうことができます。中ボタン



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

13) マウสดラッグ矩形により、構造図の一部分を拡大できます。

◇マウสดラッグは、拡大したい部分の左上隅にマウスを移動し、そこでマウスの左ボタンを押し、その左ボタンを押した状態で拡大部分の右下隅までマウスを移動させ、そこで左ボタンを離します。そうしますと、図4-17のようにマウสด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、元の全体構造図に戻りたい場合は、「全要素描画」ボタンをクリックします。

◇図4-17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4-18に示します。

14) 「条件設定部の表示」は、「拘束部分（緑色）」、「荷重部分（赤色）」、「バネ支持（青色）」の内、表示したい項目を重複選択できます。ただし、自重については除外しています。

◇選択した項目がカラー表示されます。図4-19に「拘束部分（緑色）」と「荷重部分（赤色）」を表示した構造図を示します。

15) 任意の要素面を右クリックすると、図4-20のように当該要素面の要素番号・節点番号・面番号が表示されます。

◇ESCキーを押すと上記の番号表示が解除されます。

16) 「データ設定モード」を選択して、任意の要素面を右クリックすると図4-21のようにデータ項目選択画面が出て、境界条件等のデータ入力・変更を実施できます。ただし、「材料番号」は要素に対するデータ設定となります。

◇図4-21の画面でいずれかのデータ項目を選択し、「設定」ボタンをクリックすると図4-22のデータ入力画面に移ります。同図は拘束節点データの入力画面ですが、他のデータ項目でも同様です。同図でのデータ入力は、前述の「データ入力・修正」サブメニュー以降の各データ入力画面と同様です。なお、「材料番号」以外の本画面では、表の最下行にデータを追加できるようになっています。図4-22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。

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

◇さかのぼれる描画の数は最大8つです。

◇回転操作があっても無視され、初期の回転位置で描画されます。

18) 「面切断設定」ボタンをクリックすると、図4-23の面切断設定の画面に移り、面切断の仕方を設定できます。この面切断とは、座標軸に直角な平面で構造を切断し、2分割されたいずれかの構造図を描くものです。図4-23の画面では次のように操作します。

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

- b) さらに、その平面の正側か負側かを選択します。
- c) 「設定」 ボタンをクリックすると面分割された構造部分が選択されて、構造図に戻ります。
- 19) 「Ctrlキー+マウス」で矩形ドラッグすると、図4-24のようにデータ項目選択画面が出て、境界条件等のデータを一括設定できます。矩形の囲む必要範囲は、条件項目により有限要素、要素面、または節点の任意の領域となります。ただし、要素面は外周の面（穴の面を含む）に限定されます。
- ◇条件項目に必要な要素・面・節点を選択されていない場合は、エラーメッセージが出ます。なお、要素は隠面を含む要素全体が矩形領域に入っていなければ選択されません。他方、面と節点は隠面に属するものは対象外となります。
- ◇図4-24の画面でいずれかのデータ項目を選択し、「設定」ボタンをクリックすると図4-25のデータ入力画面に移ります。同図は拘束面データの入力画面ですが、他のデータ項目でも同様です。同図でのデータ入力は、一括設定のために番号等の表示が省略されている以外は、前述の「データ入力・修正」サブメニュー以降の各データ入力画面と同様です。ただし、「一括削除」ボタンが追加されています。図4-25で「設定」ボタンをクリックすると、データが一括設定され、図4-26のように構造画面に反映されます。また、「一括削除」ボタンをクリックすると、既存のデータが一括して削除されます。
- 20) 本画面で「コピー印刷」ボタンをクリックすると、プリンターで画面コピーを印刷できます。
- ◇「通常画面」の作画が印刷されます。
- 21) 本画面を終了するには、「中止」ボタンをクリックします。

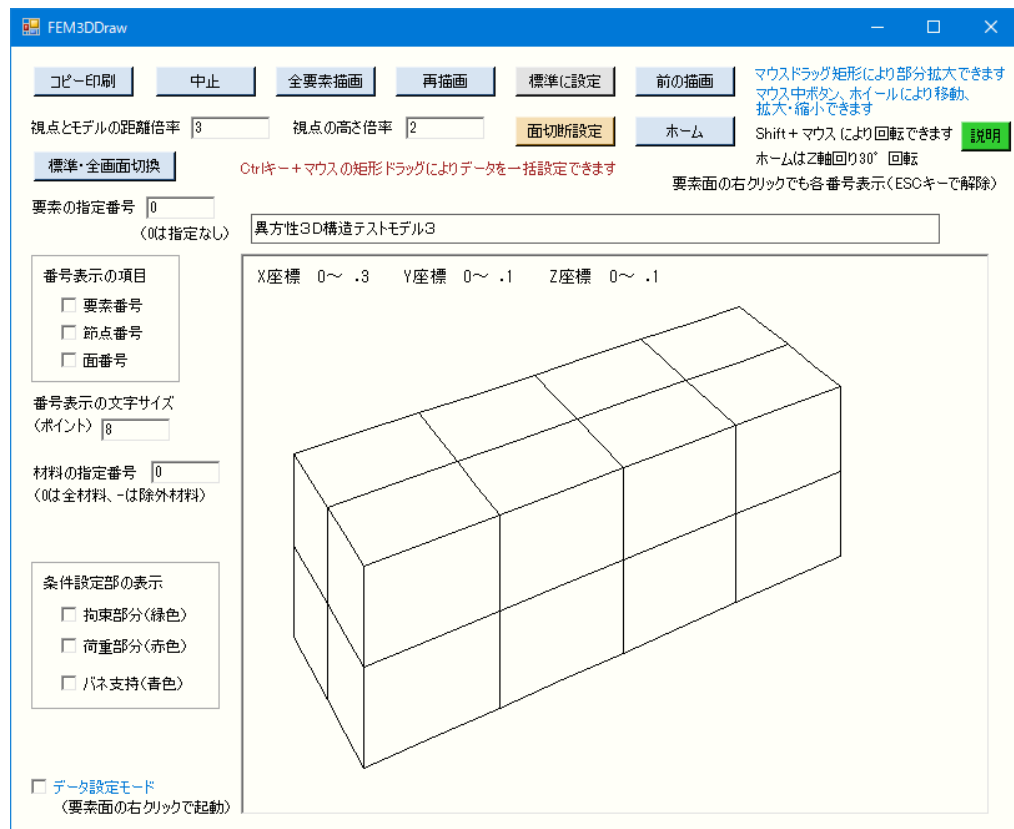


図4-15 構造作画の画面例

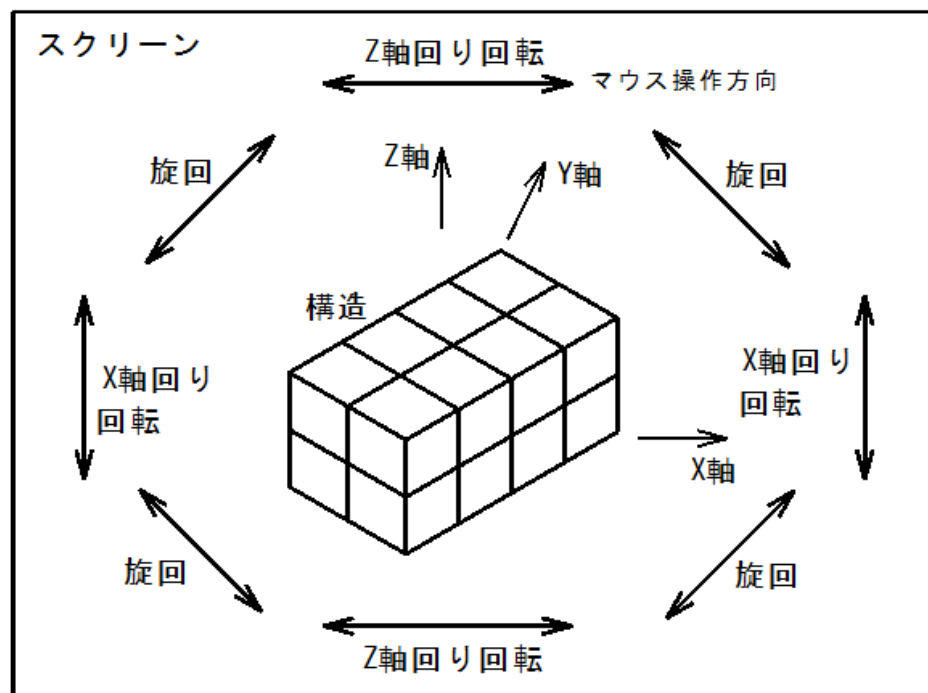


図4-16 マウスの移動方向と回転方向との関係 (Shiftキー併用)



