

\*\*\*\*\*

\* 「2次元構造解析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2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、軸対称を含む2次元弾性問題を解くものです。入力データの自動メッシュについては、別途、算生会の「FEM断面データK」ソフト（フリーソフト）が必要です。

本ソフトのFEM方程式計算では、スカイライン法ソルバーを採用しています。スカイライン法は、バンドマトリックス法よりも使用メモリー容量が少なくて済みます。

なお、本書で紹介の解析事例は、説明のために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 2次元構造解析の理論 -----	6
第3章 プログラムの機能・構成 -----	17
第4章 自動メッシュのデータの作り方 -----	21
第5章 構造データの作り方 -----	22
第6章 「解析データ」処理プログラム -----	30
第7章 「計算」プログラム -----	62
第8章 「後処理」プログラム -----	70
第9章 平面応力／歪みの計算例 -----	85
第10章 板の曲げの計算例 -----	91
第11章 軸対称体の計算例 -----	98
第12章 大変形問題の計算例 -----	105
[参考文献] -----	108

## 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。本章では大元となる要素について解説します。

### 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、本書ソフトでは図1-1に示す四角形8節点のアイソパラメトリック2次要素を使用します。同図で節点2、4、6、8は各辺の midpoint にあり、中間節点と呼ばれます。各辺は直線でも曲線（円弧）でも構いません。ガウス積分点は図の9点を使用します。なお、同図では平面問題として全体座標をXY座標で示していますが、軸対称問題ではRZ座標となります（以下同様）。

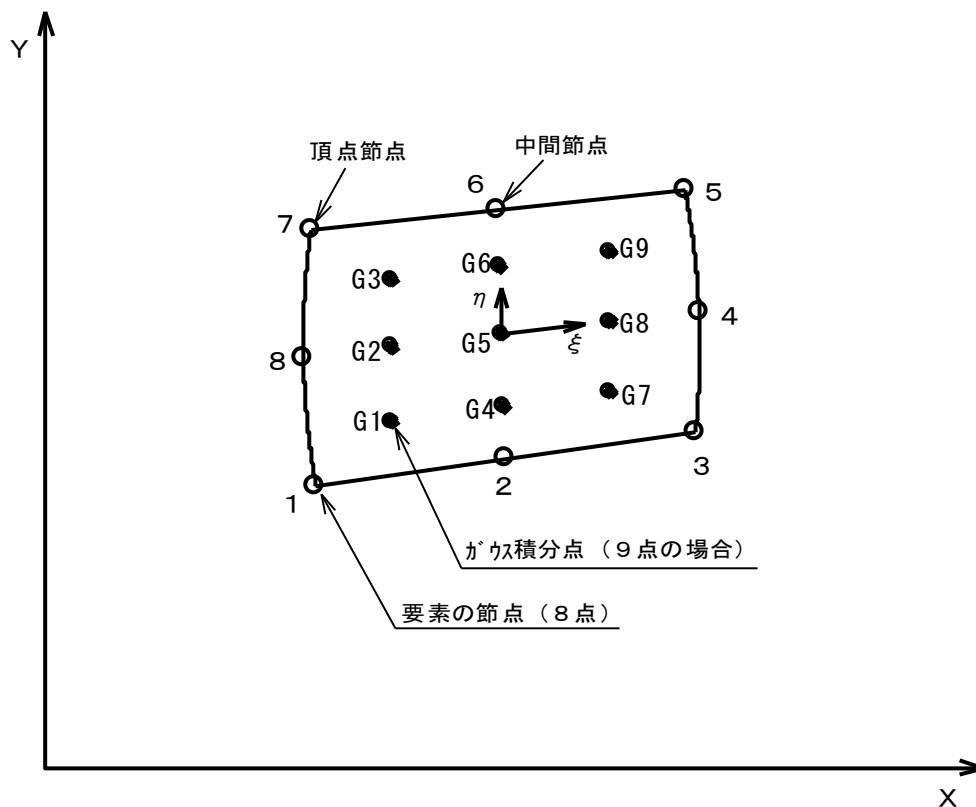


図1-1 四角形8節点要素

アイソパラメトリック2次要素は、三角形や四角形の1次要素（頂点のみに節点を持つ要素）に比べ、はるかに少ない要素数で精度良く計算できます。

注) ①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れる要素のことです。ここで、内挿関数とは後述の形状関数と同じです。