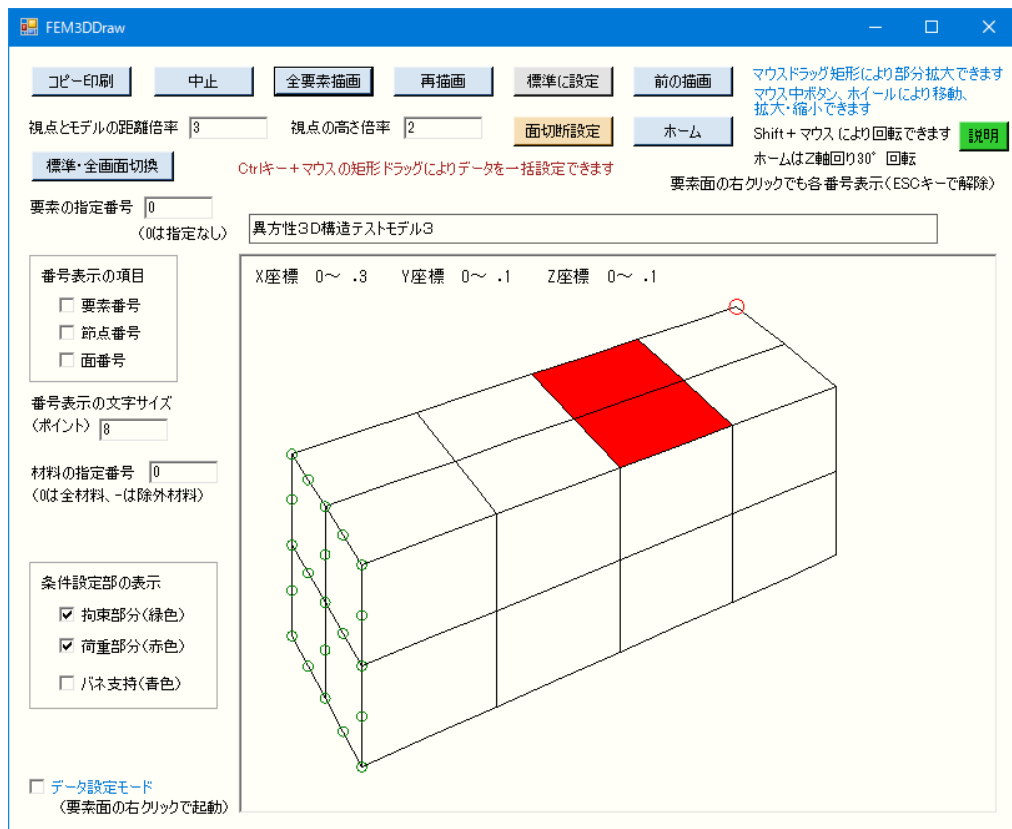


図4-19 構造作画の条件設定部の表示有りの画面例

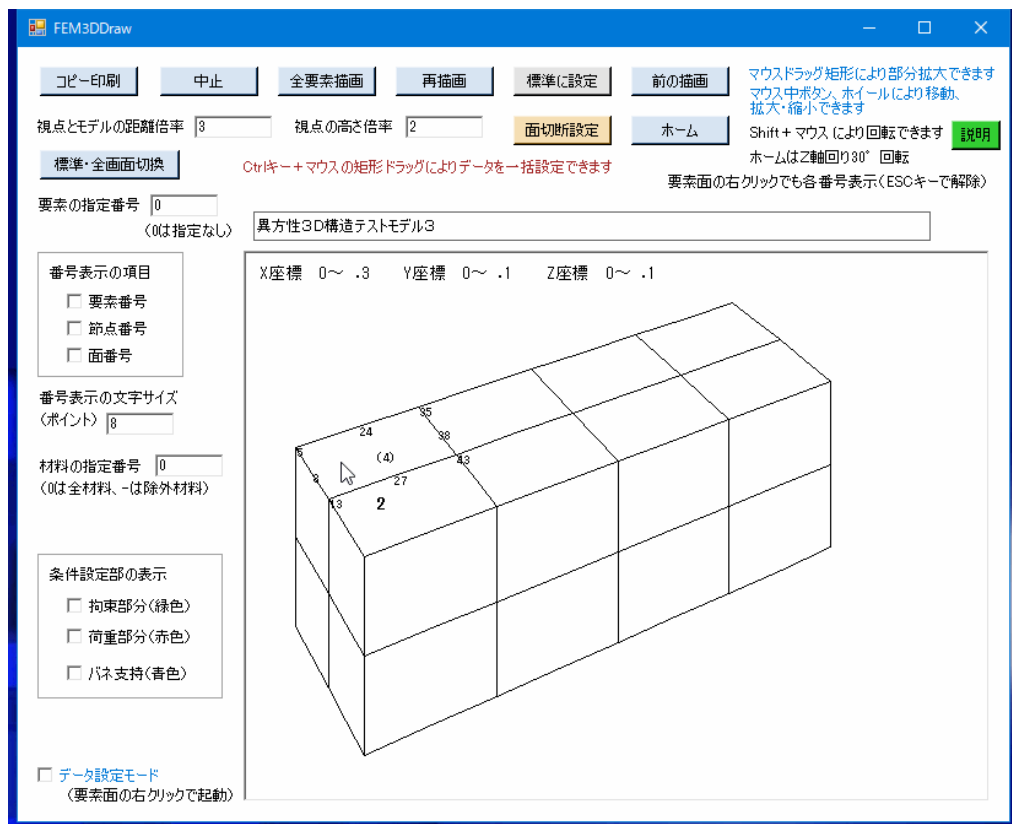


図4-20 構造作画における要素面の右クリック画面例

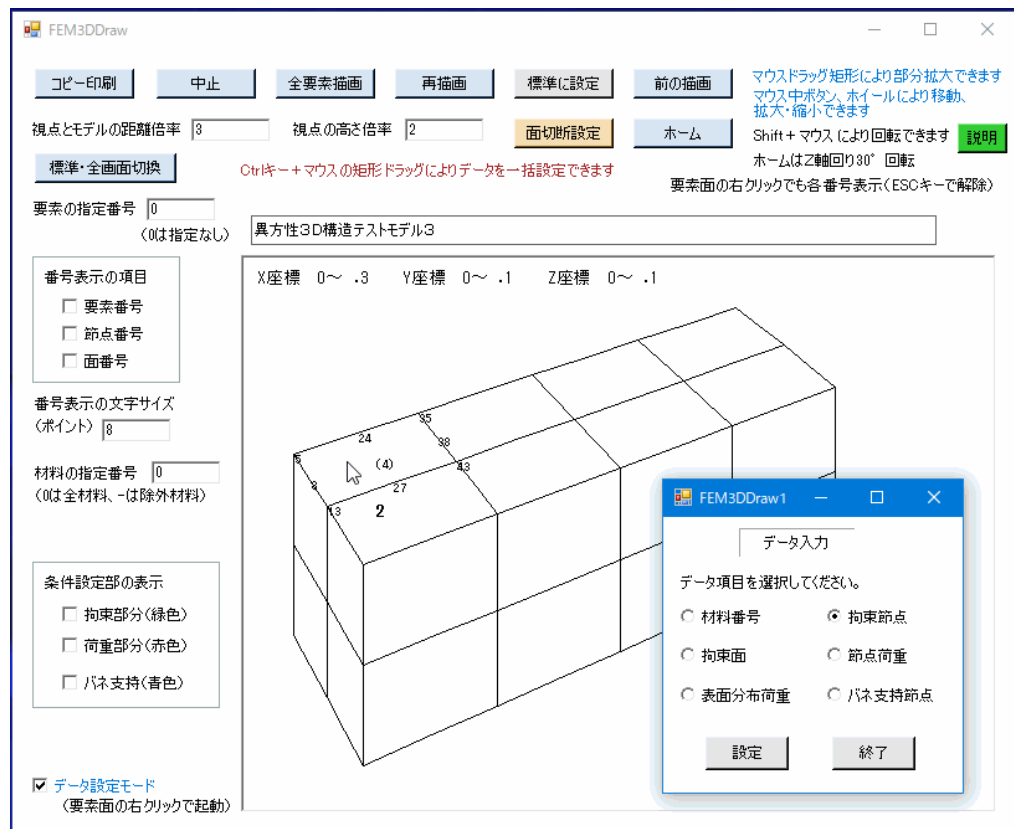


図4-21 構造作画のデータ設定モードにおけるデータ項目選択画面

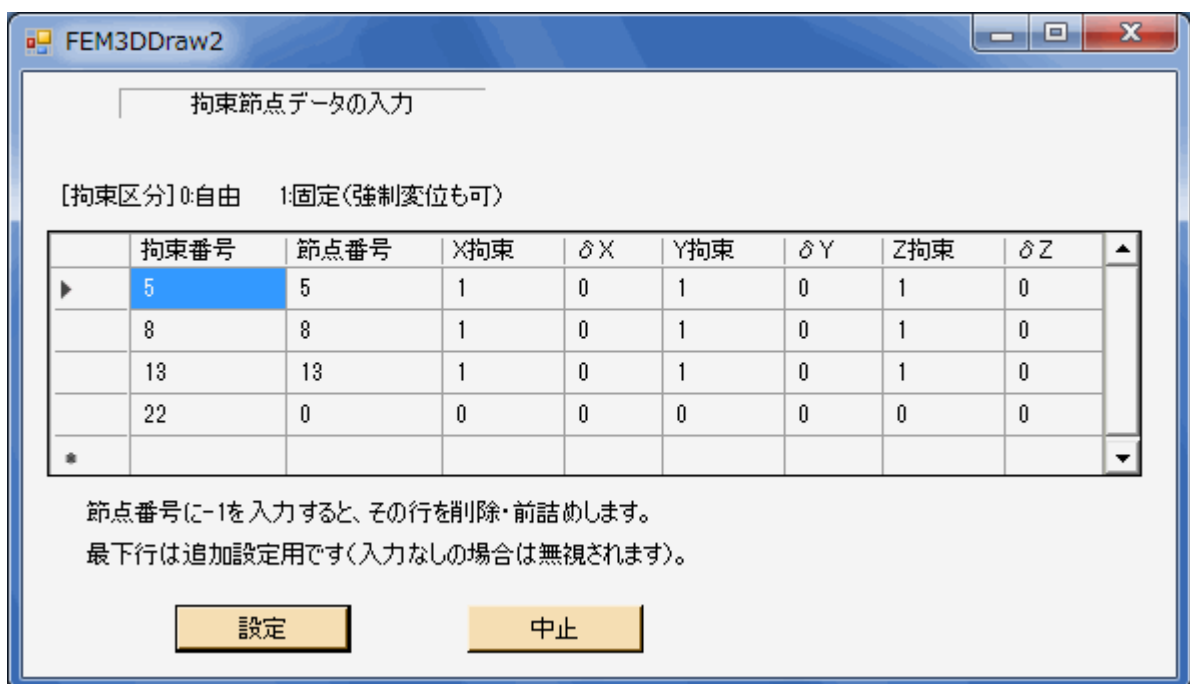


図4-22 構造作画におけるデータ入力画面例（拘束節点の場合）

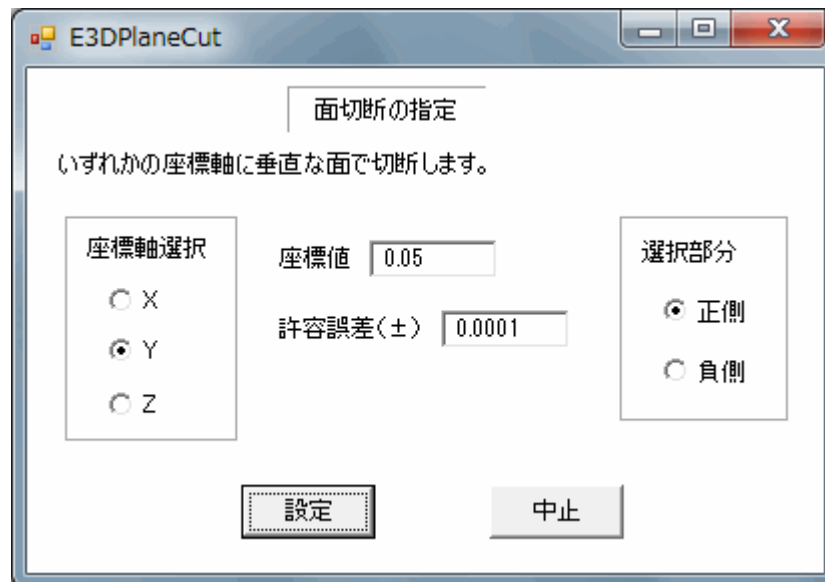


図4-23 面切断設定の画面

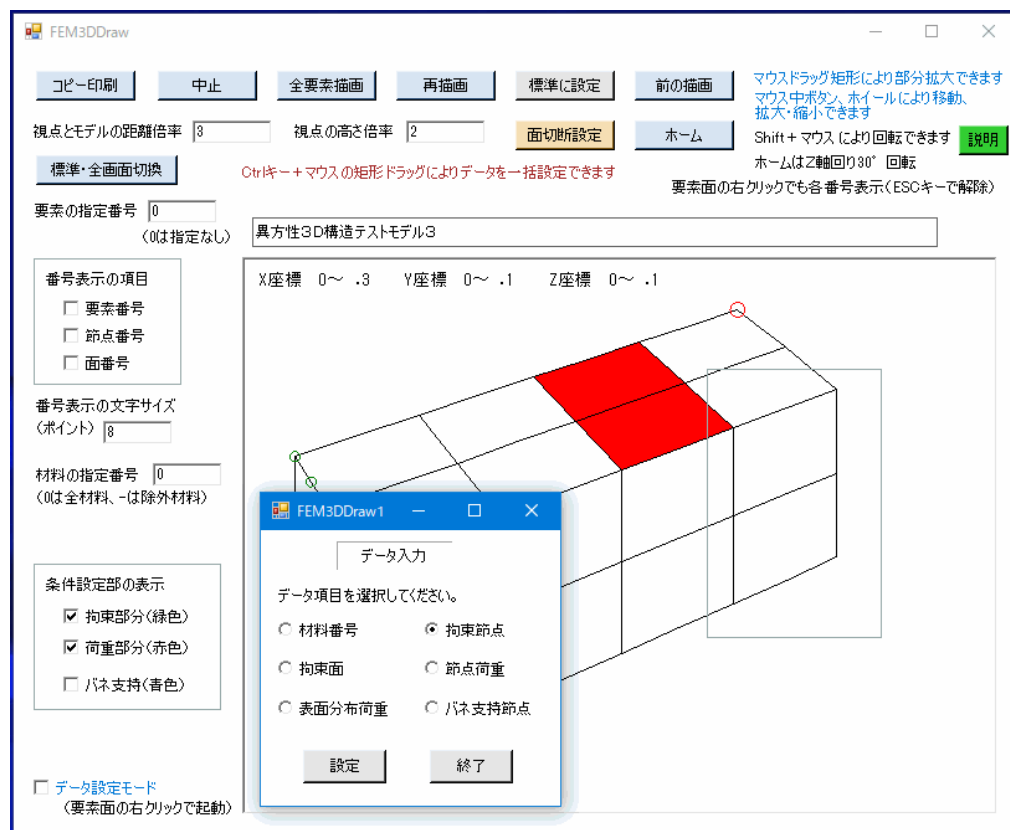


図4-24 構造作画の「Ctrlキー+マウス」ドラッグ矩形によるデータ項目選択画面

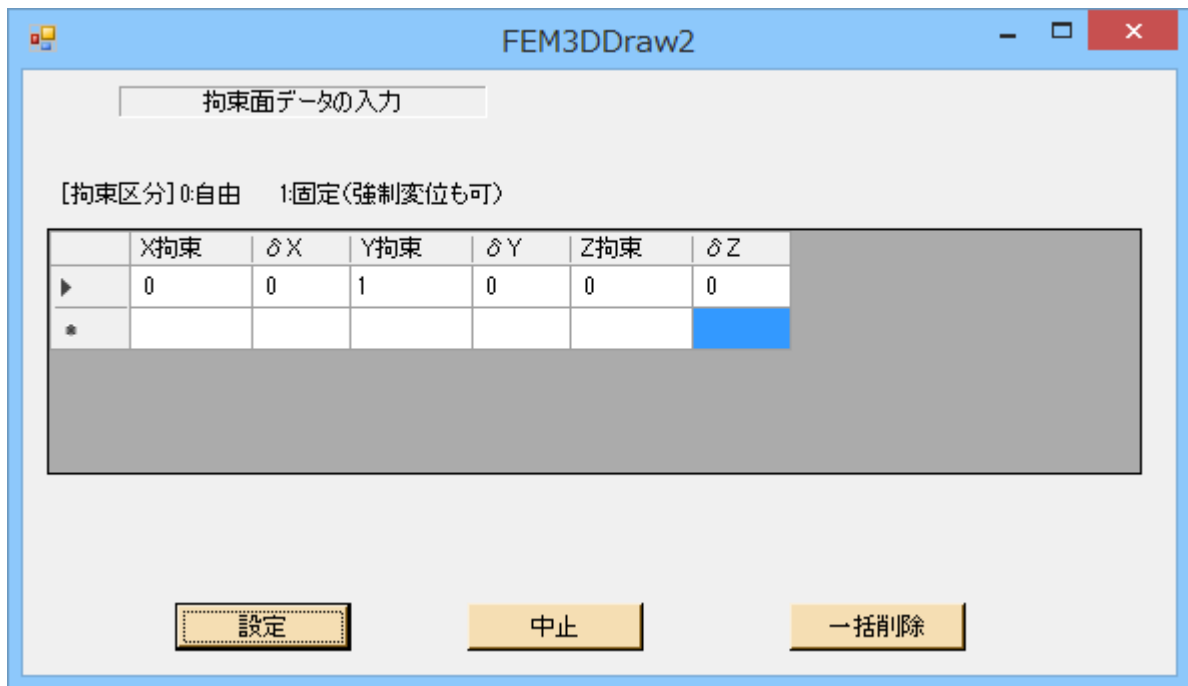


図4-25 構造作画における一括設定データ入力画面例（拘束面の場合）

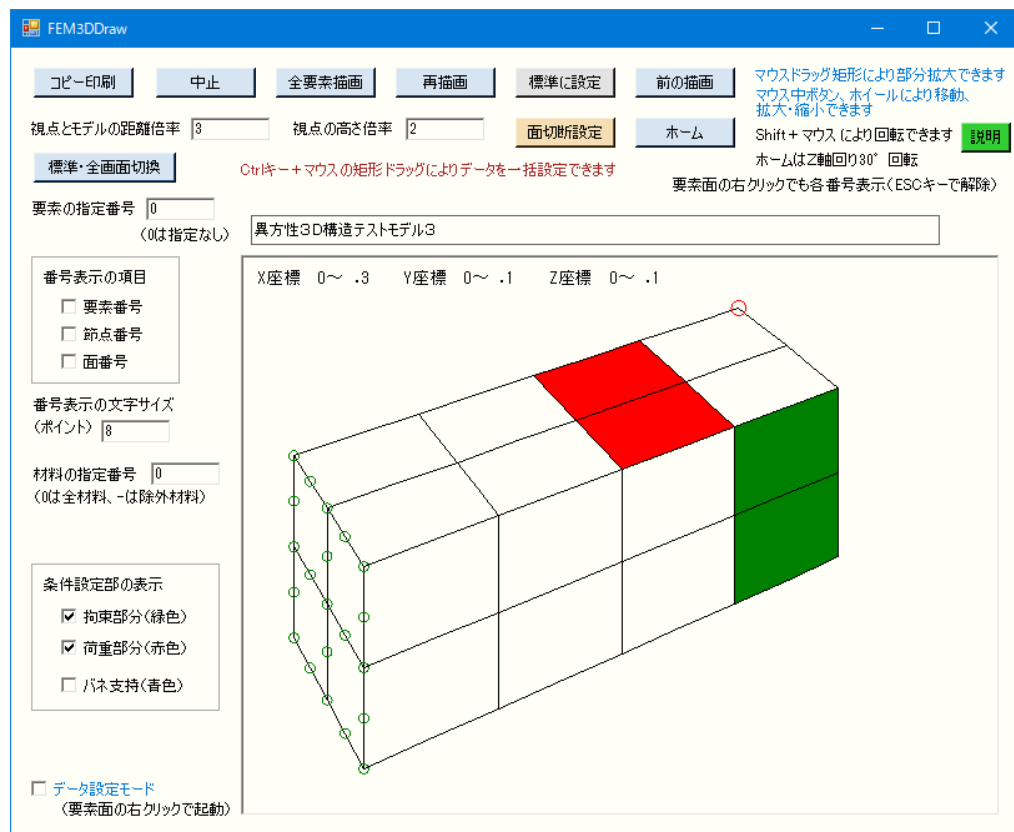


図4-26 一括設定終了後の構造作画の画面例（拘束面の場合）  
注）右側手前部に拘束面の追加表示

また、図4-27に節点間バネの構造作画の画面例を示します。同図では、「条件設定部の表示」の「バネ支持（青色）」が選択され、バネ支持の節点は、青色の二重丸で表示されています。そして、節点間バネの2節点は青色の直線で結ばれます。



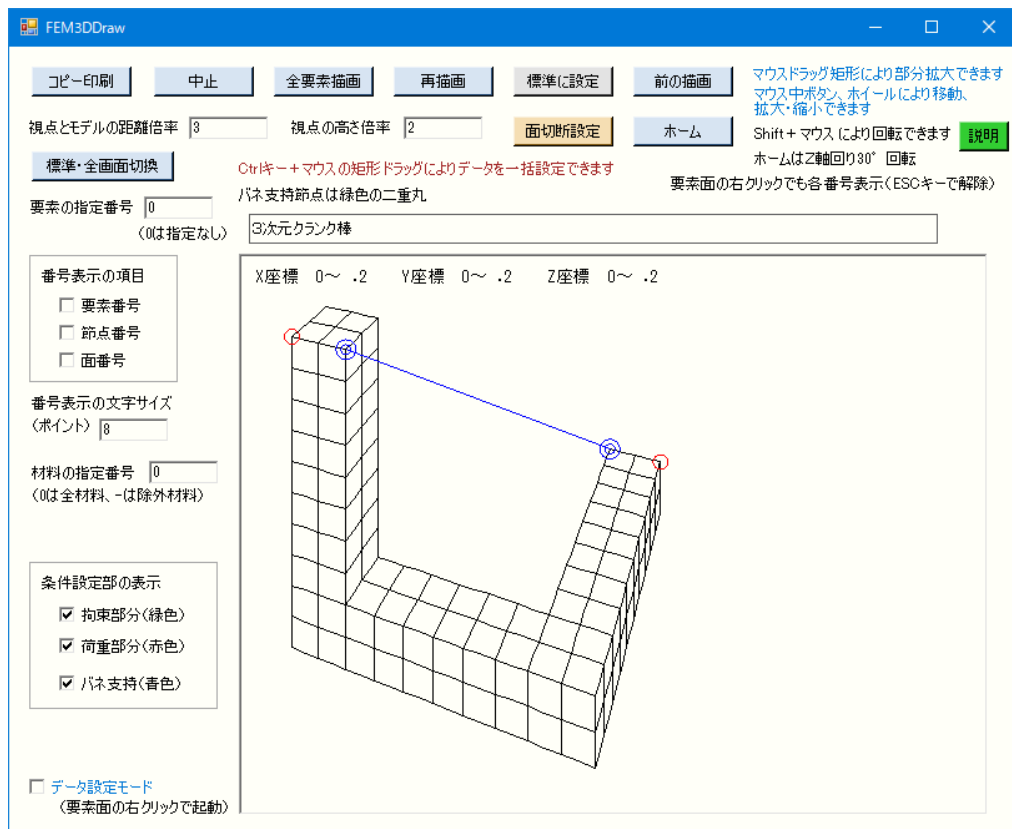


図4-27 節点間バネの構造作画の画面例

#### 4.16 構造モデルの移動

サブメニューの「構造モデルの移動」を選択すると、図4-28の移動量入力画面となります。同画面で、平行移動の各座標軸方向の移動量、および回転移動の各座標軸回りの回転角を入力します。同図に示すように、移動の順序は、Z軸回りの回転、Y軸回りの回転、X軸回りの回転、最後にX, Y, Z軸方向の平行移動となります。もし、違う順序で移動させたい場合は、「構造モデルの移動」を繰り返し実施することにより可能です。その際は、各繰り返し毎の生成データをファイルへ保存する必要はなく、最終の生成データのみをファイル保存すればよいです。

本画面の「設定」ボタンをクリックすると、移動計算が実行されます。計算が終了すると、計算終了確認ボックスが出て、入力データファイルへの保存を問うてきますので、ここで「はい」を選択すると、書き出し用のデータファイル設定画面となり、移動されたモデルのデータファイルを出力できます。また、「いいえ」を選んでも、後でサブメニュー「ファイルへ保存」により、同様にファイル出力できます。

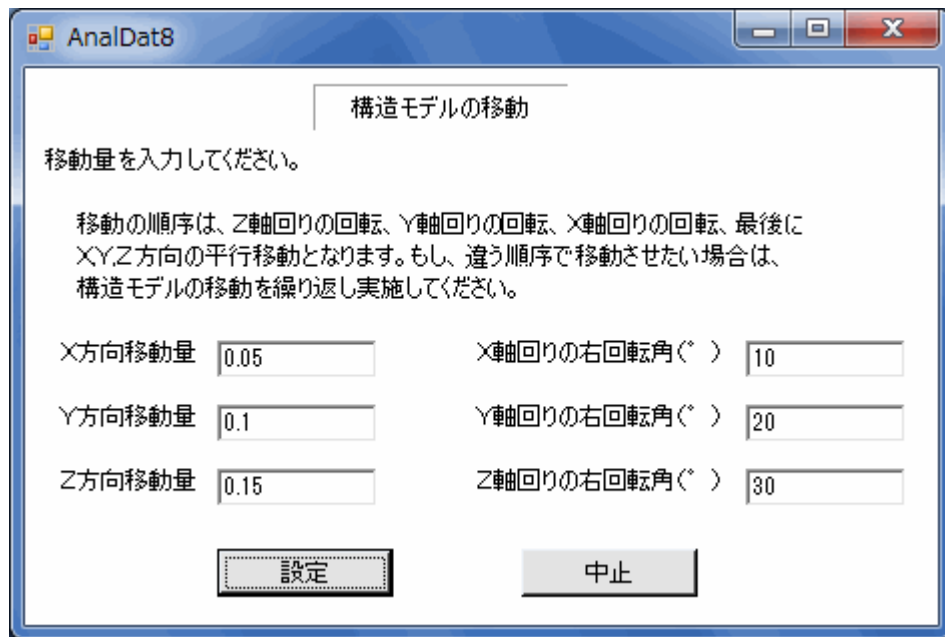


図4-28 構造モデルの移動量入力画面

#### 4.17 構造の合成

1) サブメニューの「構造の合成」を選択すると、図4-29の合成ファイル設定画面となります。

① 同画面で、ベースファイルと追加ファイルを設定します。「ベースファイル名」ボタン、または「追加ファイル名」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、それぞれの構造データファイルを選定して読み込みます。

② 合成方法として、「調整済み」、「結合点1個所指定（平行移動）」のいずれかを選択します。

◇「調整済み」とは、結合する境界について、ベース構造と追加構造とで座標値を含めて同じに設定済みということです（節点番号は別）。

◇「結合点1個所指定（回転なし）」とは、追加構造を平行移動して指定の節点どうしで結合するという事です。節点の指定は結合方法の下部に表示される結合点で行ないます（図4-30参照）。

2) 図4-30の画面で「作画」ボタンをクリックすると、図4-30のように2つの構造図が作画された画面となります。本画面により、合成する構造が間違っていないか確かめることができます。

◇結合点を指定した場合は、図4-30のように指定節点が赤丸で表示されます。

3) 本画面の「設定」ボタンをクリックすると、合成計算が実行されます。計算が終了すると、計算終了確認ボックスが出て、入力データファイルへの保存を問うてきますので、ここで「はい」を選択すると、書き出し用のデータファイル設定画面となり、合成されたモデルのデータファイルを出力できます。また、「いいえ」を選んでも、後でサブメニュー「ファイルへ保存」により、同様にファイル出力できます。

◇構造が合成されたデータでは、ベース構造の要素番号や節点番号は保持されますが、追加構造の要素番号や節点番号は自動変更されます。

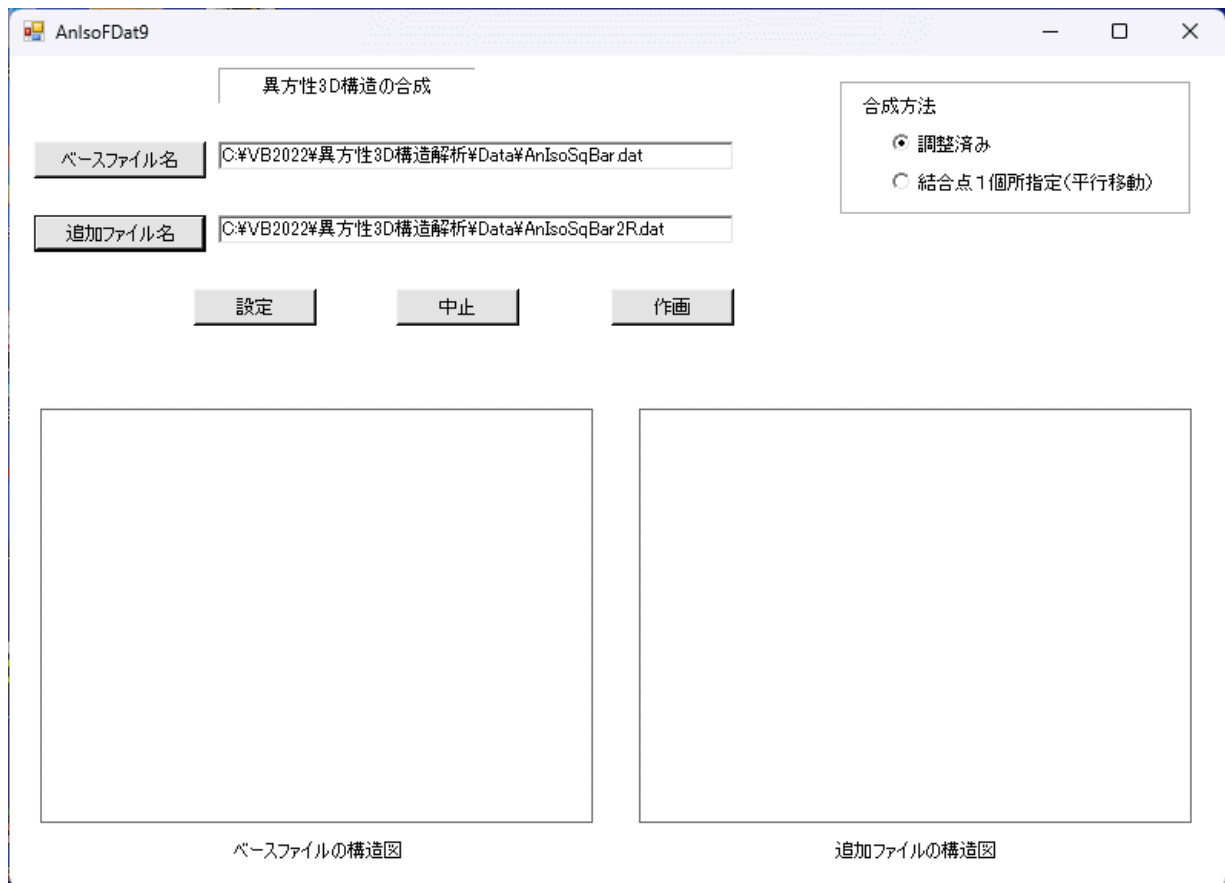


図4-29 合成ファイル設定画面（作画前）

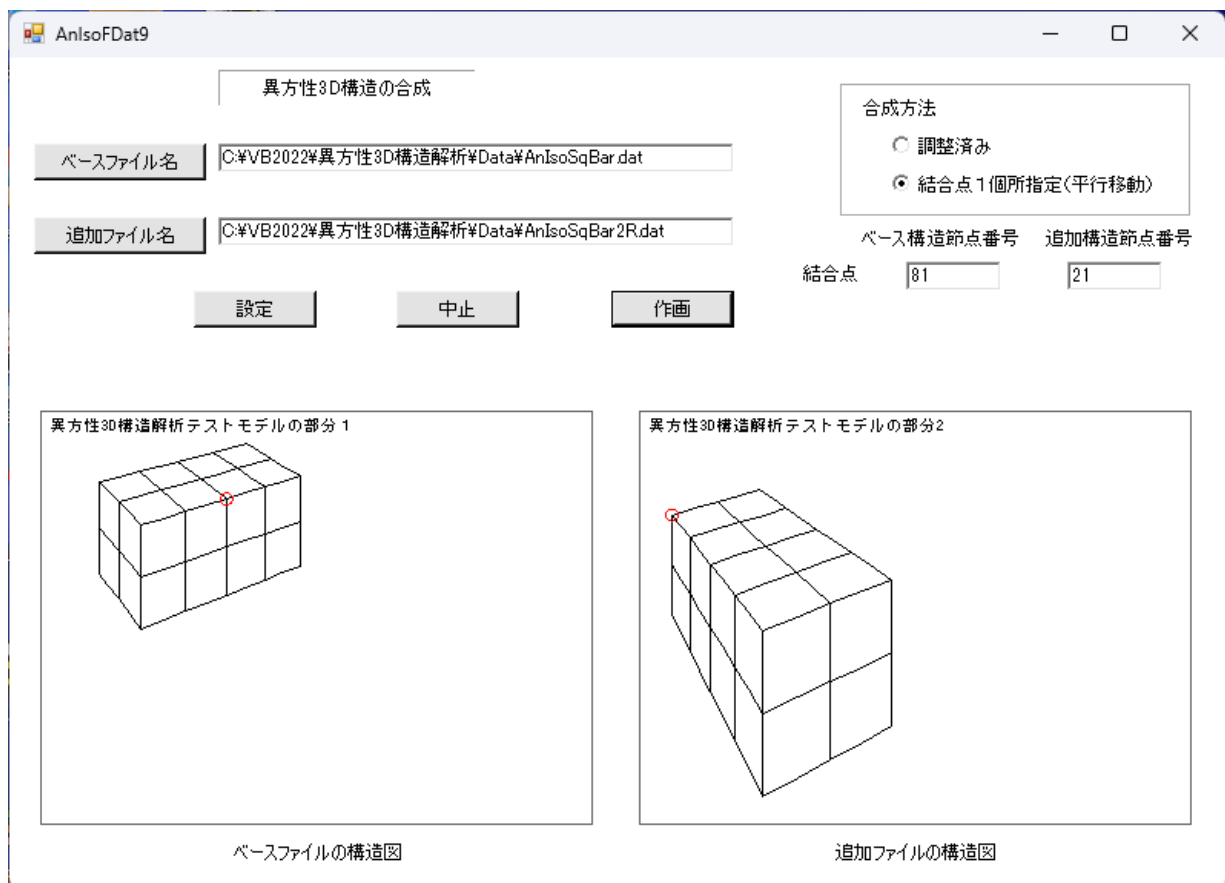


図4-30 合成ファイル設定画面（作画有り）

図4-31に構造が合成されたモデルの構造図の画面例を示します。

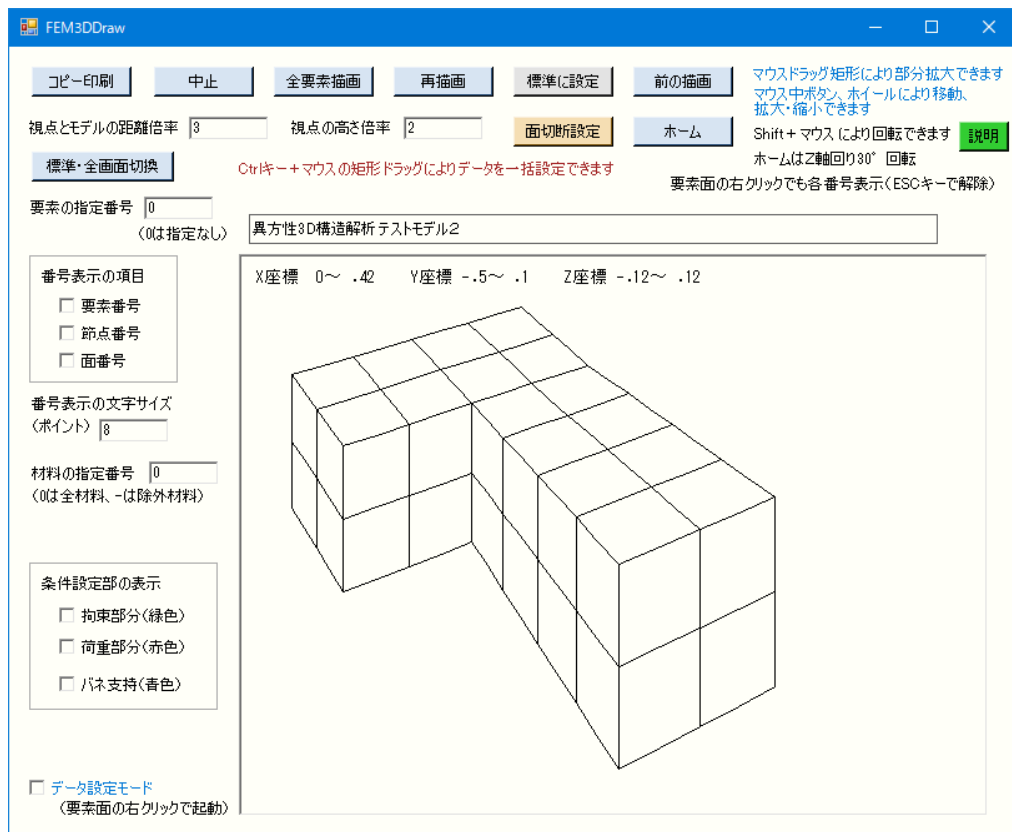


図4-31 合成されたモデルの構造図の画面例

#### 4.18 固定境界の一括設定

サブメニューの「固定境界の一括設定」を選択すると、図4-32の設定画面となります。本画面では、固定境界の節点または面を一括設定できます。固定境界の面は、要素の外面の全節点が指定条件に当てはまる面が対象となります。

- ① 先ず、境界の種類として節点か面を選択します。
- ② 次に、固定する変位 ( $\delta X$ 、 $\delta Y$ 、 $\delta Z$ ) を任意に指定します。  
◇ チェックされただけ (複数可) の変位が0に固定されます。
- ③ X座標範囲、Y座標範囲、Z座標範囲、円筒面範囲について、条件設定したい任意のものをチェック選択します。
- ④ X座標範囲、Y座標範囲、Z座標範囲をチェック選択した場合は、各座標の下限と上限を入力します。下限と上限は、コンピューター誤差等を見込んだ余裕を見て設定します。
- ⑤ 円筒面範囲をチェック選択した場合は、同画面で円筒面定義式を1つ選択します。  
そして、円筒面定義式における中心座標A、B、および半径Rの下限、上限を入力します。  
◇ Rの下限と上限は、コンピューター誤差等を見込んだ余裕を見て設定します。
- ⑥ 本画面の「設定」ボタンをクリックすると、一括設定の計算が実行されます。計算が終了すると、計算終了確認ボックスが出て、入力データファイルへの保存を問うてきますので、ここで「はい」を選択すると、書き出し用のデータファイル設定画面となり、データファイルを出力できます。また、「いいえ」を選んでも、後でサブ

メニュー「ファイルへ保存」により、同様にファイル出力できます。

- ⑦本画面の「元へ戻す（1回のみ）」ボタンをクリックすると、実施済みの一括設定を取り消すことができます。

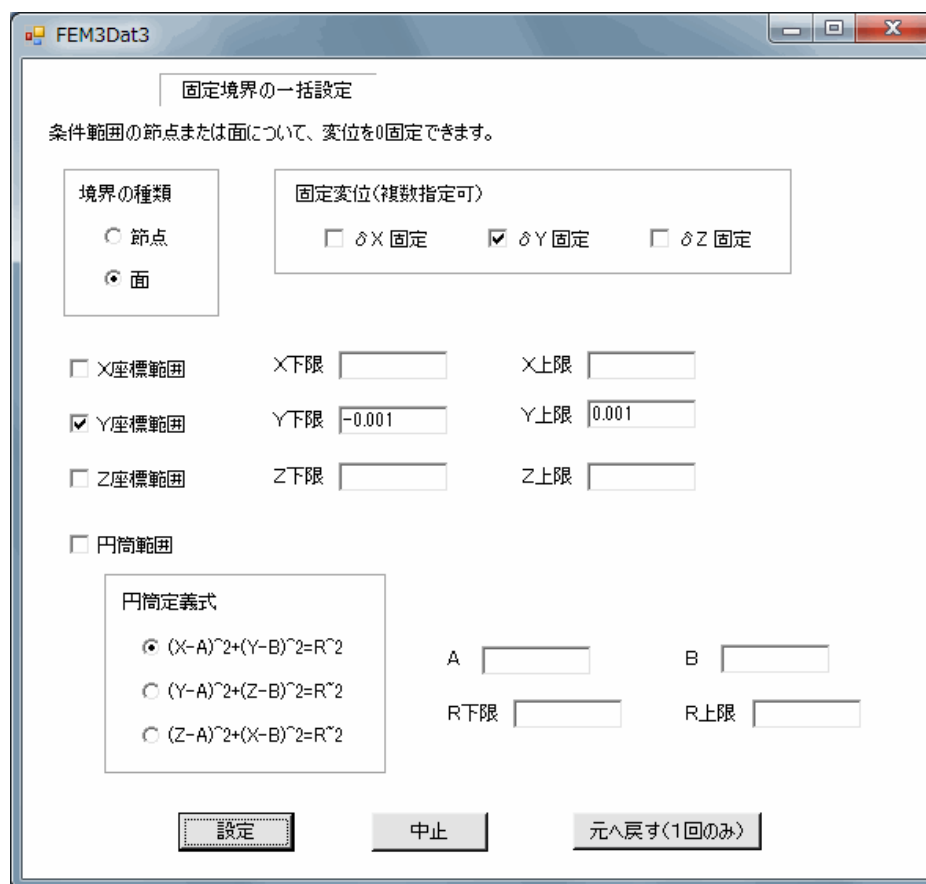


図4-32 固定境界の一括設定画面

#### 4.19 表面分布荷重の一括設定

サブメニューの「表面分布荷重の一括設定」を選択すると、図4-33の設定画面となります。ここで、表面は要素の外面面が対象で、面の全節点が指定条件に当てはまるすべての外面面に対して表面分布荷重を一括設定できるものです。

- ①X座標範囲、Y座標範囲、Z座標範囲、円筒面範囲について、条件設定したい任意のものをチェック選択します。
- ②X座標範囲、Y座標範囲、Z座標範囲をチェック選択した場合は、各座標の下限と上限を入力します。下限と上限は、コンピューター誤差等を見込んだ余裕を見て設定します。
- ③円筒面範囲をチェック選択した場合は、同画面で円筒面定義式を1つ選択します。  
そして、円筒面定義式における中心座標A、B、および半径Rの下限、上限を入力します。  
◇Rの下限と上限は、コンピューター誤差等を見込んだ余裕を見て設定します。
- ④そして、表面分布荷重（圧力）を入力します。
- ⑤本画面の「設定」ボタンをクリックすると、一括設定の計算が実行されます。計算が終了すると、計算終了確認ボックスが出て、入力データファイルへの保存を問うてきますので、ここで「はい」を選択すると、書き出し用のデータファイル設定画面と

なり、データファイルを出力できます。また、「いいえ」を選んでも、後でサブメニュー「ファイルへ保存」により、同様にファイル出力できます。

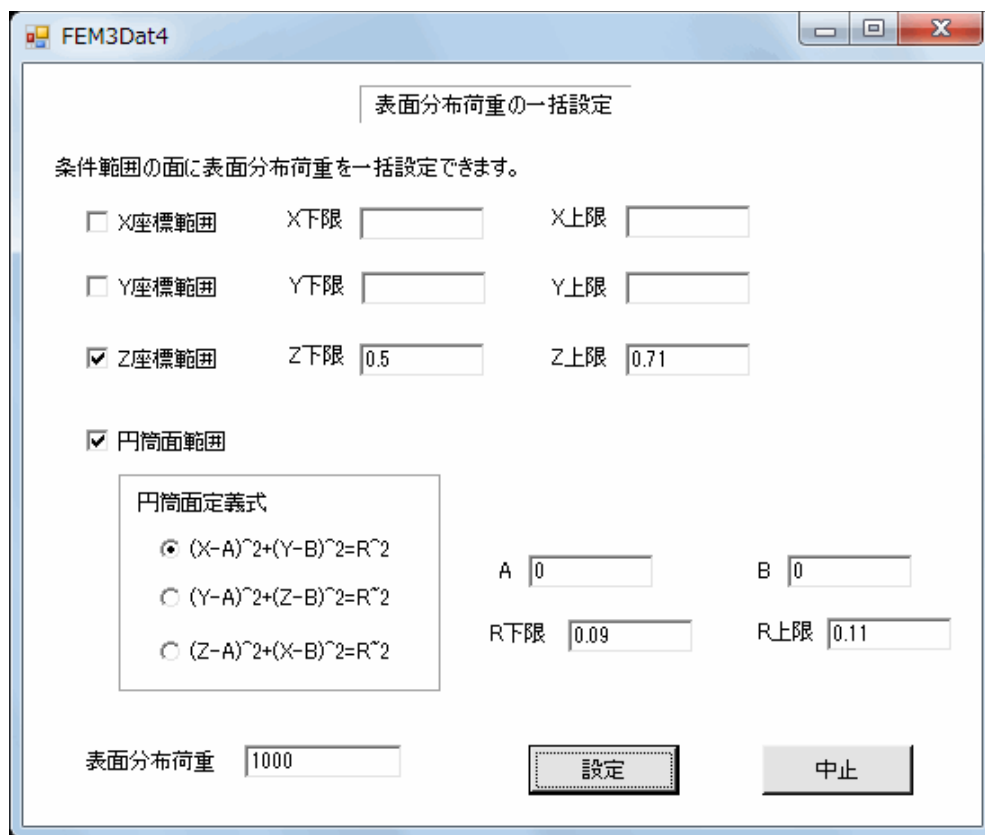


図4-33 表面分布荷重の一括設定画面

#### 4.20 データチェック

サブメニューの「データチェック」を選択すると、入力済みデータについてエラーのチェックを行なうことができます。エラーが見つかった場合は、画面にエラー内容が表示されます。ただし、検出可能なエラーは簡単な入力ミスに相当するものだけで、すべてのエラーをチェックできるわけではありません。

なお、構造解析の計算開始時にデータチェックが自動実行されます。

#### 4.21 X3Dファイルの出力

サブメニューの「X3Dファイルの出力」を選択すると、図4-34のファイル設定画面となります。同画面で、「入力ファイル指定」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、再びファイル設定画面に戻ると、「入力ファイル指定」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「.x3d」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。

本画面で「設定」ボタンをクリックすると、X3Dファイルが出力されます。

- 1) サーフェスモデルのデータが出力されます。その際、有限要素の面は三角形に再分割されます。
- 2) 出力したX3DファイルはX3Dプレーヤーで閲覧できます。

◇X3DファイルをX3Dプレーヤーで閲覧する場合、ディレクトリーパスとファイル名に日本語を入れてはいけないものもあります。

◇無料のX3Dプレーヤー例としてOctaga Playerがあり、下記URLで入手できます。

<https://www.octagavs.com/>

3) X3Dファイルは、ファイル変換ソフトにより一般の3次元CAD用に変換できます。

4) X3Dファイルは、無料の3次元CGソフトBlenderで使用できます。その場合は次のようにしてください。

①Blenderを起動し、初期オブジェクト(Cube)を削除してください。

②「File」→「Import」でX3Dを選択し、X3Dファイルを読み込んでください。

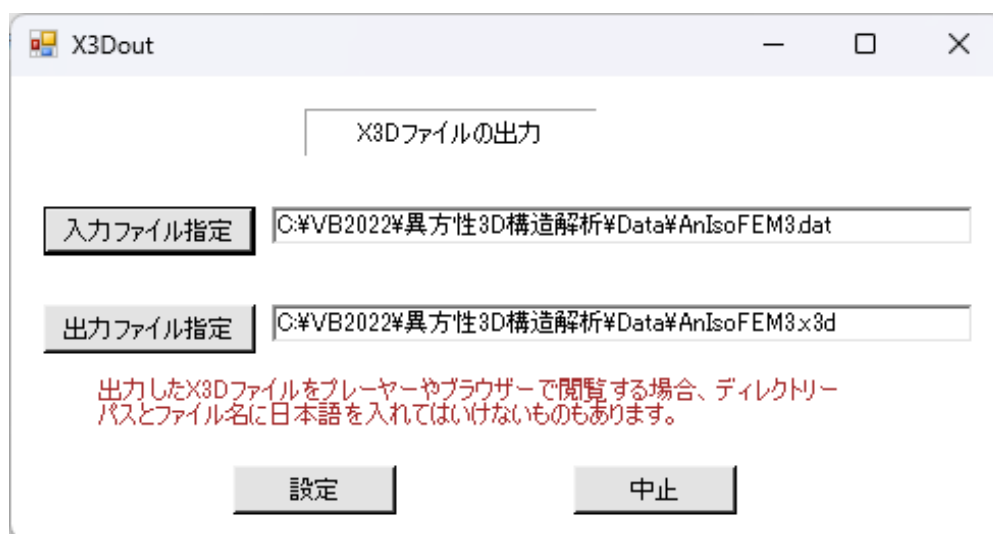


図4-34 X3Dファイル出力のファイル設定画面

#### 4.22 AnIsoThermファイルから入力

サブメニューの「AnIsoThermファイルから入力」を選択すると、「異方性3D熱伝導解析」の入力データファイルを読み込んで「異方性3D構造解析」用にデータ変換します。その後、データ修正やファイル保存が可能です。本データを保存する場合の表示ファイル名は、デフォルトでベース名（拡張子を削除した部分）の後に「F」が付加されたものとなります。もちろん、他のファイル名に変更して構いません。

#### 4.23 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。

#### 4.24 要素の削除

サブメニューの「要素の削除」を選択すると、図4-35の削除要素数入力画面となります。

①本画面で、削除要素数を入力します。

②本画面の「設定」ボタンをクリックすると、次の削除要素番号入力画面に移ります。

- ③削除要素番号の入力画面が終了すると、本画面に戻るなので、そこで「すべて確定」ボタンをクリックすると、要素の削除が実行されます。
- ◇境界条件の節点・面は、要素削除による番号変更にも自動追従します。

図4-36の削除要素番号入力画面について補足説明します。

- ①削除要素数の分だけ、削除要素番号を入力します。
- ②すべての削除要素番号を入力し終わったら、「設定」ボタンをクリックして削除要素数入力画面に戻ります。

図4-35 削除要素数の入力画面

No.	削除要素番号
1	12
2	16

図4-36 削除要素番号の入力画面

#### 4.25 平面分布荷重の換算設定

サブメニュー「平面分布荷重の換算設定」の表示画面を図4-37に示します。同図のように、下部メニューとして「矩形分布荷重」と「円形分布荷重」とがあります。この「平面分布荷重の換算設定」は、分布荷重を座標値荷重に変換するもので、メッシュ構造とは無



関係にすることができます。荷重領域をメッシュ構造から独立して設定できることにより、メッシュ生成が単純化され容易になります。これは、構造強度解析だけの利点です。

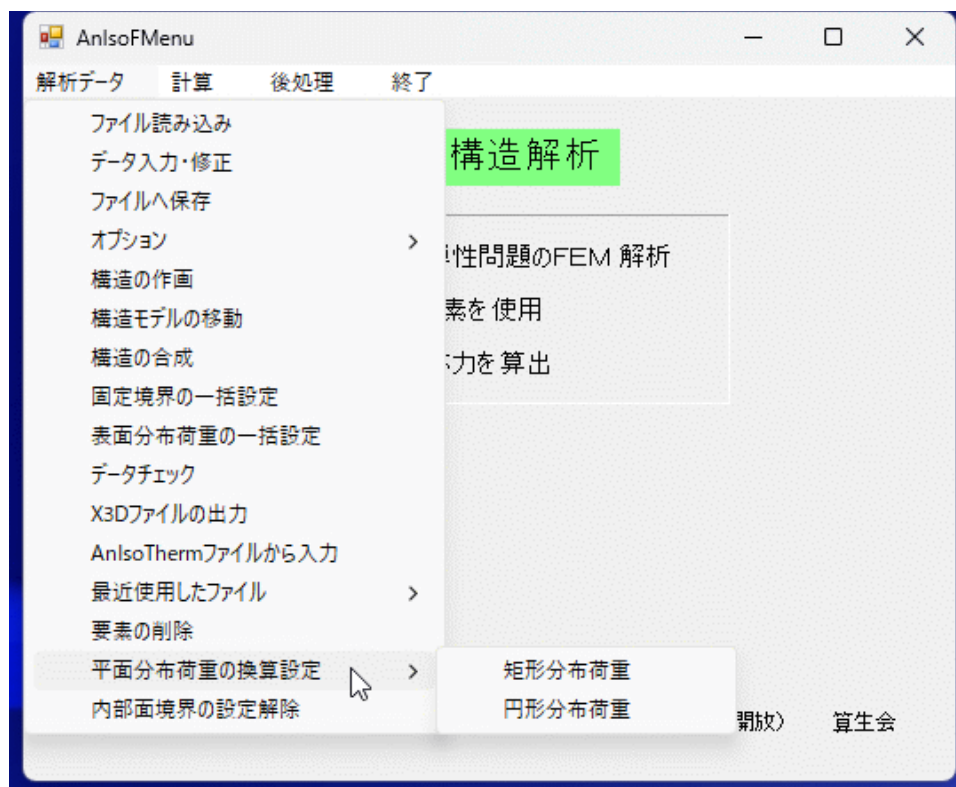


図4-37 サブメニュー「平面分布荷重の換算設定」の表示画面

例として、ディスク構造で図4-38に矩形分布荷重、図4-39に円形分布荷重の説明図を示します。ディスクだけでメッシュ生成し、矩形分布荷重や円形分布荷重をメッシュとは無関係にすることにより、構造データの作成がずっと容易になります。

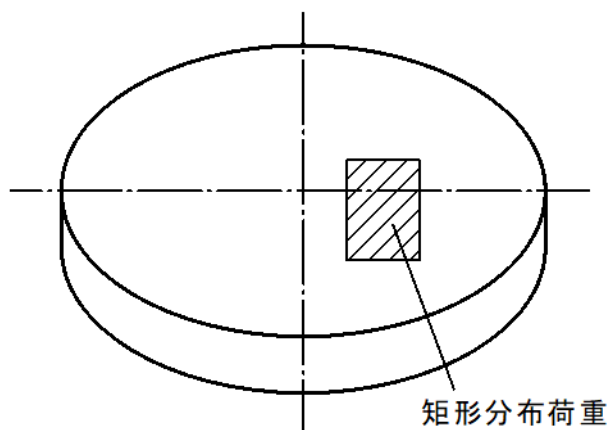


図4-38 ディスクの矩形分布荷重

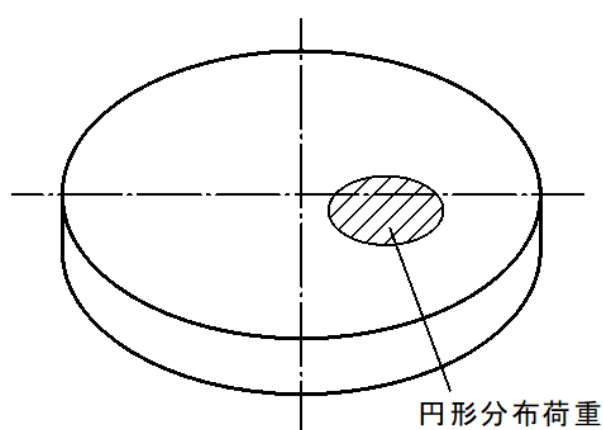


図4-39 ディスクの円形分布荷重

#### 4.26 矩形分布荷重（換算設定）

「平面分布荷重の換算設定」の下部メニュー「矩形分布荷重」を選択すると、図4-40の入力画面になります。

①矩形の3頂点A、B、Cの全体座標X, Y, Zを入力します。

②矩形の第1辺と第2辺の分割数m1, m2を入力します。

◇矩形を $m1 \times m2$ に分割し、各区分の中心に荷重が設定されます。

③全体荷重をX, Y, Z方向に入力します。

◇通常の圧力なら荷重は1方向だけですが、他方向の荷重も含め、3方向とも設定できます。

④本画面で「設定」ボタンをクリックすると、矩形分布荷重から換算された座標値荷重が設定されます。

矩形分布荷重を座標位置荷重に変換設定します。

	X座標	Y座標	Z座標
点A	.03	.02	.1
点B	.12	.02	.1
点C	.12	.08	.1

分割数 m1: 5      分割数 m2: 5

合計荷重

	X方向	Y方向	Z方向
	0	500	-10000

設定      中止

図4-40 矩形分布荷重（換算設定）の入力画面

#### 4.27 円形分布荷重（換算設定）

「平面分布荷重の換算設定」の下部メニュー「円形分布荷重」を選択すると、図4-41の入力画面になります。

①中心軸上の円周点A、Bの全体座標X, Y, Zを入力します。

②円の中心点Cの全体座標X, Y, Zを入力します。

③円周を4分割した部分の分割数mを入力します。

◇円を $m \times m$ に分割し、各区分の中心に荷重が設定されます。また、分割方法は、各区分の面積差がなるべく小さくなるように形状関数を使用します。例として、図4-42に $5 \times 5$ 分割の円形図を示します。