②ガウス積分点の数は、2次元の四角形要素の場合、1軸当りの積分点数の2乗となります。上記では1軸当りの積分点数は3ですが、同積分点数を2にして四角形要素の積分点を4点にすることも可能です。しかし、四角形要素の積分点を9点から4点に減らすと、計算時間が若干短くなっても、計算精度が低下します。

それ故、9点を採用しています。

図1-1に示す無次元化された局所座標 $\xi, \eta$ を用いて、8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、8節点の変数値と形状関数の合成式により表わされます。

$$\begin{aligned}
 \text{[形状関数]} \quad N_1 &= -(1-\xi)(1-\eta)(1+\xi+\eta)/4 \\
 N_2 &= (1-\xi^2)(1-\eta)/2 \\
 N_3 &= (1+\xi)(1-\eta)(\xi-\eta-1)/4 \\
 N_4 &= (1+\xi)(1-\eta^2)/2 \\
 N_5 &= (1+\xi)(1+\eta)(\xi+\eta-1)/4 \\
 N_6 &= (1-\xi^2)(1+\eta)/2 \\
 N_7 &= (1-\xi)(1+\eta)(-\xi+\eta-1)/4 \\
 N_8 &= (1-\xi)(1-\eta^2)/2
 \end{aligned}$$

以上 (1-1)

ただし、 $\xi, \eta$ の変域は、それぞれ-1～1

[要素内の変数値] 局所座標 $(\xi, \eta)$ における値

$$H = \sum_{i=1}^8 N_i H_i \quad (1-2)$$

ただし、 $H_i$ は節点における変数値

## 1.2 要素積分

ガウス積分による要素積分は次式で表わされます。

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

ただし、 $F(\ )$ ：任意関数

$dV$ ：積分体積

$n$ ：1軸当たりのガウス積分点数

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

$\xi, \eta$ ：要素の無次元化された局所座標

$h$ ：平面問題の場合は要素の厚さ、軸対称問題の場合は $2\pi R$

$|J|$ ：ヤコビアンマトリックスの行列式の値

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial \xi} & \frac{\partial Y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial X}{\partial \eta} & \frac{\partial Y}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^8 \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} X_i & \frac{\partial N_i}{\partial \xi} Y_i \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} X_i & \frac{\partial N_i}{\partial \eta} Y_i \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

本書のプログラムでは、1軸当たりのガウス積分点数 $n$ として3を採用しており、その際のガウス積分点の位置と重み係数を表1-1に示します。

表1-1 ガウス積分点の位置と重み係数

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

### 1.3 辺積分

前節では1つの要素全体の積分計算式を示しましたが、境界条件に関して要素の辺積分を行なうことがあります。図1-2に要素辺の説明図を示します。同図のように、辺は3節点で構成され、やはり辺に沿って無次元の局所座標 $\xi$ を取ります。その局所座標 $\xi$ を用いて、下記のように形状関数を定義します。そして、辺上の任意位置の変数値が、3節点の変数値と形状関数の合成式により表わされます。

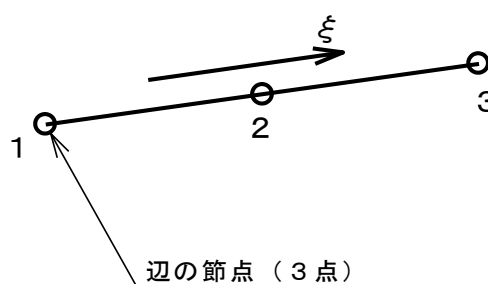


図1-2 要素の辺

$$\begin{aligned}
 \text{[辺の形状関数]} \quad L_1 &= -\xi (1-\xi)/2 \\
 L_2 &= (1-\xi) (1+\xi) \\
 L_3 &= \xi (1+\xi)/2
 \end{aligned}
 \qquad \text{以上 (1-5)}$$