④全体荷重をX, Y, Z方向に入力します。

◇通常の圧力なら荷重は1方向だけですが、他方向の荷重も含め、3方向とも設定できます。

- ⑤本画面で「設定」ボタンをクリックすると、円形分布荷重から換算された座標値荷重が設定されます。

矩形分布荷重を座標位置荷重に変換設定します。

	X座標	Y座標	Z座標
点A	.23	.0	.05
点B	.18	.0	.1
点C	.18	.0	.05

分割数 m 5

合計荷重

	X方向	Y方向	Z方向
	200	10000	-400

設定 中止

図4-41 円形分布荷重（換算設定）の入力画面

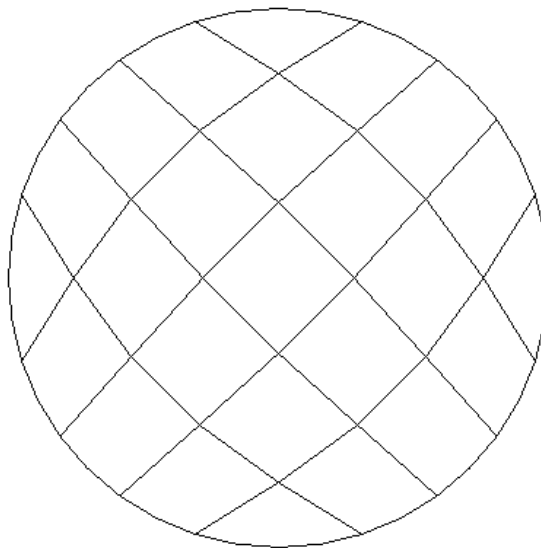


図4-42 5×5分割の円形図

#### 4.28 内部面境界の設定解除

サブメニューの「内部面境界の設定解除」を選択すると、間違って設定した内部面境界を削除できます。

◇3次元構造では内部面に境界が設定されても確認しにくいため、本機能でチェックしてください。該当する境界の有無に応じて結果メッセージが出ます。

## 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。同図に示すように、3個のサブメニューがあります。「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。また、「体積計算」は補助機能であり、5.6節で説明します。さらに、「解析計算のバッチ処理」は5.7節で説明します。

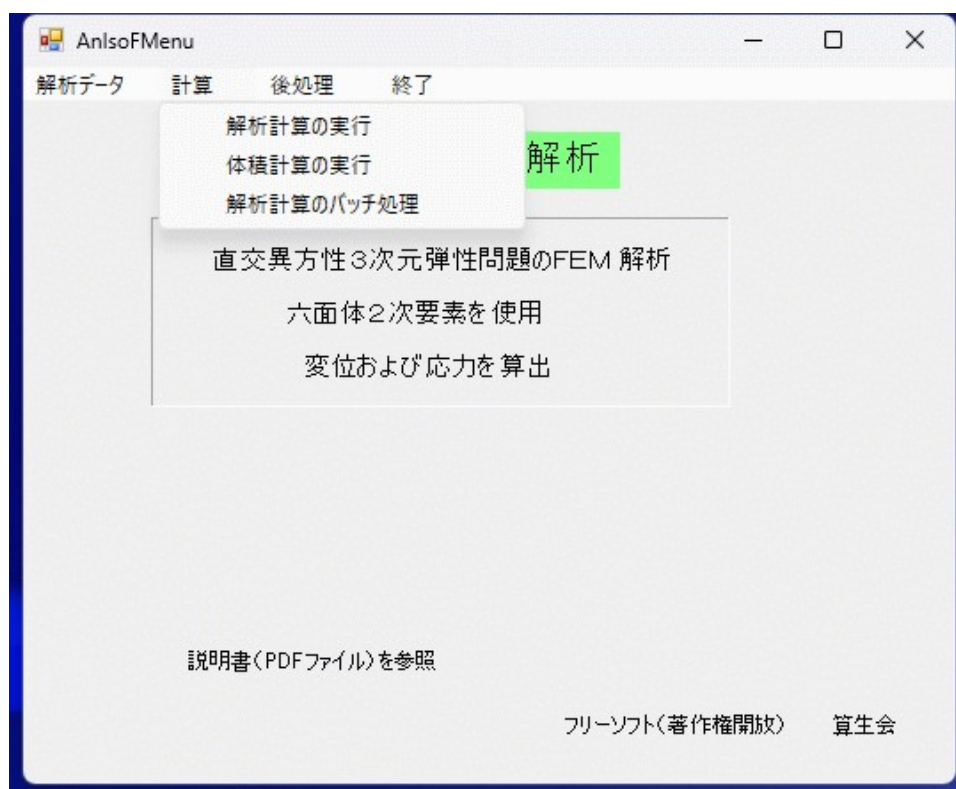


図5-1 「計算」サブメニュー画面

### 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。同画面で、「入力ファイル指定」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「計算」ファイル設定画面に戻ると、「入力ファイル指定」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。

本画面で「設定」ボタンをクリックすると、データチェックの自動実行の後、次の計算条件入力画面に移ります。

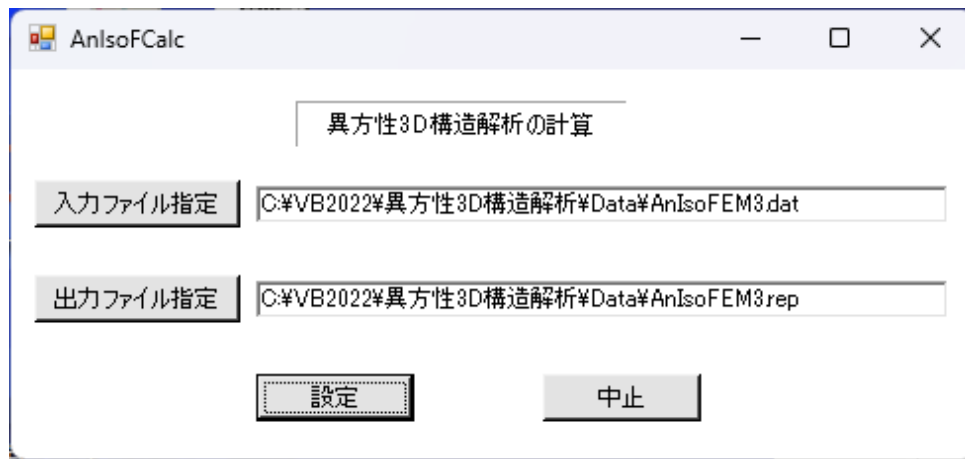


図5-2 「計算」 ファイル設定画面

### 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。

注) 「大変形」の計算は繰返し計算となるため、計算時間が大幅に増加することに注意してください。

◇図5-3の画面では、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。

注) 「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。

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

◇解析種別および構造モデルの規模に応じてソルバーを選択します。その目安を表5-1に示します。

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

注) 「反復法」は繰返し計算で収束させる解法のため、FEM行列がよくな

い場合に収束しないことがあります。

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

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

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

表5-1 ソルバー種類選択の目安

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

注) ◎：推奨    ○：可    △：欠点有り    ×：不可（非収束）

□：メモリー(RAM)不足の対策

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

2) 対角スケーリングは前処理有無のいずれの場合でも実施。

3) 前処理なしの場合は主配列が1個で、使用メモリー容量が最小。

4) 前処理有りの場合は主配列が2個で、繰り返し計算の収束性が向上。

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。

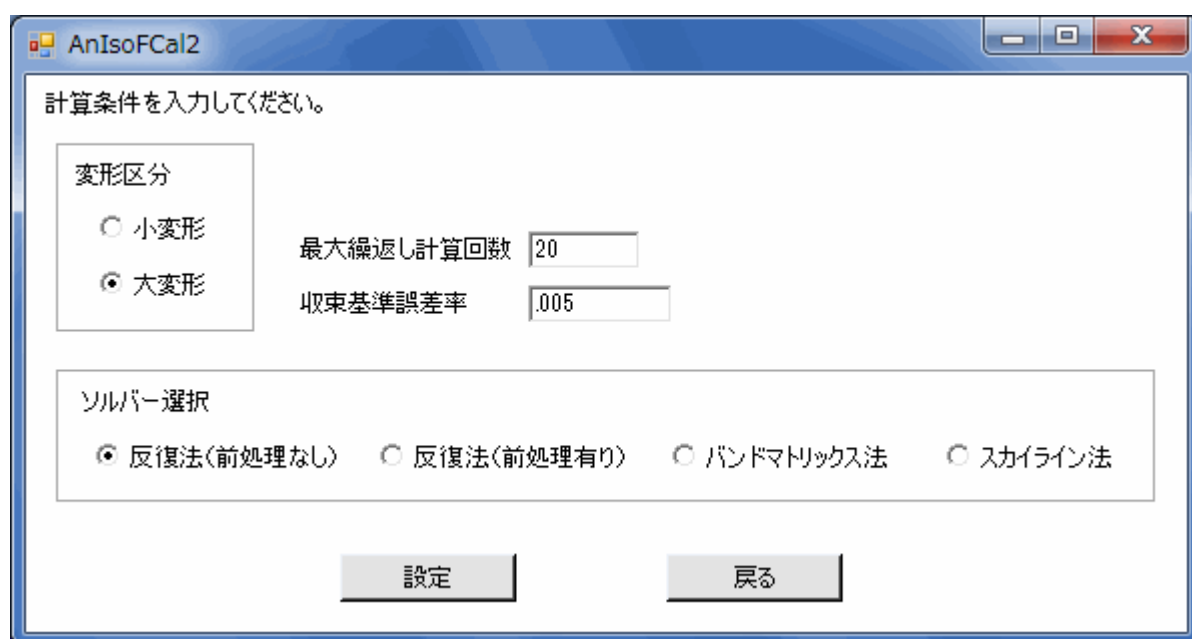


図5-3 計算条件入力画面

#### 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（本例では0s）と空きメモリー容量も表示されます。また、図5-5の計算確認ダイアログ画面では、最大値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。

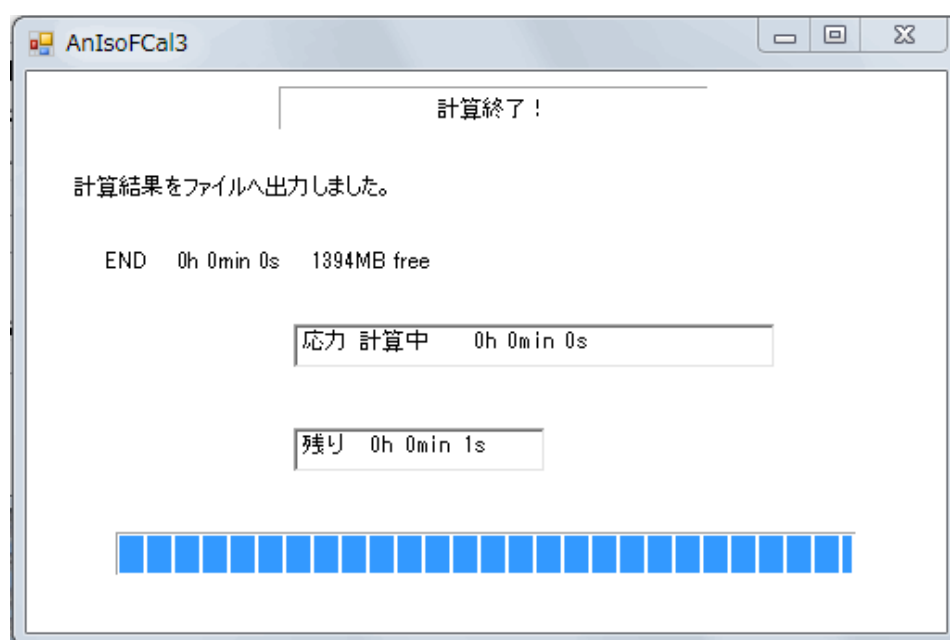


図5-4 計算終了画面

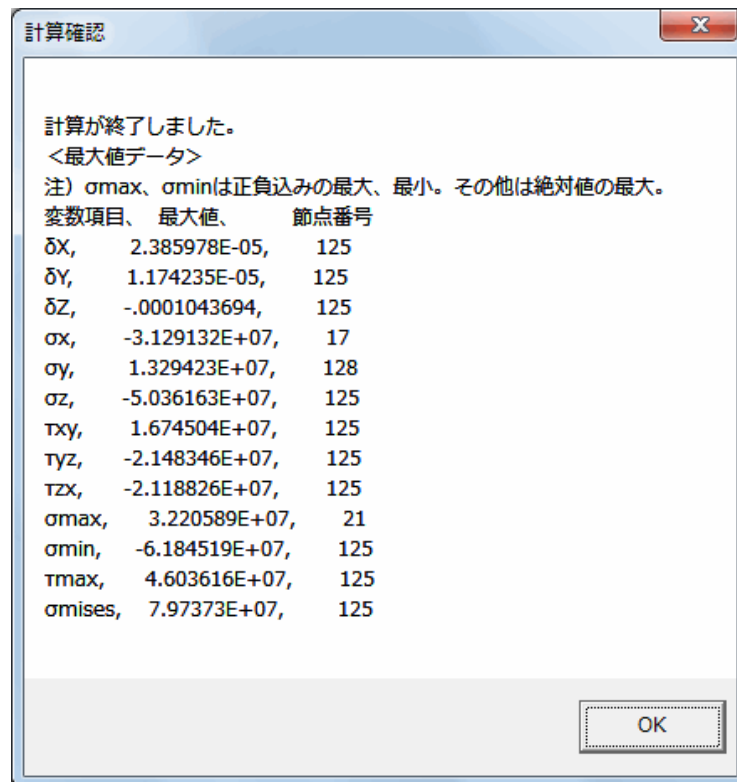


図5-6 計算確認ダイアログ画面



## 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計算結果の（ ）内にソルバー種類（反復法の前処理有無を含む）が出力されています。

②計算マトリックスの変数個数、ハーフバンド幅、保存インデックス数（1個）が、それぞれ360、123、17622と出力されています。

◇このインデックス数は、FEMの主配列の要素数です（反復法では1次元配列）。そのメモリー使用量は、インデックス数に8バイトを掛けたものです。本例は反復法で前処理なしの場合のため、このインデックス数を持つ配列は1つだけです。もし反復法で前処理有りの場合は、このインデックス数を持つ配列が2つ使用されます。

③変位の出力では、すべての節点について、各変位（ $\delta X$ 、 $\delta Y$ 、 $\delta Z$ ）が出力されています。

④本例では、節点125における下向き変位（Z方向で－符号） $1.044 \times 10^{-4} \text{m}$ が最大の変位となっています。

⑤次に、節点応力が出力されています。

⑥出力変数の順序を示しています。

◇ $\sigma$ の符号は、引張が正で、圧縮が負です。

◇ $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$ 、 $\tau_{\max}$ はすべての応力についてのものです。

◇ $\sigma_{\text{mises}}$ はMises応力です。

⑦本行以下に各節点毎に応力を出力しています。

⑧拘束節点の反力が出力されています。

⑨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。

⑩最後に計算時間（本例では0s）と空きメモリー容量も出力されます。

<<異方性3D構造解析の計算結果>>

異方性3D構造テストモデル3

[入力データファイル], C:\¥VB2022¥異方性3D構造解析¥Data¥AnIsoFEM3. dat

\*\*\* 計算結果 (反復法、前処理なし) \*\*\*

計算マトリックスの変数個数、ハーフバンド幅、保存インデックス数 (1 個)

360, 123, 17622

\*\*\* 変位の出力 \*\*\*

<節点番号、 $\delta X$ 、 $\delta Y$ 、 $\delta Z$ >

1, 0, 0, 0  
2, 0, 0, 0  
3, 0, 0, 0  
4, 0, 0, 0  
5, 0, 0, 0  
6, 0, 0, 0  
7, 0, 0, 0  
8, 0, 0, 0  
9, 0, 0, 0  
10, 0, 0, 0

.....  
.....

122, -7.425676E-06, -3.182514E-06, -7.921963E-05  
123, 5.624046E-07, -6.068856E-07, -7.946202E-05  
124, 9.116678E-06, 1.898314E-06, -8.92702E-05  
125, 2.385978E-05, 1.174235E-05, -.0001043694  
126, -1.576205E-05, -6.143848E-06, -7.633535E-05  
127, 1.121436E-07, -6.690062E-07, -7.747526E-05  
128, 2.009176E-05, 8.840216E-06, -8.335477E-05  
129, -1.579532E-05, -6.159074E-06, -7.327071E-05  
130, -7.837905E-06, -3.272865E-06, -7.328908E-05  
131, 6.565113E-08, -4.287908E-07, -7.33986E-05  
132, 8.154522E-06, 2.628487E-06, -7.376706E-05  
133, 1.61508E-05, 6.50022E-06, -7.291338E-05  
134, -1.579441E-05, -6.128791E-06, -7.005054E-05  
135, 6.193715E-08, -3.520398E-07, -7.011568E-05  
136, 1.58551E-05, 6.267992E-06, -6.97034E-05  
137, -1.579509E-05, -6.131613E-06, -6.710008E-05  
138, -7.980063E-06, -3.200303E-06, -6.709596E-05  
139, -1.018824E-07, -3.556722E-07, -6.697312E-05  
140, 7.954526E-06, 2.96908E-06, -6.681933E-05  
141, 1.602253E-05, 6.25642E-06, -6.714331E-05

\*\*\* 節点応力の出力 \*\*\*

<節点番号、 $\sigma X$ 、 $\sigma Y$ 、 $\sigma Z$ 、 $\tau xy$ 、 $\tau yz$ 、 $\tau zx$ 、 $\sigma max$ 、 $\sigma min$ 、 $\tau max$ 、 $\sigma mises$ >

1, -2.96351E+07, -3830394, -9273582, 180988.8, .3876396, -5793928, -3835945,  
-3.116945E+07, 1.366675E+07, 2.560974E+07  
2, -1.29534E+07, -1674249, -4053445, 89553.54, .1133446, -2654794, -1677059,  
-1.368576E+07, 6004349, 1.127884E+07

図5-6 (1/2) 結果ファイルへの出力例

3,	-31688.41,	-4095.77,	-9916.063,	-6154.77,	.5482986,	-647668.8,	626987.4,
-668591.4,	647789.4,	1122129					
4,	1.292151E+07,	1670128,	4043469,	-98745.88,	.114246,	-2646008,	
1.365106E+07,	1685119,	5982970,	1.124973E+07				
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
138,	290194.2,	190714.2,	283877.7,	241578.2,	-5957.988,	-325324.1,	
680800.9,	-134949.4,	407875.2,	708520.8				
139,	65744.95,	423168.3,	866847.3,	428328.1,	-4.341842,	200275.3,	
943275.9,	-244937.7,	594106.8,	1074202				
140,	-1235116,	-1582164,	-767016.6,	-224173.2,	381886.3,	-295797.8,	-
451366.5,	-1757202,	652917.8,	1163088				
141,	-1272446,	-1050411,	-2062778,	-1136707,	1736273,	-1246831,	1320296,
3435286,	2377791,	4293415					
-----							
* * 拘束境界の節点反力 * *							⑧
<節点番号、Fx、Fy、Fz>							
1,	10.72827,	-583.1923,	1724.707				
2,	7179.312,	-209.9087,	-1397.177				
3,	-3.097412,	-6.151474,	1633.159				
4,	-7196.084,	214.3732,	-1441.346				
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
18,	8808.805,	1511.49,	-2913.371				
19,	1.895874,	-.9385834,	1808.008				
20,	-8826.668,	-1512.197,	-2920.268				
21,	-131.4557,	-384.8983,	2007.345				
-----							
<最大値データ>							⑨
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					
$\delta X$ ,	2.385978E-05,	125					
$\delta Y$ ,	1.174235E-05,	125					
$\delta Z$ ,	-.0001043694,	125					
$\sigma x$ ,	-3.129132E+07,	17					
$\sigma y$ ,	1.329423E+07,	128					
$\sigma z$ ,	-5.036163E+07,	125					
$\tau xy$ ,	1.674504E+07,	125					
$\tau yz$ ,	-2.148346E+07,	125					
$\tau zx$ ,	-2.118826E+07,	125					
$\sigma_{max}$ ,	3.220589E+07,	21					
$\sigma_{min}$ ,	-6.184519E+07,	125					
$\tau_{max}$ ,	4.603616E+07,	125					
$\sigma_{mises}$ ,	7.97373E+07,	125					
END	0h 0min 0s	5588MB free					⑩

図5-6 (2/2) 結果ファイルへの出力例

## 5.6 体積計算

サブメニュー「体積計算の実行」をクリックすると、図5-7の画面に移ります。同図ではテスト用構造モデルで材料を2種類に変更したデータを使用しています。

- ①「入力ファイル指定」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、本画面に戻ると、「入力ファイル指定」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」の方にはベース名に「-Vol」が加わった名前が付き、拡張子を「.rep」に変更したファイル名が表示されます。また、テキストボックス他のファイル名に変更も可能です。
- ②本画面で「設定」ボタンをクリックすると、計算が実行されます。

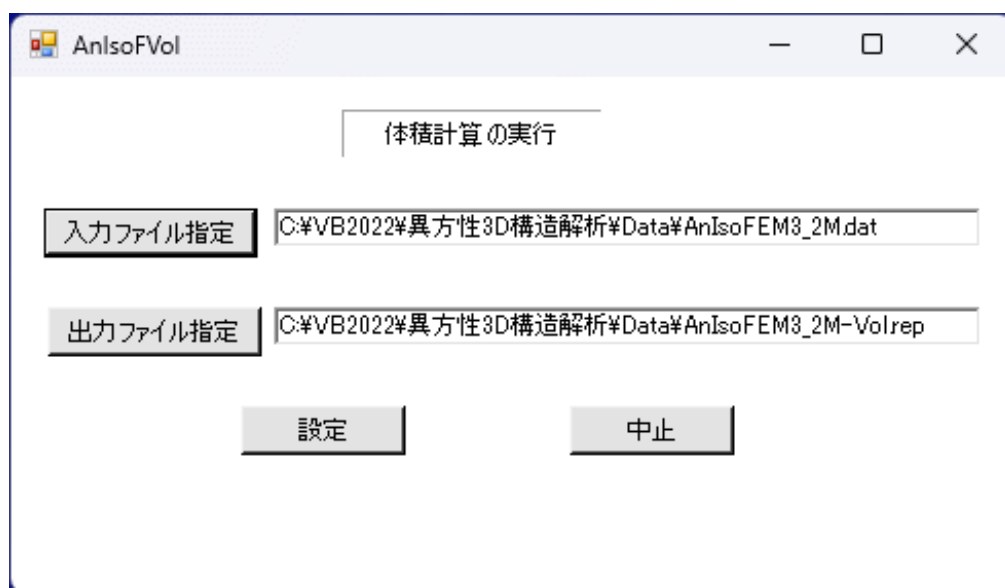


図5-7 体積計算の実行画面

図5-8に計算終了画面を示します。同図のように、材料番号毎に体積が表示されます。

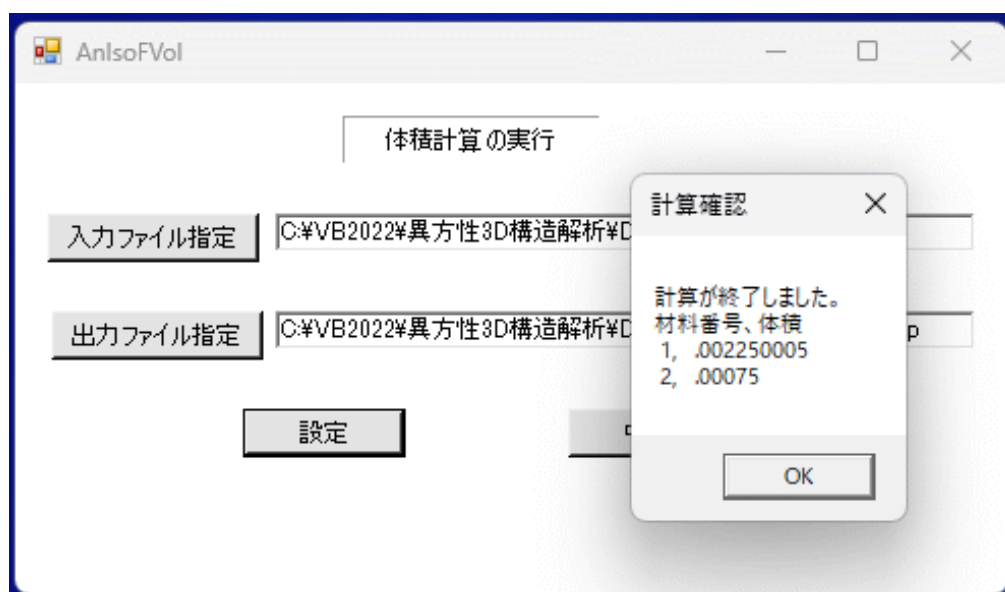


図5-8 体積計算の終了画面

さらに、上記の「出力ファイル指定」のファイルに計算結果が出力されます。図5-9に計算結果例を示します。同図で○印を付した数字の部分について補足説明します。

①材料番号、体積、重量が出力されています。

◇比重量が入力されている場合（自重有り）のみ、重量が出力されます。

②材料数が2以上の場合のみ、合計が出力されます。

③重心の座標が出力されています。

◇材料数が2以上の場合は、比重量が入力されている場合（自重有り）のみ、重心の座標が出力されます。

注）対称構造の部分だけを取り上げた構造データでは、対称を考慮せずに計算します。

```
<<体積の計算結果>>
異方性3D構造テストモデル3
[入力データファイル] , C:\¥VB2022¥異方性3D構造解析¥Data¥AnIsoFEM3_2M.dat
-----
材料番号、体積、重量                                ①
1,      .002250005,    175.5004
2,      .00075,       54.525
合計,    .003000005,    230.0254                    ②
重心のX座標、Y座標、Z座標                          ③
.1480557, .04999989, .04999991
END
```

図5-9 体積計算の結果ファイルへの出力例

## 5.7 バッチ処理

バッチ処理は1つのディレクトリーに入っている入力データファイル（.dat）について、順次すべての解析計算を行なうものです。従って、あらかじめバッチ処理用のディレクトリーを作成し、対象の入力データファイル一式を入れておかねばなりません。ただし、構造解析AnIsoFEM以外の入力データファイルがあってはなりません。

◇入力データファイルの拡張子は「.dat」に限定されます。また、計算結果データファイルの拡張子はすべて「.rep」になります。

◇構造解析AnIsoFEM以外の入力データファイルが混ざっているとエラーになります。

サブメニュー「解析計算のバッチ処理」をクリックすると、図5-10の画面に移ります。

①「入力ファイルのディレクトリー指定」ボタンをクリックすると、コモンダイアログ入力データファイルを1つ選定できます。そして、本画面に戻ると、テキストボックスにそのディレクトリー名が表示されます。

◇テキストボックスにディレクトリー名（フルパス）を直接入力しても構いません。

②本画面で「実行」ボタンをクリックすると、計算条件入力画面に移るので、そこで計算条件を設定します。その計算条件設定は最初の1ケースだけで、後のケースは同じ計算条件になります。

◇計算条件の異なるケースは実行できませんので注意してください。

③バッチ処理が完了すると、図5-11の終了画面になります。

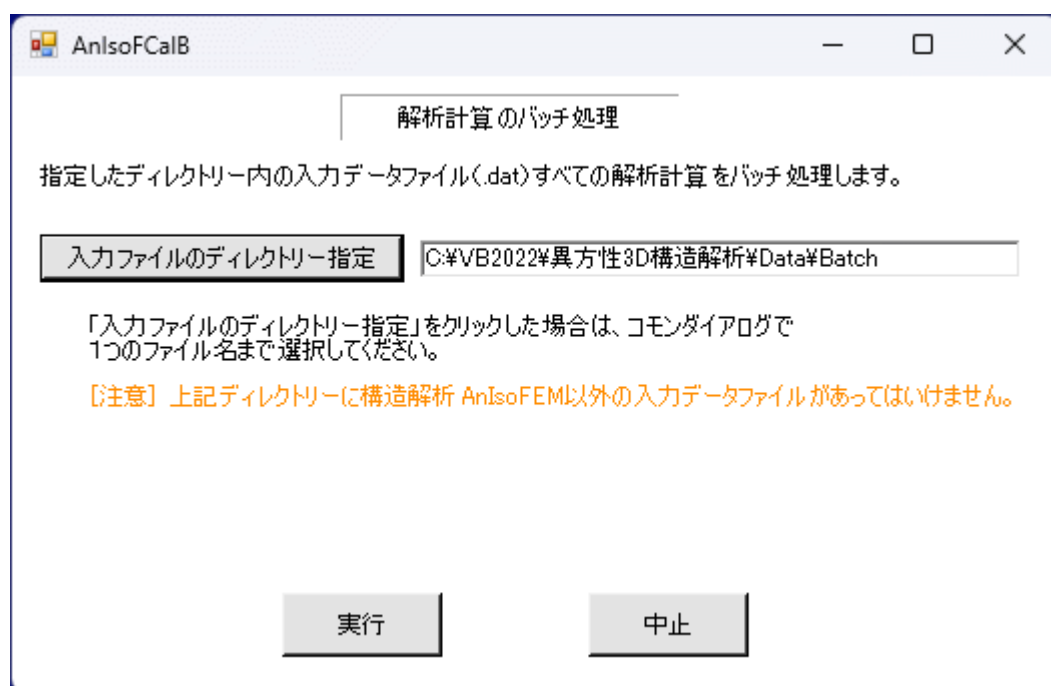


図5-10 バッチ処理の実行画面

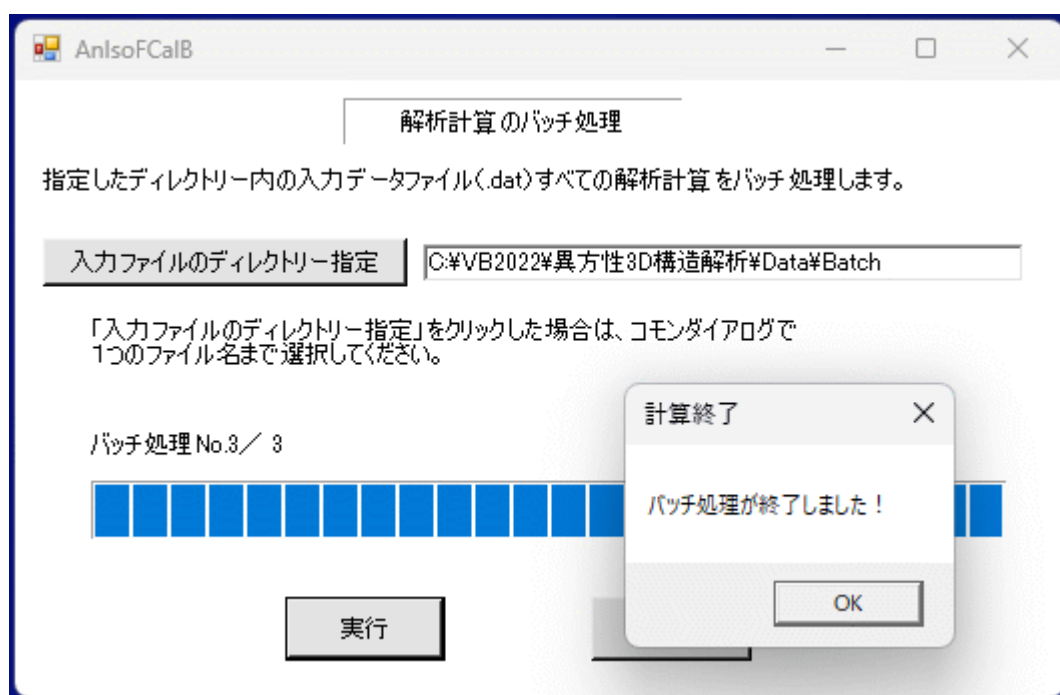


図5-11 バッチ処理の終了画面

## 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。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。

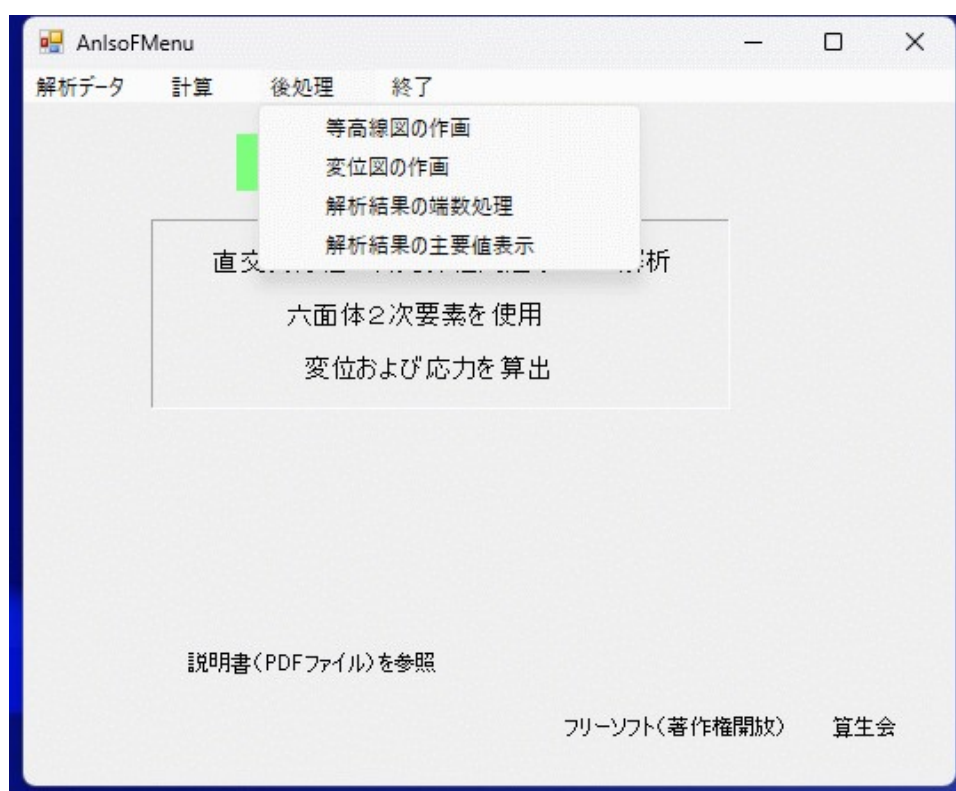


図6-1 「後処理」サブメニュー画面

### 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。

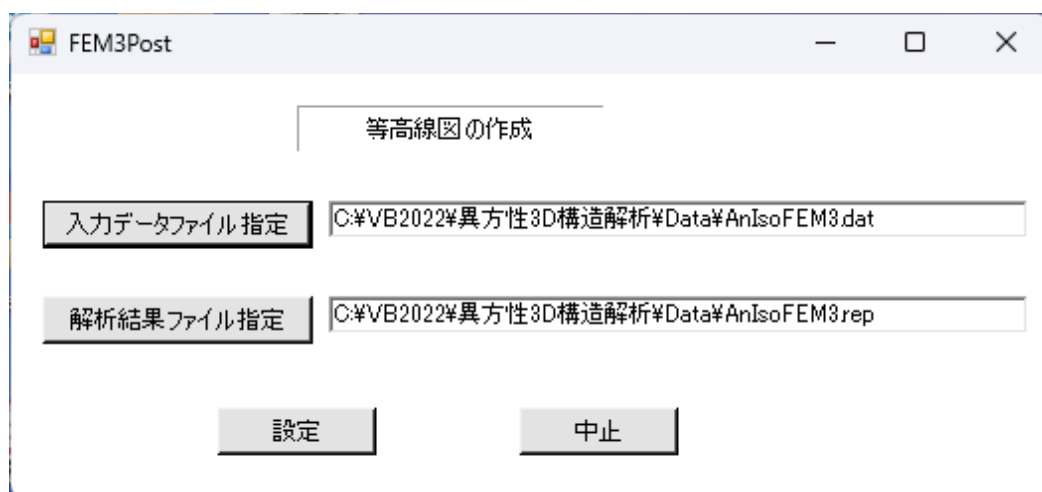


図6-2 使用ファイル設定画面

### 6.3 等高線の指定画面

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。

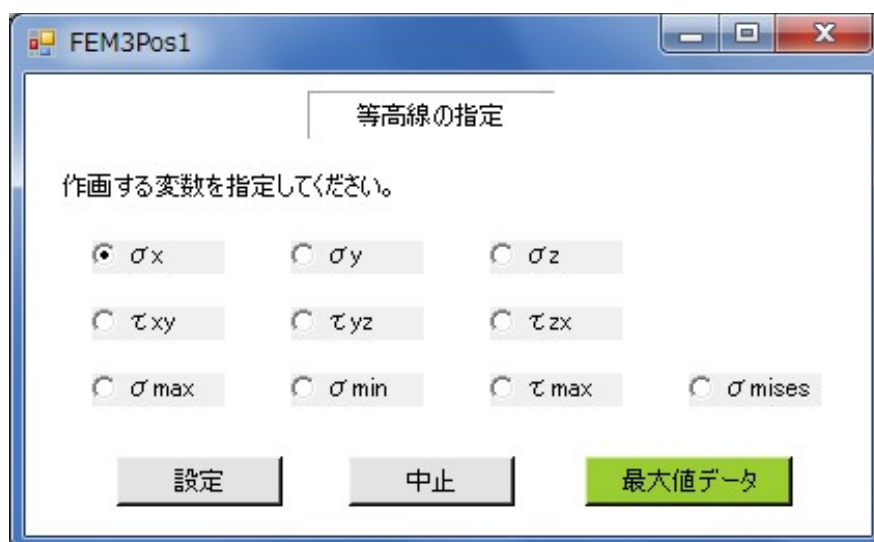


図6-3 等高線指定画面



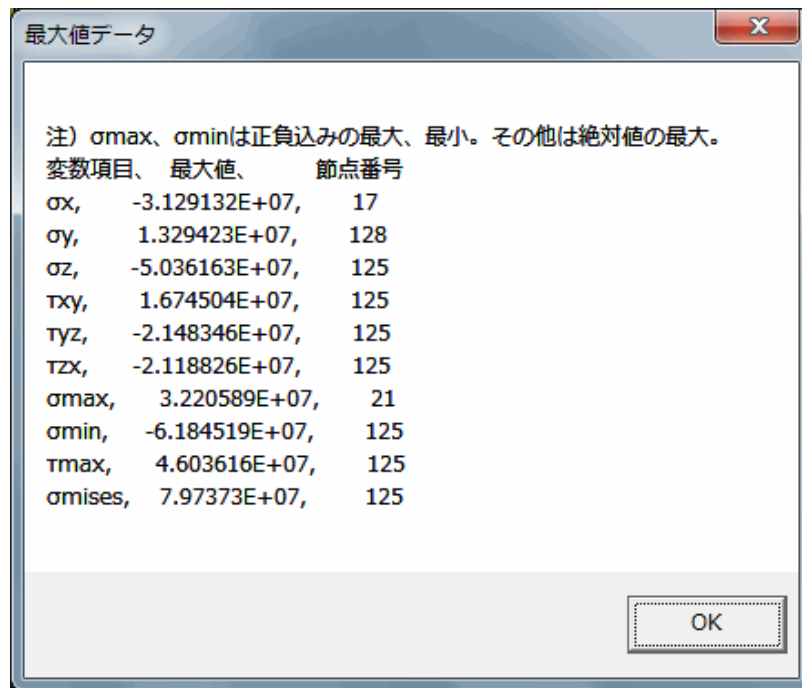


図6-4 最大値データの表示例

#### 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 $\sigma_{min}$ 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。

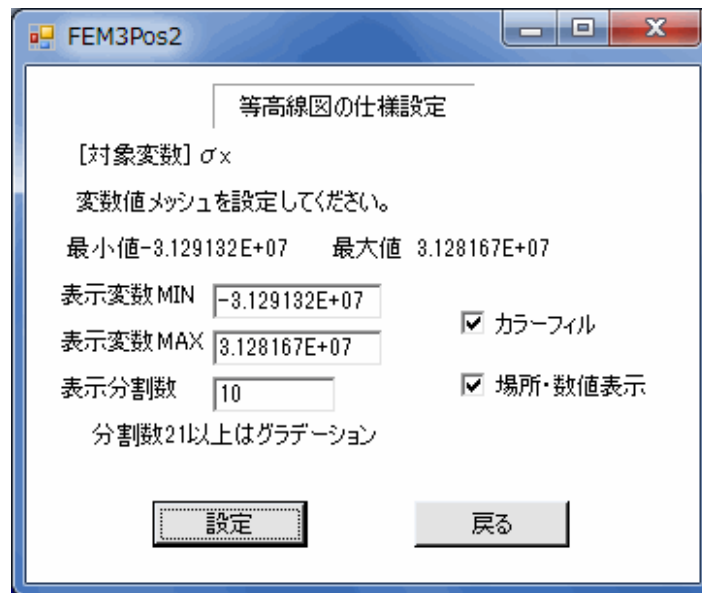


図6-5 等高線図の仕様設定画面

## 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。

- ①同画面のように、変形後の図上に等高線がカラー表示され、右欄には各等高線における変数値も明示してあります。
- ②本画面の左側の「変位作画の倍率」は、構造寸法に対する変位の作画倍率を示します。本数値を任意に変更して「更新」ボタンをクリックすると、変更が反映されます。  
◇0を設定すると、変位なしの構造図の上に等高線が作画されます。
- ③本画面左側の「共通辺の表示」は、「なし」か「有り」を選択できます。選択した後に「再描画」ボタンをクリックします。  
◇「共通辺の表示」を「有り」にした等高線図を図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。
- ④本画面の上側に表示されている作画パラメーター、マウスド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。  
◇ただし、本画面では必ず隠面処理を行ない、また番号表示はありません。  
◇外側表面で背後にある隠面は、モデルを適当に回転させることにより、画面表示できます。  
◇六面体要素どうしが接する共通面は、全要素描画では隠面となりますが、「標準モード」でマウ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。  
◇等高線図の「説明」ボタンをクリックすると、マウスによる回転操作（Shiftキー併用）の説明図が表示されます。
- ⑤マウス右クリックで任意の節点を選択すると、図6-8のように同節点の変数値が表示されます。  
◇本機能を使用中は、描画保存がありません（描画のさかのぼりが無効）。  
◇ESCキーを押すと節点選択が解除されます。

- ⑥「標準・全画面切換」ボタンをクリックすると、標準画面と全画面を切り換えることができます。また、画面Formの右下コーナー等をマウ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。
- 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สด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4.15節の構造図と同じです。
- ⑨繰り返して描画を実施した場合、「前の描画」ボタンをクリックすると1つずつ前の描画にさかのぼることができます。
  - ◇さかのぼれる描画の数は最大8つです。
  - ◇回転操作があっても無視され、初期の回転位置で描画されます。
- ⑩「面切断設定」ボタンをクリックすると、面切断設定の画面に移り、面切断の仕方を設定できます。操作方法は構造図の作画と同じです。
- ⑪本画面で「コピー印刷」ボタンをクリックすると、プリンターで画面コピーを印刷できます。
  - ◇「通常画面」の作画が印刷されます。
- ⑫本画面を終了するには、「戻る」ボタンをクリックして、仕様設定画面に戻ります。また、もし等高線図の出来栄えに不満があれば、「戻る」ボタンで仕様設定画面に戻って仕様変更し、再度、等高線図を作画することができます。