ただし、 $\xi$ の変域は-1~1

[辺上の変数値] 局所座標 $\xi$ における値

$$H = \sum_{i=1}^3 N_i H_i \qquad (1-6)$$

ただし、 $H_i$ は節点における変数値

そして、ガウス積分による辺積分は次式で表わされます。下記で積分長さとして $dX$ 、 $dY$ を使用しているのは、2次元構造強度解析においては辺に沿った積分長さを問いず済むからです。

$$\int F(X, Y) h \, dX = \sum_{i=1}^n F(\xi) W_i h |J_x| \, d\xi \qquad (1-7)$$

$$\int F(X, Y) h \, dY = \sum_{i=1}^n F(\xi) W_i h |J_y| \, d\xi \qquad (1-8)$$

ただし、 $W_i$  : ガウス積分点の位置 $\xi$ における重み係数。

積分点の位置と重み係数は表1-1参照。

$$|J_x| = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial L_j}{\partial \xi} \chi_j \quad (1-9)$$

$$|J_y| = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial L_j}{\partial \xi} \gamma_j \quad (1-10)$$

その他の記号は1.2節と同じ。

## 第2章 2次元構造解析の理論

本章では、2次元構造の弾性強度問題の有限要素法解析理論を説明します。対象となる構造問題は表2-1の4種類です。各問題タイプ毎の計算式は2.2節～2.5節で示します。

表2-1 構造問題の種類

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

注) いずれも弾性変形内とし、また初期歪みは扱わない。

### 2.1 剛性方程式

弾性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項は歪み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。

$$\pi = 0.5 \int \{\sigma\}^T \{\varepsilon\} dV - \int \{\delta\}^T \{p\} dV \quad (2-1)$$

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）。

$\{\varepsilon\}$  : 歪みベクトル

$\{\delta\}$  : 変位ベクトル

$\{p\}$  : 荷重ベクトル

$dV$  : 積分体積（以下同じ）

ここで、応力 $\{\sigma\}$ と歪み $\{\varepsilon\}$ 、また歪み $\{\varepsilon\}$ と変位 $\{\delta\}$ のベクトル間には、次の関係式があります。

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} \quad (2-2)$$

$$\{\varepsilon\} = [B] \{\delta\} \quad (2-3)$$

ただし、 $[D]$  : 弾性マトリックス（対称）

$[B]$  : 歪みマトリックス。要素節点の形状関数の演算形となる。

(2-3) 式を (2-2) 式に代入すると、次式が得られます。

$$\{\sigma\} = [D][B] \{\delta\} \quad (2-4)$$

(2-3) 式と (2-4) 式を (2-1) 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なります。

$$\pi = 0.5 \int \{\delta\}^T [B]^T [D][B] \{\delta\} dV - \int \{\delta\}^T \{p\} dV \quad (2-5)$$

ここで、1つの有限要素について考え、(2-5) 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とおくと、次式のようになります。

$$\frac{\partial \pi_e}{\partial \{\delta_e\}} = \int [B]^T [D] [B] \{\delta_e\} dV - \int [p] dv = 0 \quad (2-6)$$

ただし、添え字eは要素を示す（以下同じ）。

$$\therefore \int [B]^T [D] [B] \{\delta_e\} dV = \int [p] dv \quad (2-7)$$

$$\therefore [K_e] \{\delta_e\} = \{F_e\} \quad (2-8)$$

ただし、 $[K_e]$ ：要素の剛性マトリックス

$$[K_e] = \int [B]^T [D] [B] dV \quad (2-9)$$

$\{F_e\}$ ：要素の荷重ベクトル

$$\{F_e\} = \int \{p\} dV \quad (2-10)$$

(2-9) 式を局所座標  $\xi, \eta$  によって表わすと、次のようになります。

$$[K_e] = \int [B]^T [D] [B] h \mid J \mid d\xi d\eta \quad (2-11)$$

ただし、 $h$ ：平面問題の場合は要素の厚さ、軸対称問題の場合は  $2\pi R$

$\mid J \mid$ ：ヤコビアンマトリックス  $J$  の行列式の値。 $J$  は (1-4) 式による。

(2-9) 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。

$$[K_A] \{\delta_A\} = \{F_A\} \quad (2-12)$$

ただし、 $[K_A]$ ：構造全体の剛性マトリックス。

本行列はバンドマトリックス形となる。

$\{\delta_A\}$ ：全節点変位ベクトル

$\{F_A\}$ ：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 (2-12) 式を解くことにより、全節点変位ベクトル  $\{\delta_A\}$  が求まります。その後で、次式によりガウス積分点の応力を算出します。