また、図6-9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5等分の5つの変数値が示されます。

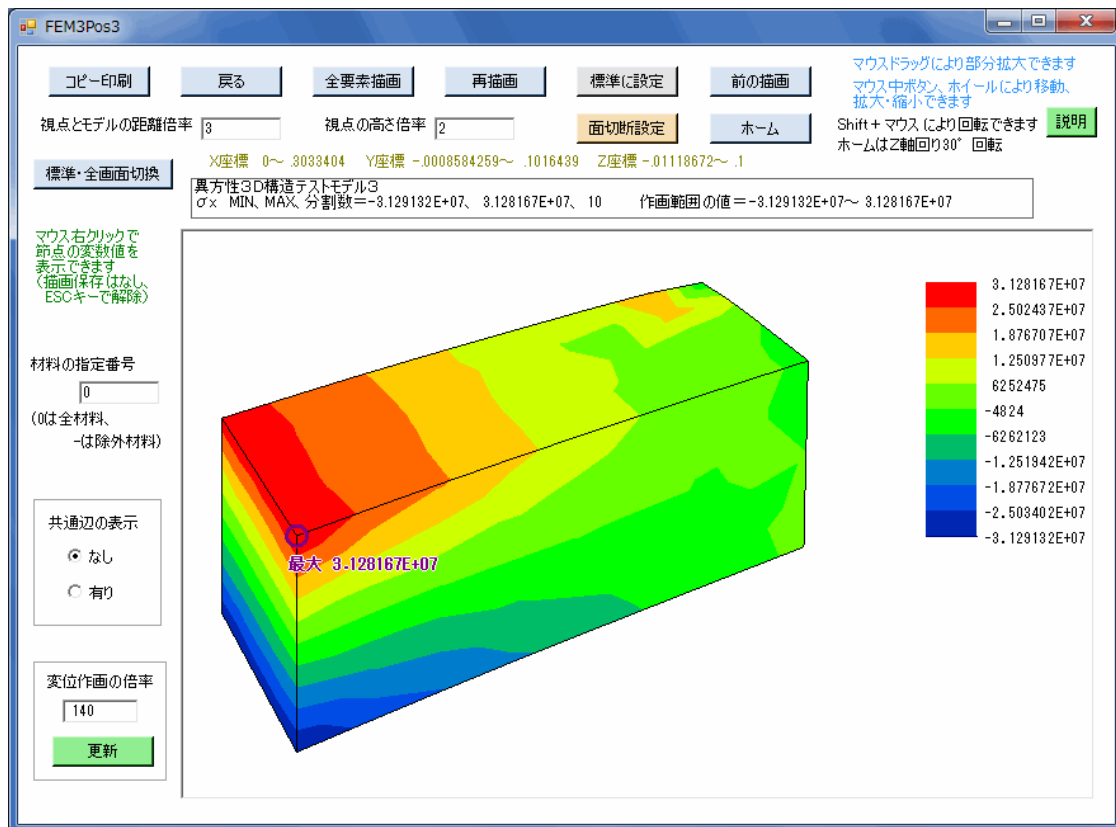


図6-6 等高線図の作画画面

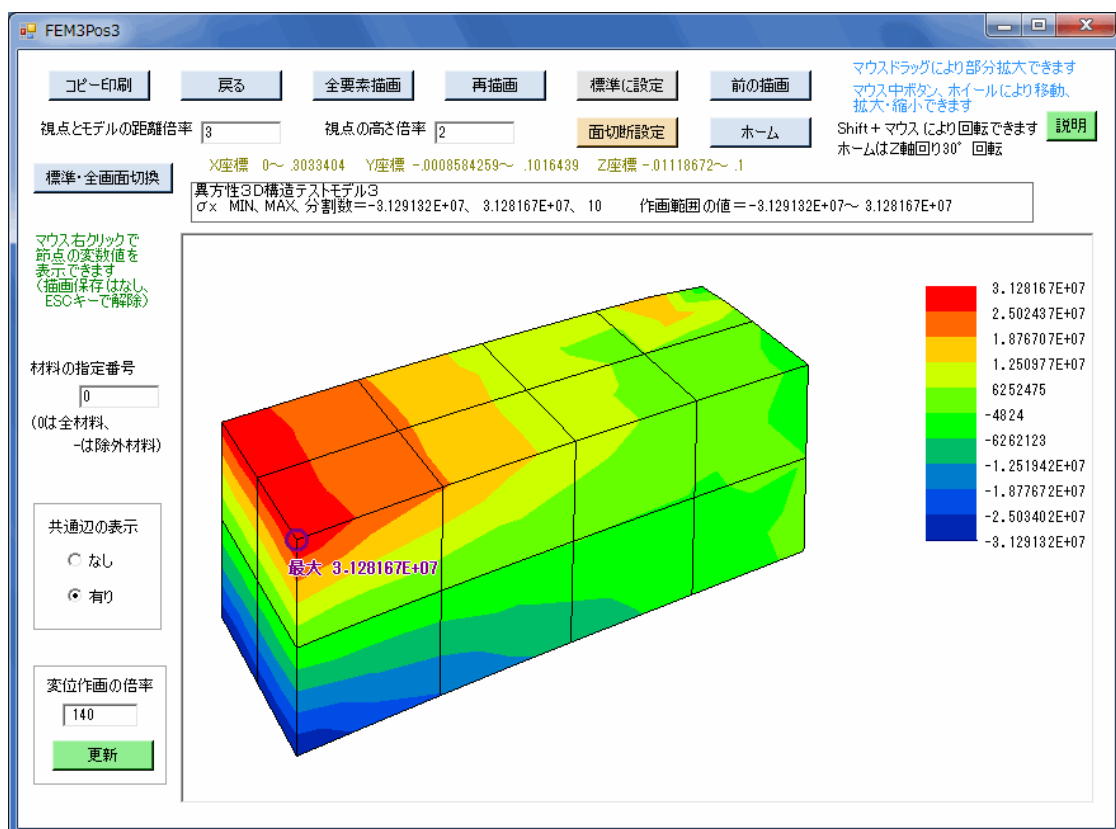


図6-7 等高線図の作画画面（共通辺の表示有り）

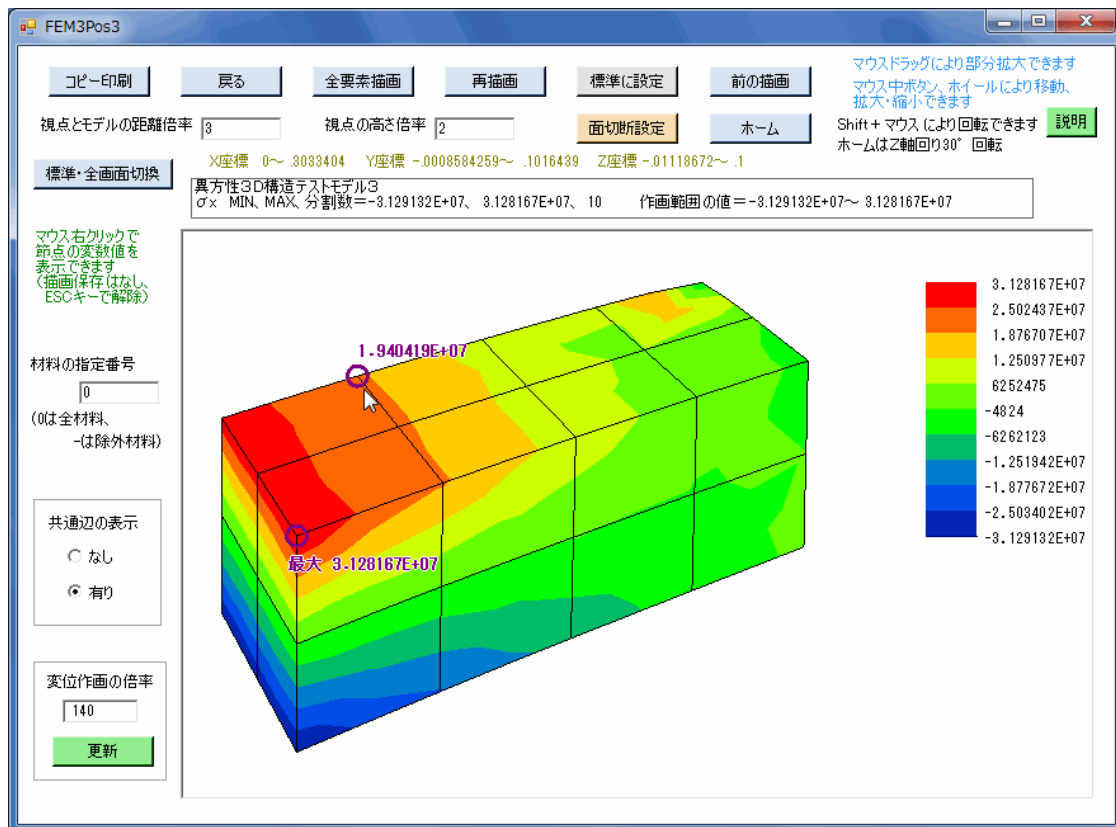


図6-8 等高線図の作画画面（マウス右クリックの節点の変数値表示）

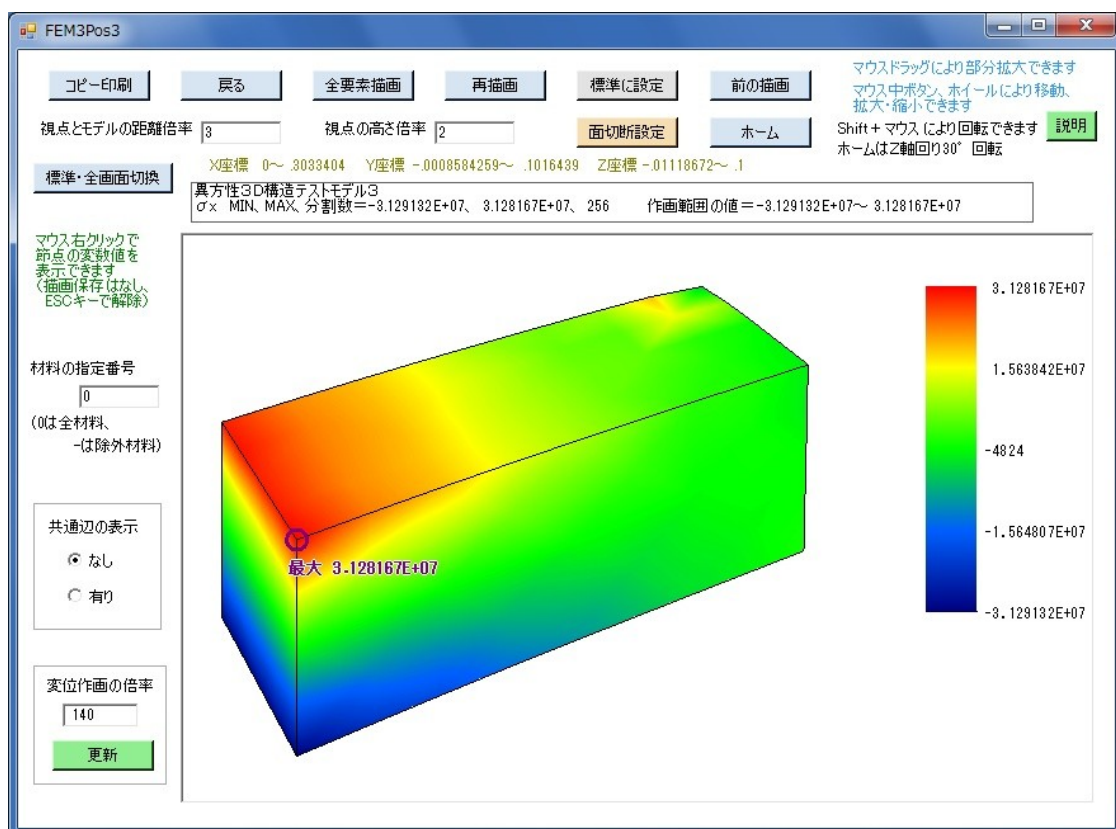


図6-9 等高線図の作画画面（グラデーション）

## 6.6 変位図の作画画面

図6-10に変位図の作画画面を示します。

- ①同画面のように、元の構造図に対して、青色で変位図が表示されています。
  - ◇最大変位の節点位置に、変位値が表示されます。最大変位の表示の有無は、オプションボタンの「最大変位の表示」をクリックして「再描画」ボタンをクリックすれば切り替わります。
  - ◇グラフィック処理の特性上、構造部と重なる変位が一部作画されないことがあります。
- ②本画面の左側の「変位作画の倍率」は、構造寸法に対する変位の作画倍率を示します。本数値を任意に変更して「更新」ボタンをクリックすると、変更が反映されます。
- ③本画面の左側に「変位線の幅」のパラメーターを表示してあり、それを変更できます。変更した後は、「再描画」ボタンをクリックすると作画画面が変更されます。
  - ◇「変位線の幅」は1～3が可能で、初期値は1にしてあります。
- ④本画面の左下側の「構造図消去」ボタンをクリックすると、図6-11のように構造図なしの変位図だけになります。同図で「構造図作画」ボタンをクリックすると元の画面に戻ります。
- ⑤本画面の上側に表示されている作画パラメーター、マウ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。
  - ◇「隠面処理」の「有り」では、前述の第4章 4.15節等とは異なり、六面体要素間の共通辺の表示は残ります（変位を把握しやすくするため）。
  - ◇「隠面処理」の「なし」の場合の変位図を図6-12に示します。
  - ◇外側表面で背後にある隠面は、モデルを適当に回転させることにより、画面表示できます。
  - ◇六面体要素どうしが接する共通面は、全要素描画では隠面となりますが、「標準モード」でマウสดラッグ矩形によりどちらかの要素だけを領域選択すれば、画面表示できます。
  - ◇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。
- 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สด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4.15節の