$$\{\sigma_G\} = [D] [B] \{\delta_G\} \quad (2-13)$$

ただし、 $\{\sigma_G\}$ ：ガウス積分点の応力ベクトル

$\{\delta_G\}$ ：ガウス積分点の変位ベクトル。要素 8 節点の変位ベクトルから (1-2) 式を用いて算出。

また、要素節点の応力は、ガウス積分点の応力を用いて別途算出します（2.7節で説明）。

## 2.2 平面応力問題の計算式

図2-1に平面応力／歪みの座標軸と変位の向きを示します。

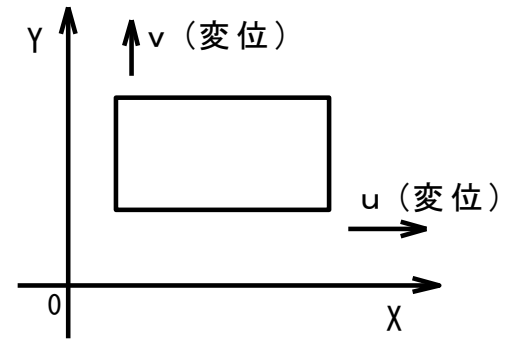


図2-1 平面応力／歪みの座標軸と変位方向

平面応力問題の各ベクトル、マトリックスを以下に示します。ただし、荷重ベクトル{p}については、その各要素が変位ベクトル{δ}に対応しますが、実際の計算では節点荷重をそのまま使用するのでここでは記載を省略します。

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2-14)$$

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2-15)$$

$$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (2-16)$$

$$[D] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

ただし、E：ヤング率

ν：ポアソン比



$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial X} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial Y} \\ \frac{\partial}{\partial Y} & \frac{\partial}{\partial X} \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

### 2.3 平面歪み問題の計算式

平面歪みの座標軸と変位の向きは、平面応力と同じで図2-1に示した通りです。また平面歪み問題の各ベクトル、マトリックスは、弾性マトリックス[D]以外は、平面応力問題と同じです。そして、[D]は次式で表わされます。

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

また、平面歪み問題ではZ方向の応力 $\sigma_z$ が作用し、次式で表わされます。

$$\sigma_z = \nu (\sigma_x + \sigma_y) \quad (2-20)$$

### 2.4 板曲げ問題の計算式

図2-2に板曲げの座標軸と変位の向きを示します。同図のように少し特殊な設定になっています。

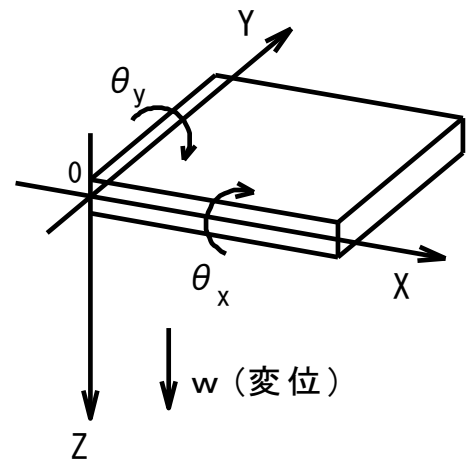


図2-2 板曲げの座標軸と変位方向

板曲げ問題の各ベクトル、マトリックスを以下に示します。ただし、荷重ベクトル{p}については、その各要素が変位ベクトル{δ}に対応しますが、実際の計算では節点荷重をそのまま使用するのでここでは記載を省略します。また、板曲げの場合、応力ベクトルや歪みベクトルが本来の応力や歪みとは異なった特殊なものとなります。本来の応力は別途計算します。

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} M_{\theta_x} \\ M_{\theta_y} \\ M_{xy} \\ Q_{yz} \\ Q_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \int \sigma_y Z dZ \\ \int \sigma_x Z dZ \\ \int \tau_{xy} Z dZ \\ \int \tau_{yz} dZ \\ \int \tau_{xz} dZ \end{Bmatrix} \quad (2-21)$$