構造図と同じです。

- 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。操作方法は構造図の作画と同じです。

- ⑫本画面で「コピー印刷」ボタンをクリックすると、プリンターで画面コピーを印刷できます。

◇「通常画面」の作画が印刷されます。

- ⑬本画面を終了するには、「中止」ボタンをクリックします。

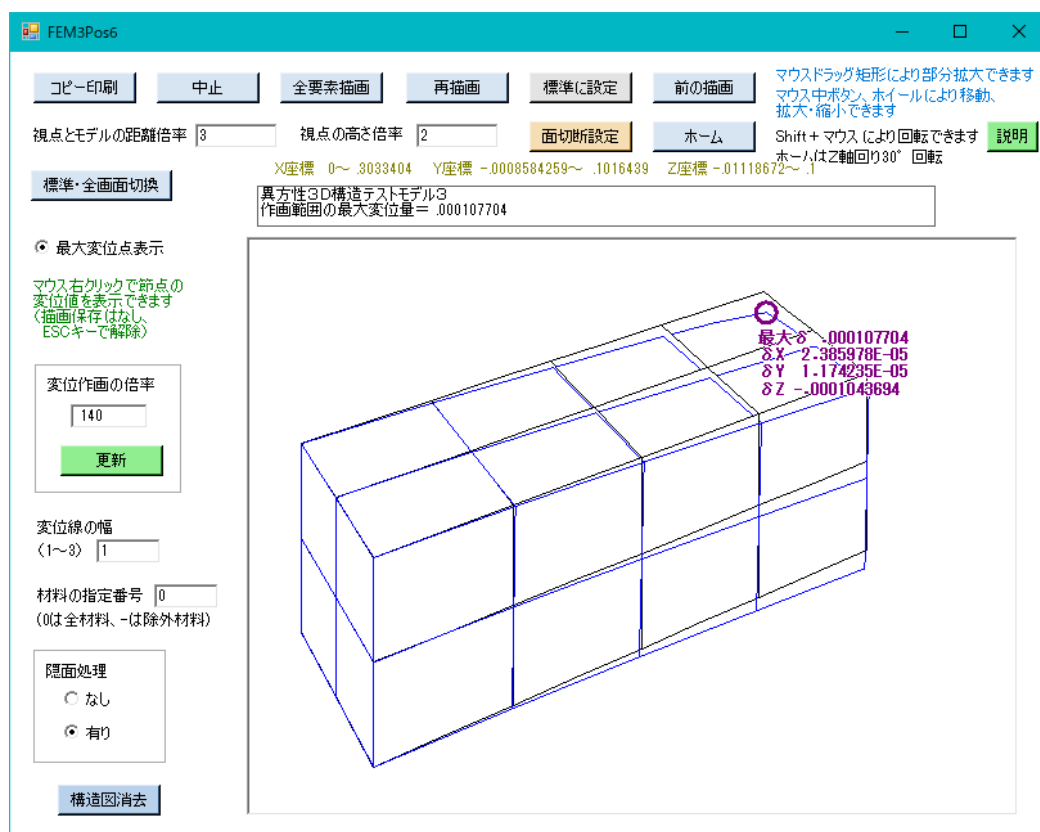


図6-10 変位図の作画画面（隠面処理有り）

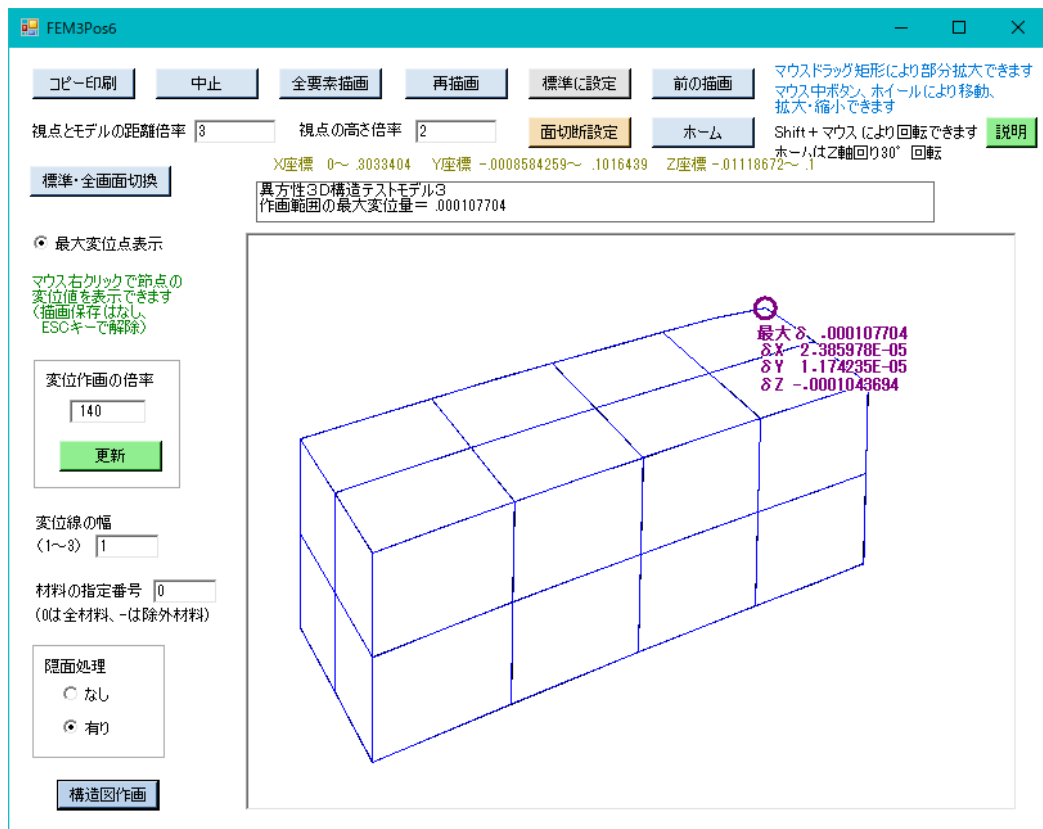


図6-11 変位図の作画画面（隠面処理有り、構造図消去）

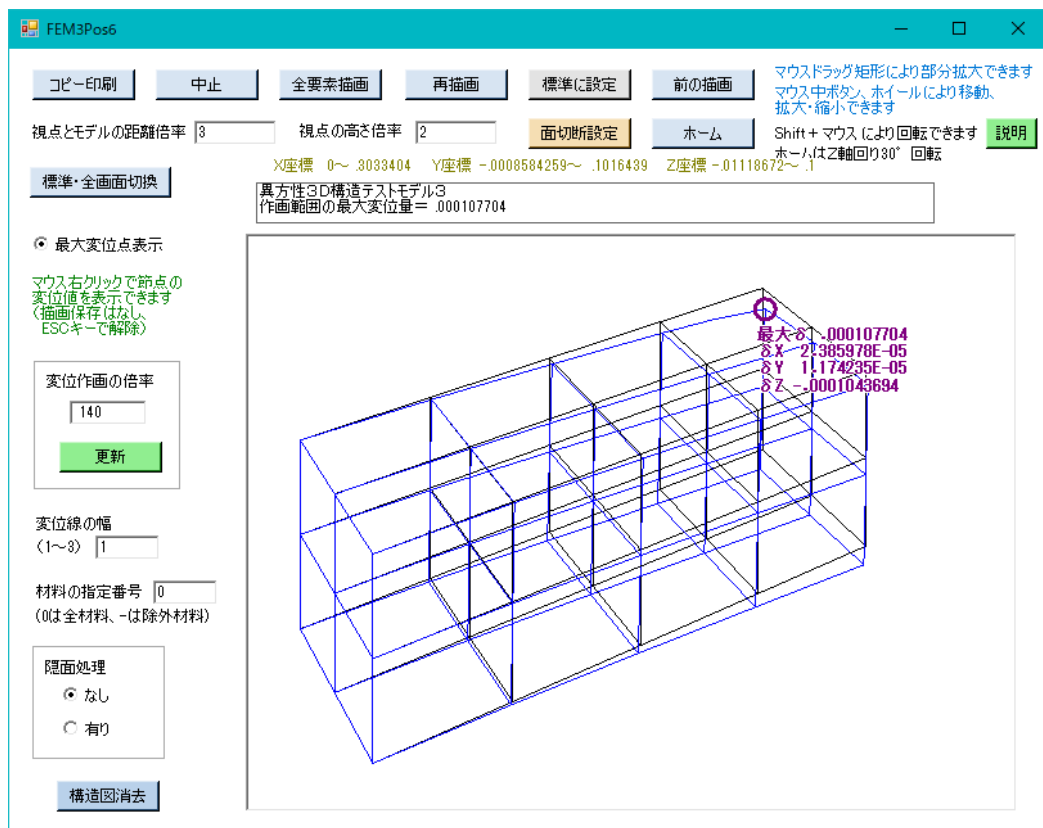


図6-12 変位図の作画画面（隠面処理なし）



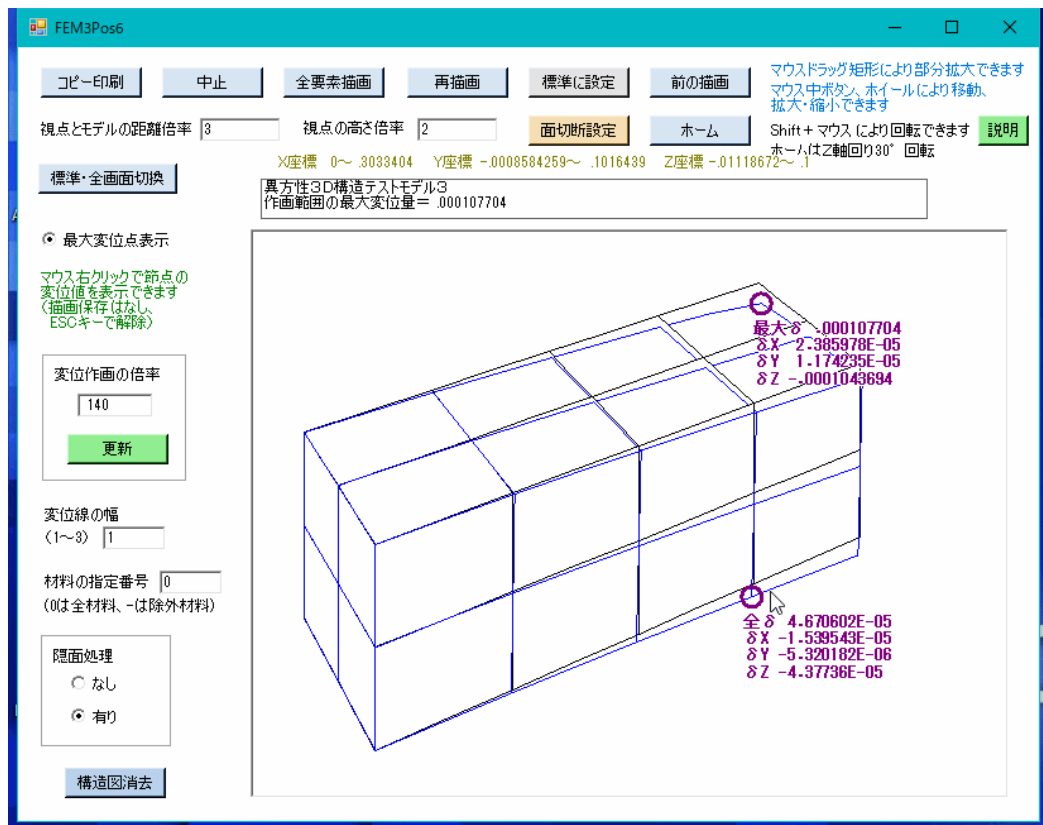


図6-13 変位図の作画画面（マウス右クリックの節点の変位値表示）

## 6.7 解析結果の主要値表示

図6-14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。

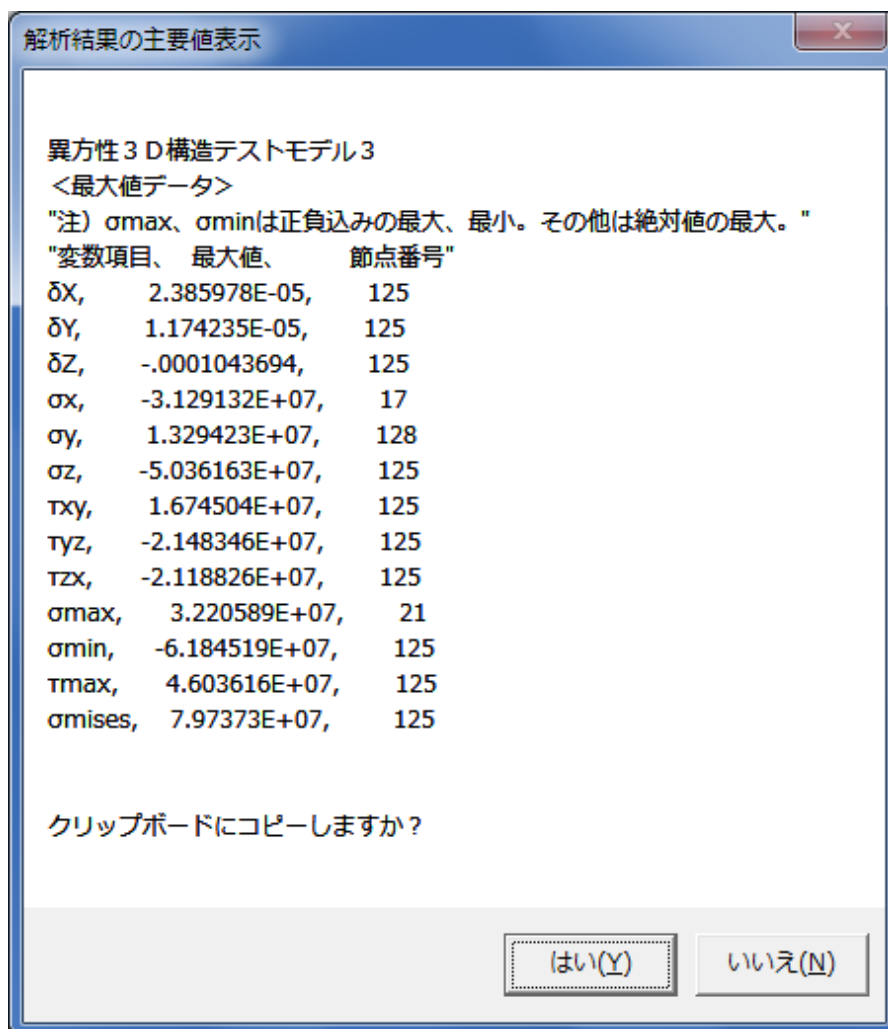


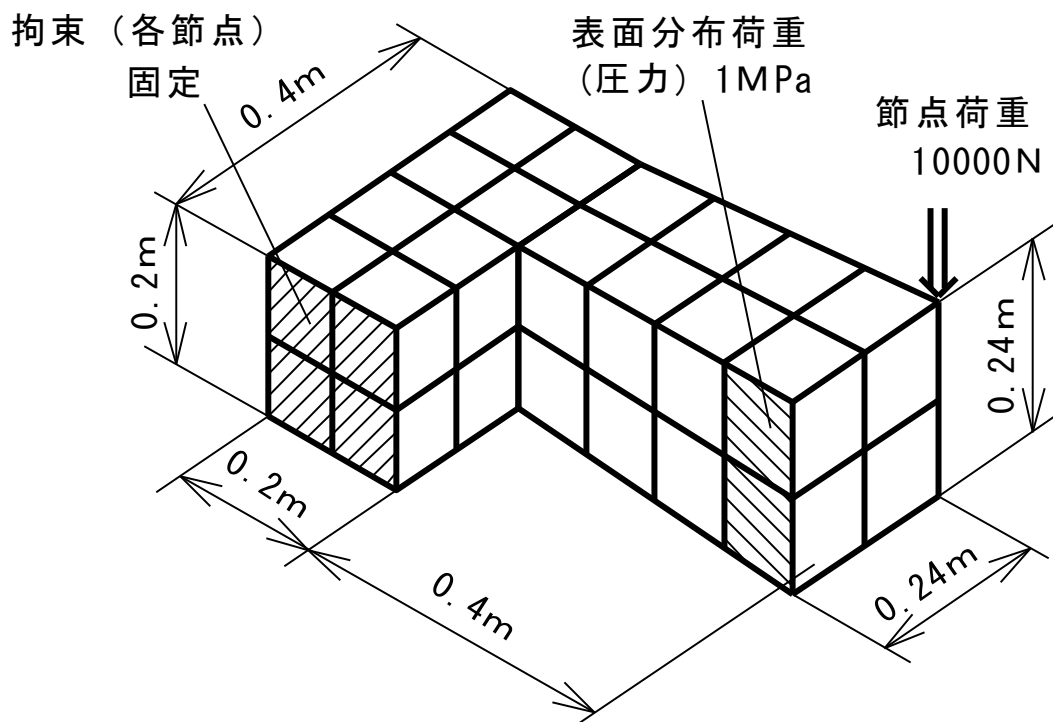
図6-14 解析結果の主要値表示の画面

## 第7章 計算事例

### 7.1 合成構造モデルの構造解析

図7-1に構造モデル図を示します。同図は図4-26の構造図と同じモデルです。本モデルの解析結果を図7-2の等高線図（最大主応力）、図7-3の変位図で示します。なお、計算時間は1sでした（反復法、前処理なし）。

注）本モデルは要素数32、節点数261です。



[材料] $E_x : 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$	$G_{xy} : 0.84 \times 10^5 \text{ MPa}$	
$E_y : 1.4 \times 10^5 \text{ MPa}$	$G_{yz} : 0.42 \times 10^5 \text{ MPa}$	
$E_z : 0.7 \times 10^5 \text{ MPa}$	$G_{zx} : 0.63 \times 10^5 \text{ MPa}$	
$\nu_{xy} : 0.1$	$\nu_{yz} : 0.2$	$\nu_{zx} : 0.3$

図7-1 合成構造モデル

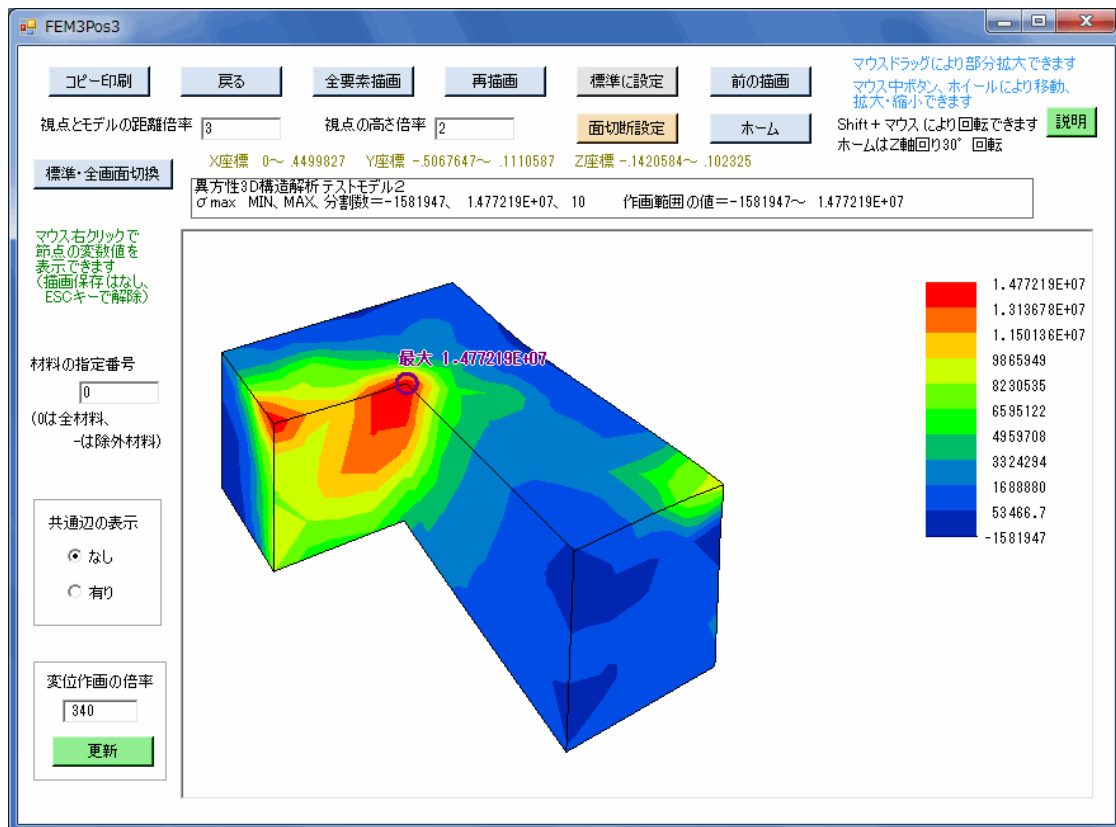


図7-2 合成構造モデルの等高線図（最大主応力）

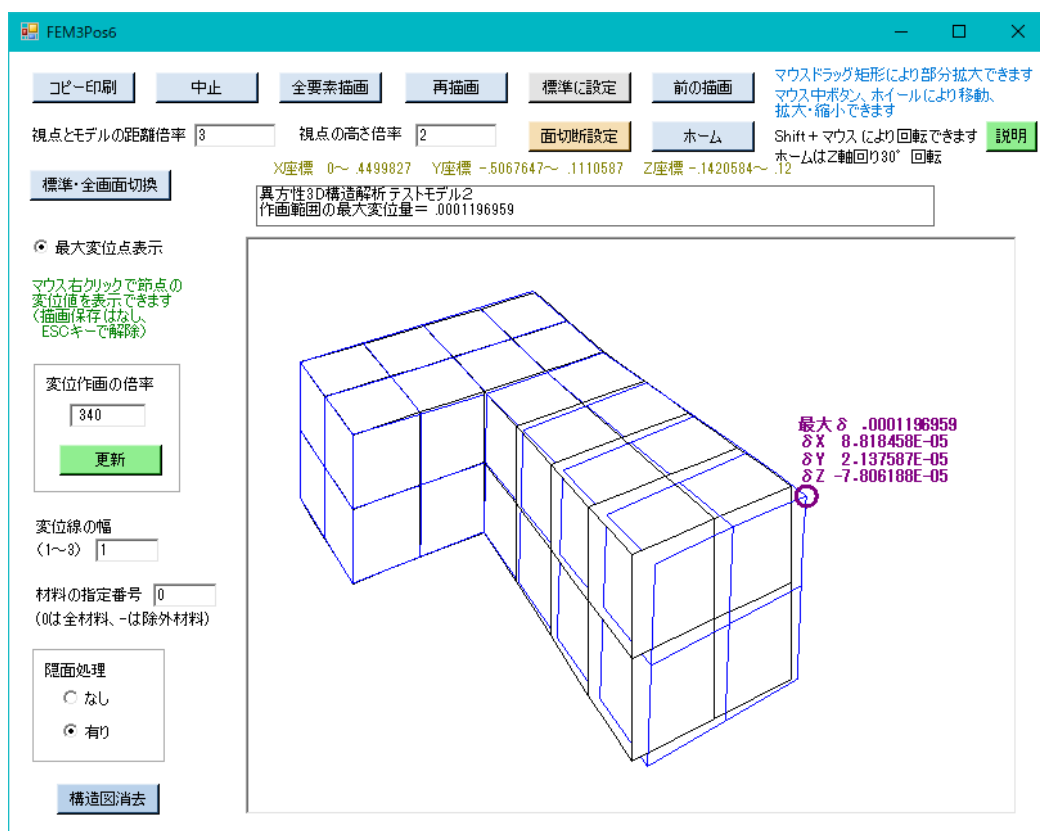
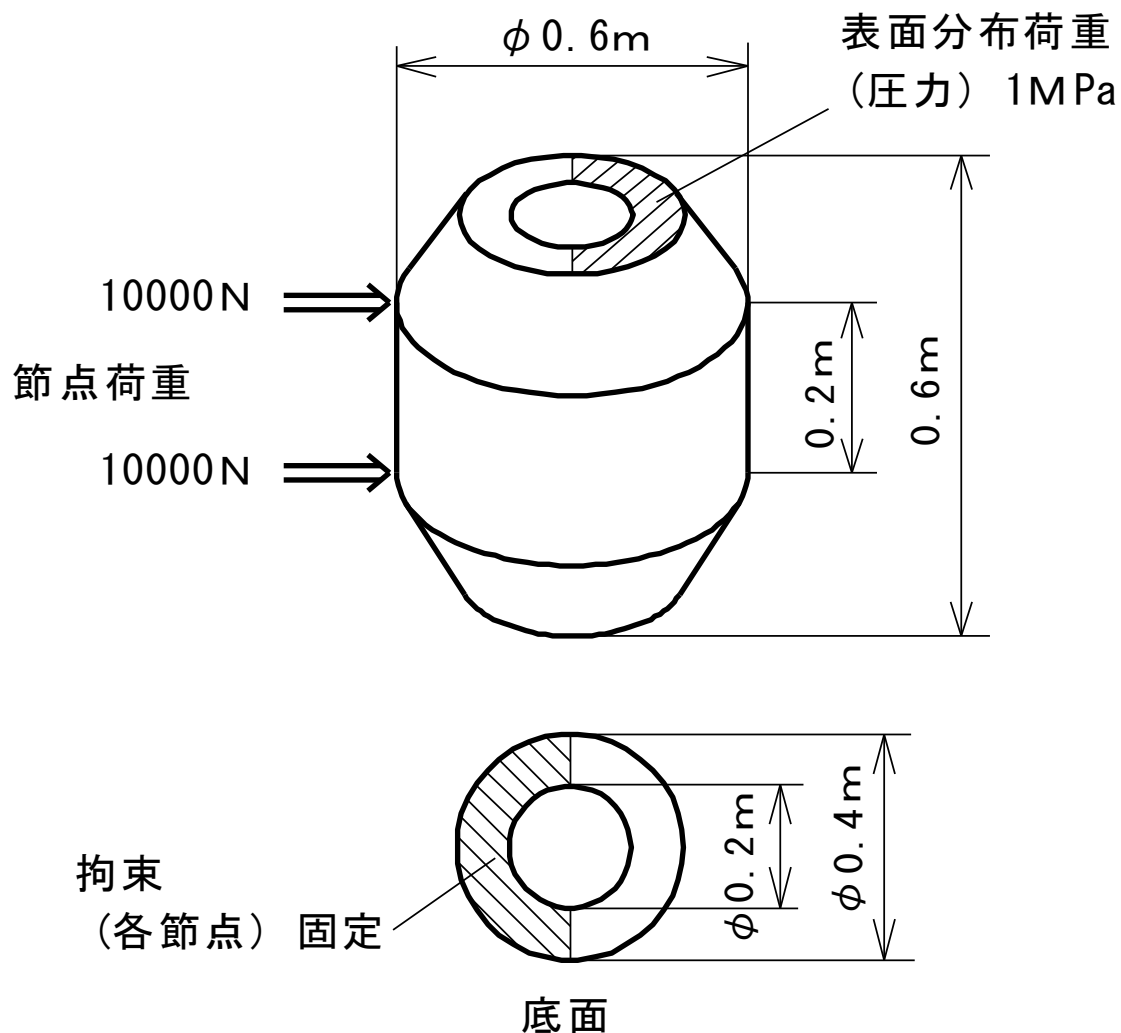


図7-3 合成構造モデルの変位図

## 7.2 軸回転体の構造解析

図7-4に構造モデル略図、また図7-5に1/4部分拡大の構造図を示します。



[材料]	$E_x : 2.1 \times 10^5 \text{MPa}$	$G_{xy} : 0.84 \times 10^5 \text{MPa}$
	$E_y : 1.4 \times 10^5 \text{MPa}$	$G_{yz} : 0.42 \times 10^5 \text{MPa}$
	$E_z : 0.7 \times 10^5 \text{MPa}$	$G_{zx} : 0.63 \times 10^5 \text{MPa}$
	$\nu_{xy} : 0.1$	$\nu_{yz} : 0.2$
		$\nu_{zx} : 0.3$