ただし、M：曲げモーメント。

$M_{xy}$ は、XY断面において、 $\theta_x$ または $\theta_y$ の回転軸と直角の軸回り。

$Q_{xz}$ 、 $Q_{yz}$ ：XZ断面、YZ断面の剪断力。

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} -\frac{\partial \theta_x}{\partial Y} \\ -\frac{\partial \theta_y}{\partial X} \\ -\left(\frac{\partial \theta_x}{\partial X} + \frac{\partial \theta_y}{\partial Y}\right) \\ -\Phi_x \\ -\Phi_y \end{Bmatrix} \quad (2-22)$$

ただし、 $\phi_x$ 、 $\phi_y$ ：剪断による回転変位。回転の向きは $\theta_x$ 、 $\theta_y$ と同じ。

$$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} W \\ \theta_x \\ \theta_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial W}{\partial Y} + \Phi_x \\ \frac{\partial W}{\partial X} + \Phi_y \end{Bmatrix} \quad (2-23)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} C_1 & C_1 \nu & 0 & 0 & 0 \\ C_1 \nu & C_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_1 \frac{1-\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_2 \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

$$\text{ただし、} C_1 = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2-25)$$

$$C_2 = \frac{Eh}{2.4(1+\nu)} \quad (2-26)$$

h：要素の厚さ

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\partial}{\partial Y} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial}{\partial X} \\ 0 & -\frac{\partial}{\partial X} & -\frac{\partial}{\partial Y} \\ \frac{\partial}{\partial Y} & -1 & 0 \\ \frac{\partial}{\partial X} & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

また、曲げ応力、剪断応力は、各板厚断面での最大値を下記のように計算します。下記では一部の応力の計算式を示しますが、他も同様です。

$$\sigma_x = \pm \frac{M_{\theta y}}{h^2/6} \quad (2-28)$$

ただし、板厚 $h$ の $Z$ 軸正側は符号＋、 $Z$ 軸負側は－を採ります。本ソフトの結果出力では、－を採用しています（等高線図等の視点側に合致）。

$$\tau_{xz} = 1.5 \frac{Q_{xz}}{h} \quad (2-29)$$

## 2.5 軸対称問題の計算式

図2-3に軸対称体の座標軸と変位の向きを示します。

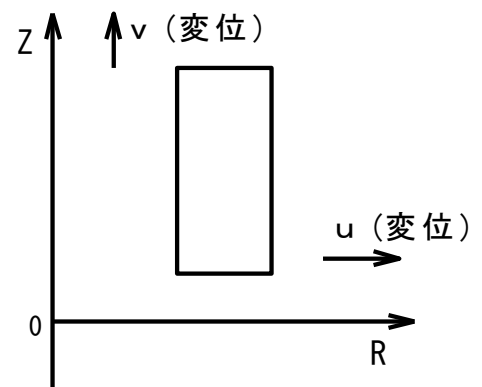


図2-3 軸対称体の座標軸と変位方向

軸対称問題の各ベクトル、マトリックスを以下に示します。ただし、荷重ベクトル $\{p\}$ については、その各要素が変位ベクトル $\{\delta\}$ に対応しますが、実際の計算では節点荷重をそのまま使用するのでここでは記載を省略します。

$$\{\sigma\} = \begin{pmatrix} \sigma_r \\ \sigma_z \\ \sigma_{\theta} \\ \tau_{rz} \end{pmatrix} \quad (2-30)$$

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} \quad (2-31)$$

$$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} \delta_r \\ \delta_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (2-32)$$

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial R} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial Z} \\ \frac{1}{R} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial Z} & \frac{\partial}{\partial R} \end{bmatrix} \quad (2-34)$$

## 2.6 分布荷重の処理方法

荷重条件の内、節点荷重はそのまま全体荷重ベクトル $\{F_A\}$ に入れますが、分布荷重は等価節点荷重に換算しなければなりません。ここでは、辺の分布荷重についての処理方法を説明します。

図2-4に辺の分布荷重の説明図を示します。同図のように垂直分布荷重 $p_n$ と接線分布荷重 $p_t$ があります。これらの分布荷重は単位面積当たりとなります。