図7-4 軸回転体の構造モデル略図

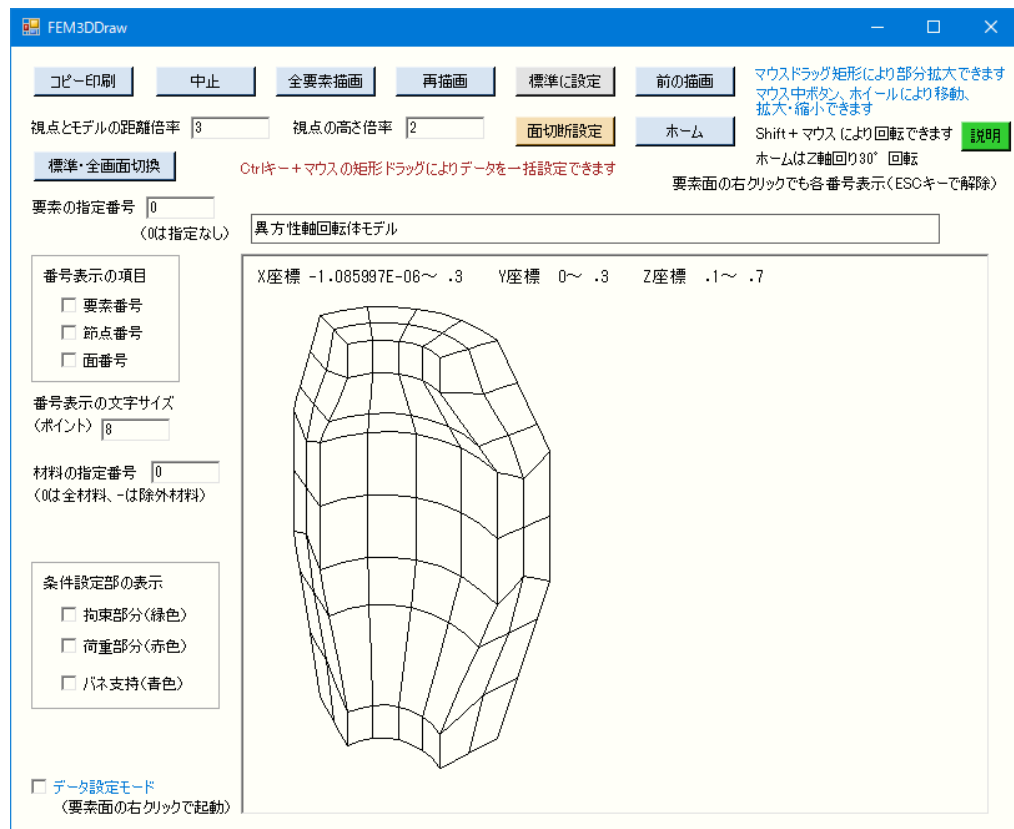


図7-5 軸回転体の1/4部分拡大の構造図

本モデルの解析結果を図7-6の等高線図（底面側、最大主応力）、図7-7の変位図で示します。なお、計算時間は4sでした（反復法、前処理なし）。

注）本モデルは要素数256、節点数1536です。

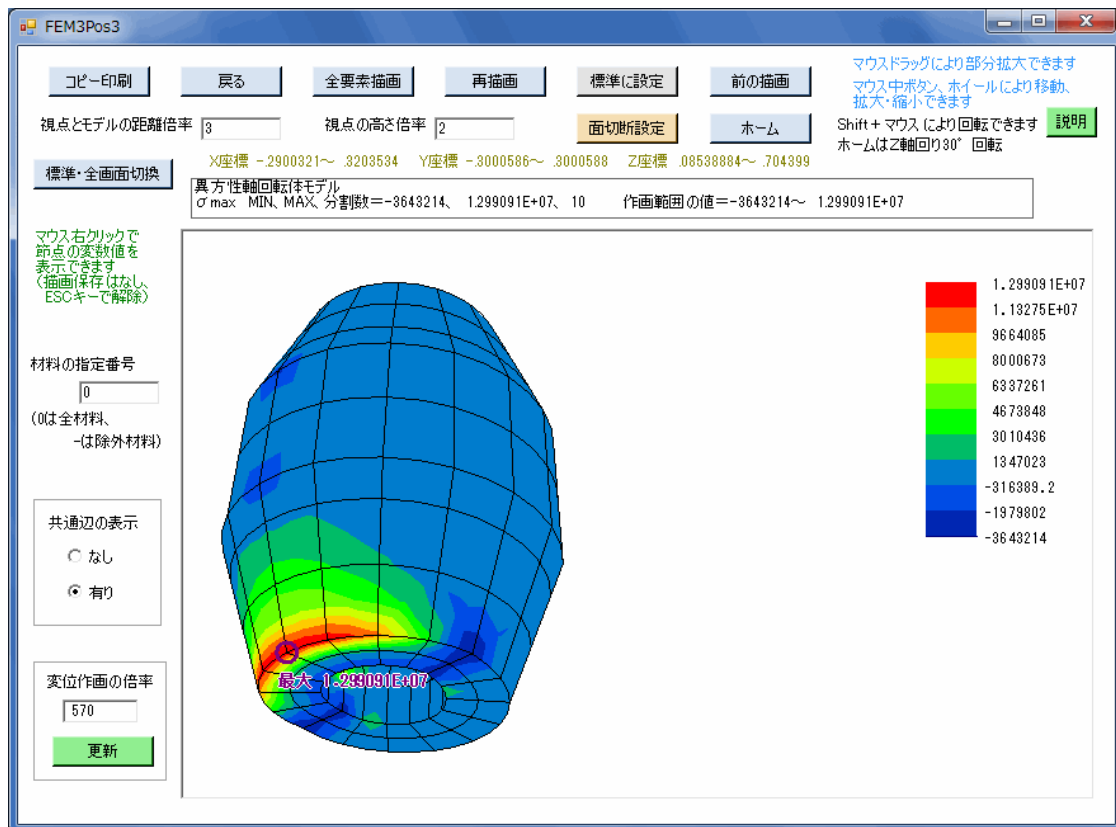


図7-6 軸回転体の等高線図（底面側、最大主応力、共通辺表示有り）

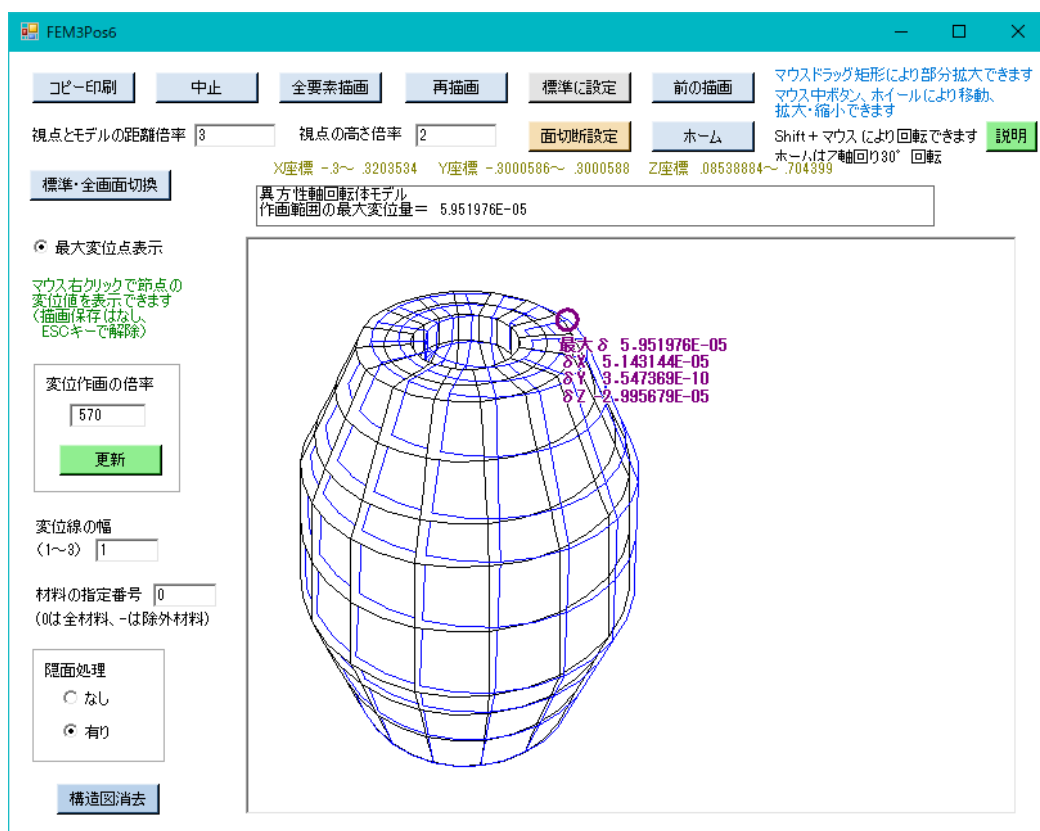


図7-7 軸回転体の変位図

### 7.3 大変形問題の計算例

長柱構造を計算例として取り上げます。

#### 1) 構造モデル

図7-8に構造モデル図を示します。同図のように、中心に正方形穴を有する柱で、柱上面の片側半分に分布荷重が作用します。本構造は同図に示す対称中心面を有するので、後側半分で解析を行ないます。

注) 大変形方式の計算では、変位の分だけ分布荷重の向きが変わります。従って、液体圧力の場合は問題ありませんが、一般外力については分布荷重でなく節点荷重で与えた方がよいです。

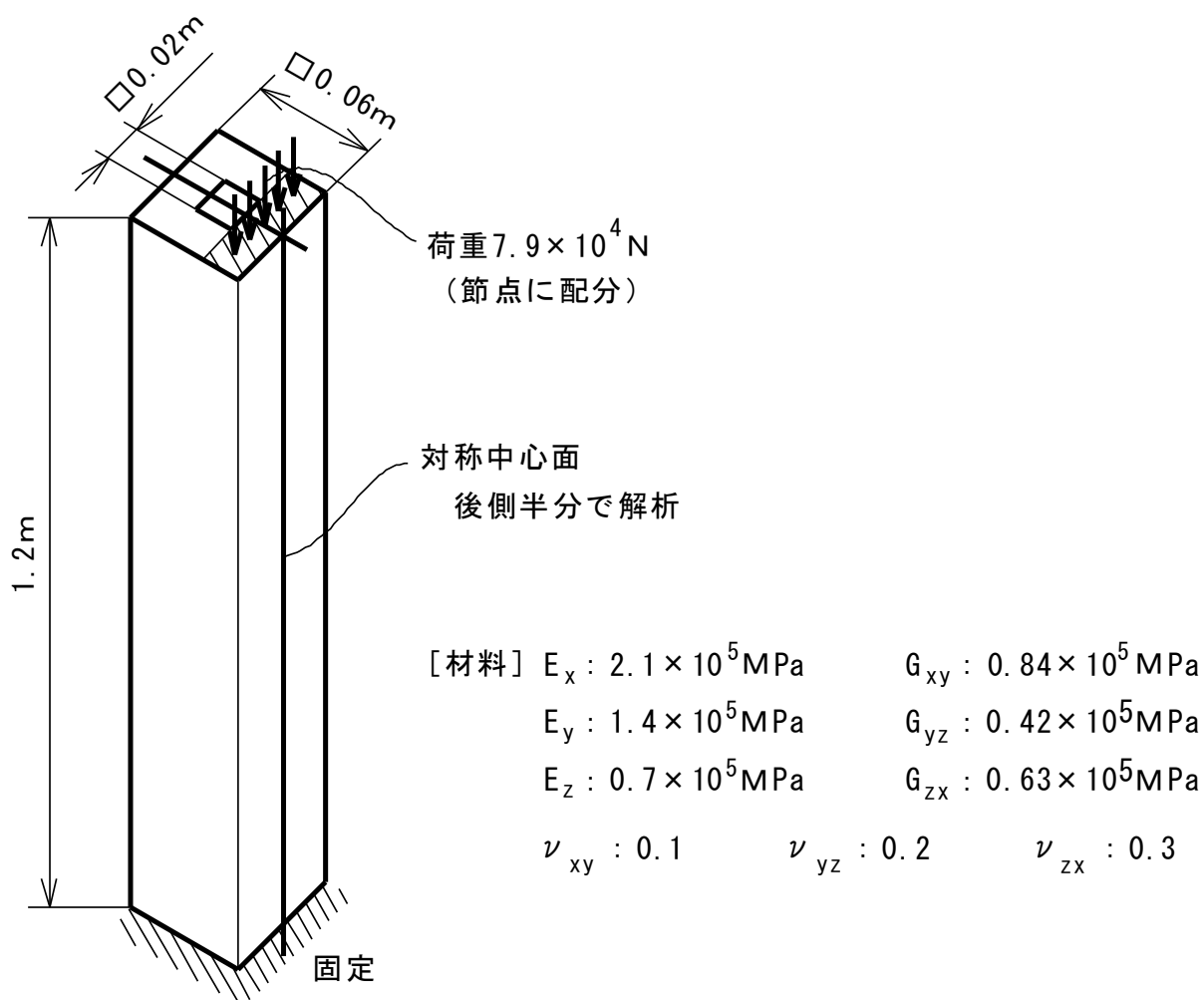


図7-8 長柱の構造モデル図

#### 2) 計算結果（大変形方式）

図7-9に $\sigma_{\min}$ （圧縮側最大）の等高線図、および図7-10に変位図を示します。なお、計算時間は50sでした（反復法、前処理有り）。

注) 本モデルは要素数480、節点数2949です。



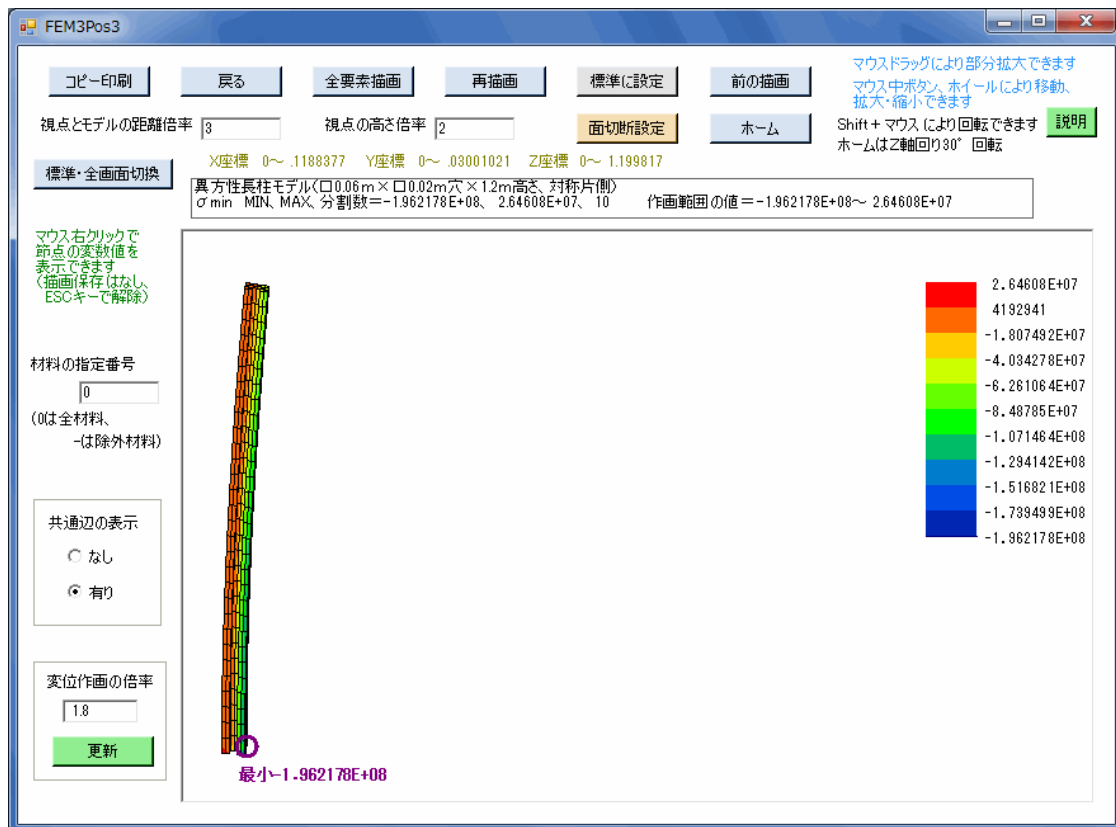


図7-9 長柱の $\sigma_{min}$ の等高線図（大変形方式）

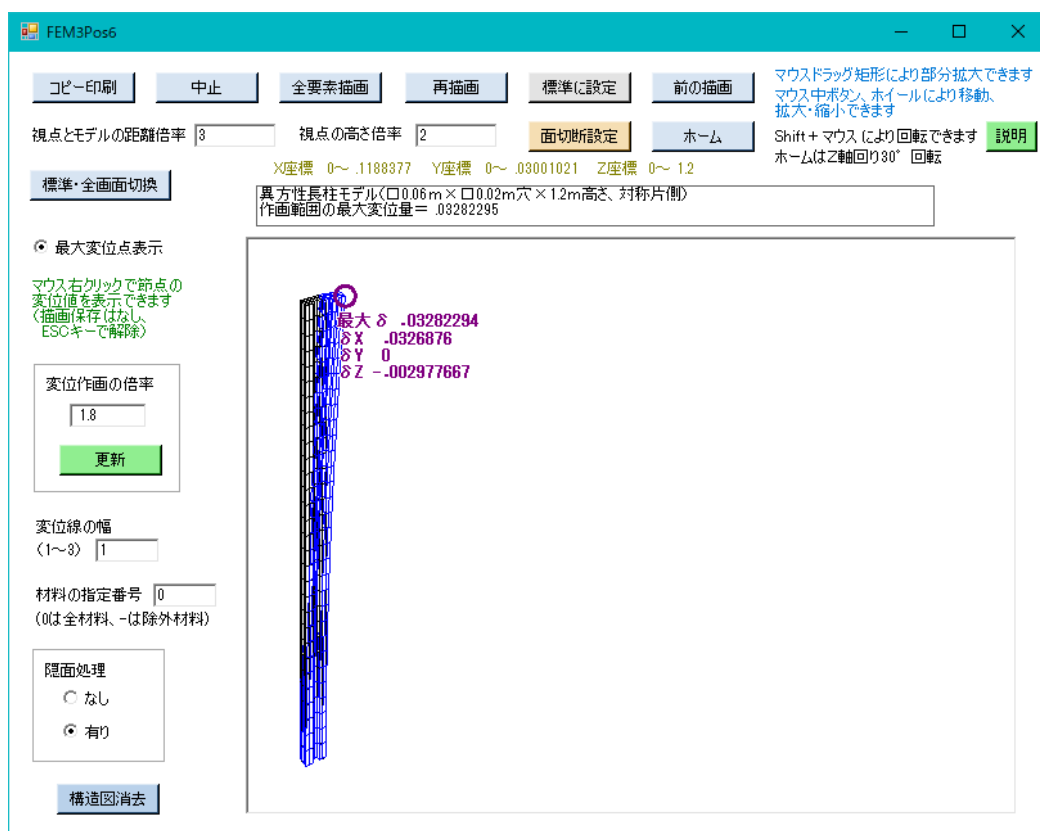


図7-10 長柱の変位図（大変形方式）

### 3) 小変形方式との比較

上記のモデルについて、小変形方式の計算結果との比較を図7-11、12に示します。それらの図から、両者で大きな差があることがわかります。従って、長柱の場合は大変形方式で計算する必要があります。

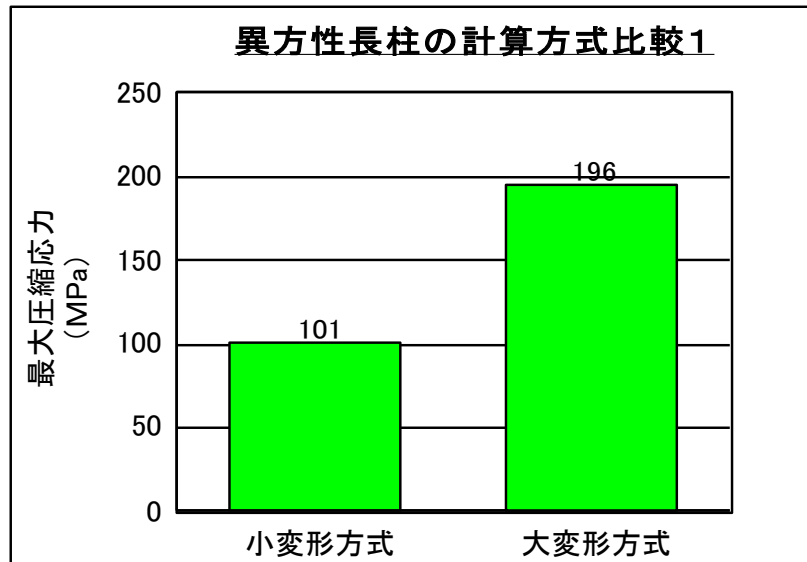


図7-11 長柱の圧縮応力の比較

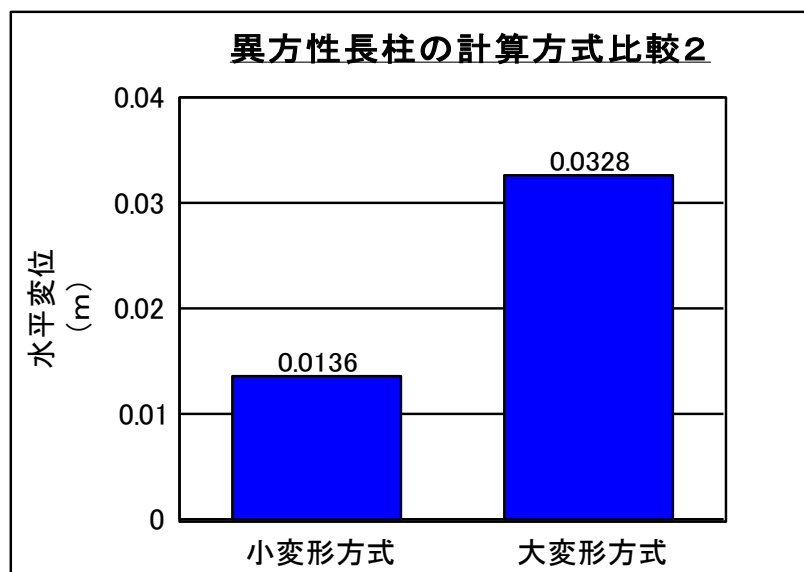
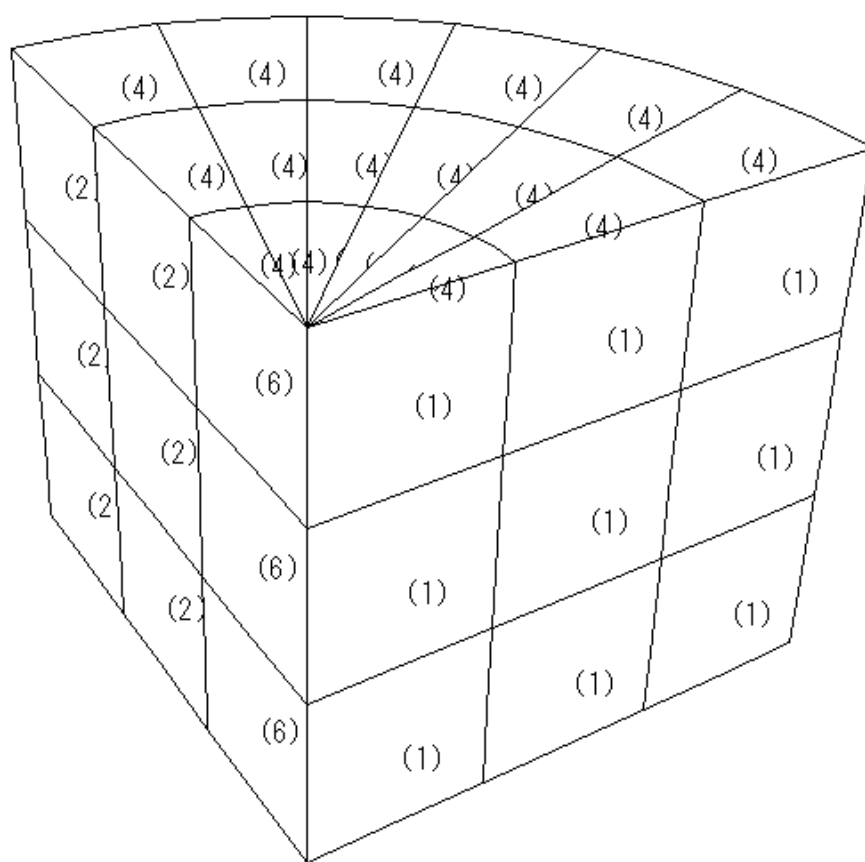


図7-12 長柱の変位の比較

[補足] 中心穴なし軸回転体の注意事項（六面体要素の場合）

回転終了位置において、最内側だけ面番号が異なります。解析の条件設定で面番号を指定する場合には、間違わないように、必ず面番号を確かめるようにしてください。これは、6面体20節点の要素を設定する際、最内側の要素は本来5面しかないため、2要素ずつのペアで6面となるように特殊な処理を行なっているためです。

参考として、1/4 j 軸回転体の面番号の例を下図に示します。同図では、回転終了位置の面番号は、最内側だけが6で、他はすべて2になっています。



注) ( )内は面番号

付図 中心穴なし軸回転体の構造図例（1/4軸回転体）

[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

<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peerゲル 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) 「新数値計算」、福井 義成 他、  
共立出版 (株)、2001
- B6) 「Visual Basicによる工学計算プログラム」、黒田 英夫、  
CQ出版社、2001
- B7) 「Visual Basicによる数値解析プログラム」、黒田 英夫、  
CQ出版社、2002
- B8) 「Web用3D-CG言語 X3D XML版」、赤間 世紀、  
工学社、2007
- B9) 「Blender 3DCG パーフェクトバイブル2013」、近藤 一貴、  
(株) 晋遊舎、2013
- B10) 「基礎からのFreeCAD」、坪田 遼、  
工学社、2016

<C> 有限要素法・差分法・工学一般

- C1) 「材料力学 (下巻)」、鶴戸口 英善 他、  
裳華房、日本機械学会、1966

- C2) 「マトリックス有限要素法」、O. C. Zienkiewicz 他、吉識 雅夫 監訳、  
(株) 培風館、1970
- C3) 「有限要素プログラミング」、E. Hinton 他、川井 忠彦 監訳、  
丸善(株)、1981
- C4) 「マイコンによる有限要素解析」、戸川 隼人、  
(株) 培風館、1982
- C5) 「流れと熱伝導の有限要素法入門」、矢川 元基、  
(株) 培風館、1983
- C6) 「有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析」、矢川 元基 他、  
(株) サイエンス社、1987
- C7) 「複合材料の破壊と力学」、藤井 太一 他、  
実教出版(株)、1999
- C8) 「The Finite Element Method (Linear Static and Dynamic Finite Element  
Analysis)」、Thomas J. R. Hughes、Dover Publications、2000
- C9) 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
- C10) 「The Finite Element Method in Electromagnetics」、Jianming Jin  
John Wiley & Sons、2002
- C11) 「Visual Basicによる3次元熱伝導解析プログラム」、黒田 英夫、  
CQ出版社、2003
- C12) 「弾塑性力学の基礎」、吉田 総仁、  
共立出版(株)、2005
- C13) 「基本からわかる有限要素法」、邵 長城、  
森北出版(株)、2008