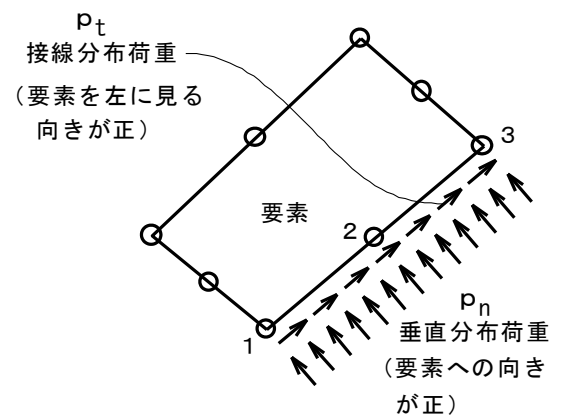


図2-4 辺の分布荷重の説明図

辺の微小部分におけるX方向、Y方向の荷重 $dP_x$ 、 $dP_y$ は次式で表わされます。

$$\begin{aligned} dP_x &= (p_t dX - p_n dY) h \\ &= \left( p_t \frac{\partial X}{\partial \xi} - p_n \frac{\partial Y}{\partial \xi} \right) h d\xi \end{aligned} \quad (2-35)$$

$$\begin{aligned}
dP_y &= (p_n dX + p_t dY) h \\
&= \left( p_n \frac{\partial X}{\partial \xi} + p_t \frac{\partial Y}{\partial \xi} \right) h d\xi
\end{aligned} \tag{2-36}$$

ただし、 $\xi$ ：辺の無次元局所座標・・・1.3節参照

$h$ ：平面問題の場合は要素の厚さ、軸対称問題の場合は $2\pi R$ 。

なお、軸対称問題では上記のXY座標の代わりにRZ座標を使用。

従って、辺の3節点( $i=1, 2, 3$ )での等価節点荷重は次式で計算できます。

$$\begin{aligned}
P_{xi} &= \int \left( p_t \frac{\partial X}{\partial \xi} - p_n \frac{\partial Y}{\partial \xi} \right) L_i h d\xi \\
&= \sum_{k=1}^n \left( p_t \frac{\partial X}{\partial \xi} - p_n \frac{\partial Y}{\partial \xi} \right) w_k L_i h
\end{aligned} \tag{2-37}$$

$$\begin{aligned}
P_{yi} &= \int \left( p_n \frac{\partial X}{\partial \xi} + p_t \frac{\partial Y}{\partial \xi} \right) L_i h d\xi \\
&= \sum_{k=1}^n \left( p_n \frac{\partial X}{\partial \xi} + p_t \frac{\partial Y}{\partial \xi} \right) w_k L_i h
\end{aligned} \tag{2-38}$$

ただし、 $L_i$ ：辺の形状関数・・・(1-5)式参照

$n$ ：ガウス積分点数

$w_k$ ：ガウス積分点の重み

## 2.7 節点応力の計算方法

前述の(2-13)式によって算出される応力は、各有限要素のガウス点における値です。各節点の応力は、ガウス点の応力を元に計算します。ここでは、その計算方法を説明します。

要素のガウス点9個( $i=1, 2, \dots, 9$ )について、節点8個( $j=1, 2, \dots, 8$ )に対する形状関数を $N_{ij}$ とします。ガウス点の位置は表1-1により決まっているので、 $N_{ij}$ もそれぞれ一定です。このガウス点行列を $[N]$ とおきます。

$$[N] = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & N_{18} \\ N_{21} & N_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & N_{28} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ N_{91} & N_{92} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & N_{98} \end{bmatrix} \tag{2-39}$$

いま、一つの応力( $\sigma_x$ 等)について、ガウス点9個の応力ベクトルを $\{\sigma_{9G}\}$ 、節点8個の応力ベクトルを $\{\sigma_{8P}\}$ とくと、次の関係があります。

$$\{\sigma_{9G}\} = [N] \{\sigma_{8P}\} \tag{2-40}$$

$$\therefore \{\sigma_{8P}\} = [N]^{-1} \{\sigma_{9G}\} \tag{2-41}$$

すなわち、逆行列 $[N]^{-1}$ を用意することにより、ガウス点応力 $\{\sigma_{9G}\}$ から節点応力 $\{\sigma_{8P}\}$ を算出することができます。ただし、(2-41)式は1つの有限要素における計算式であり、もし節点が複数の要素に共通である場合は、複数要素での算出値の平均を取ります。

表2-2に、ガウス点行列とその逆行列の数値を示します。なお、この逆行列は算生会「A9)汎用逆行列計算」ソフトにより算出したものです。

表2-2 ガウス点行列とその逆行列（四角形8節点要素、ガウス点9個）

ガウス点行列

0.432379	0.354919	-0.100000	0.045081	-0.032379	0.045081	-0.100000	0.354919
-0.100000	0.200000	-0.100000	0.112702	-0.100000	0.200000	-0.100000	0.887298
-0.100000	0.045081	-0.032379	0.045081	-0.100000	0.354919	0.432379	0.354919
-0.100000	0.887298	-0.100000	0.200000	-0.100000	0.112702	-0.100000	0.200000
-0.250000	0.500000	-0.250000	0.500000	-0.250000	0.500000	-0.250000	0.500000
-0.100000	0.112702	-0.100000	0.200000	-0.100000	0.887298	-0.100000	0.200000
-0.100000	0.354919	0.432379	0.354919	-0.100000	0.045081	-0.032379	0.045081
-0.100000	0.200000	-0.100000	0.887298	-0.100000	0.200000	-0.100000	0.112702
-0.032379	0.045081	-0.100000	0.354919	0.432379	0.354919	-0.100000	0.045081

逆行列

1.936940	-0.485887	0.027778	-0.485887	-0.555556	0.374776	0.027778	0.374776	-0.214718
0.166667	-0.333334	0.166667	1.145497	0.000000	-0.145497	0.166667	-0.333333	0.166667
0.027778	0.374776	-0.214718	-0.485887	-0.555556	0.374776	1.936940	-0.485887	0.027778
0.166667	-0.145497	0.166667	-0.333333	0.000000	-0.333333	0.166667	1.145497	0.166667
-0.214718	0.374776	0.027778	0.374776	-0.555556	-0.485887	0.027778	-0.485887	1.936940
0.166667	-0.333333	0.166667	-0.145497	0.000000	1.145497	0.166667	-0.333333	0.166667
0.027778	-0.485887	1.936940	0.374776	-0.555556	-0.485887	-0.214718	0.374776	0.027778
0.166667	1.145498	0.166667	-0.333334	0.000000	-0.333333	0.166667	-0.145497	0.166667

## 2.8 最大応力の計算方法

2次元平面内の引張・圧縮の最大、最小応力は以下の式により算出します。この最大、最小応力は、正負記号を含む最大、最小であり、正記号は引張側、負記号は圧縮側になります。従って、圧縮側に大きな応力が生じる場合のように、絶対値では最小応力の方が最大応力よりも大きくなる場合があります。

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (2-42)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (2-43)$$

最大応力の方向 $\theta$ （X軸に対する角）は次式により算出します。

$$\theta = \frac{1}{2}\tan^{-1}\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (2-44)$$

$$\text{ただし、}\tau_{xy} \geq 0 \text{のとき、} 0 \leq \theta \leq \pi/2 \quad (2-45)$$

$$\tau_{xy} < 0 \text{のとき、} -\pi/2 < \theta < 0 \quad (2-46)$$

また、(2-42)式の右辺第2項が最大剪断応力 $\tau_{\max}$ となります。

注) 2次元平面以外の応力（ $\sigma_z$ 、 $\sigma_\theta$ 、 $\tau_{xz}$ など）が生じる問題タイプでは、それらを

含めて、 $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$ 、 $\tau_{\max}$ を算出します。

## 2.9 Mises応力の計算式

各問題タイプのMises応力の計算式を以下に示します。

### 1) 平面応力問題

$$\sigma_{\text{Mises}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_z^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad (2-47)$$

### 2) 平面歪み問題

$$\sigma_{\text{Mises}} = \sqrt{\frac{1}{2} \{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 6\tau_{xy}^2 \}} \quad (2-48)$$

### 3) 板の曲げ問題

$$\sigma_{\text{Mises}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)} \quad (2-49)$$

### 4) 軸対称問題

$$\sigma_{\text{Mises}} = \sqrt{\frac{1}{2} \{ (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + 6\tau_{rz}^2 \}} \quad (2-50)$$

## 2.10 傾斜拘束の処理方法

平面応力／歪みと軸対称体については、傾斜拘束も設定できるようにしています。図2-5に傾斜拘束の説明図を示します。同図では、XY座標を使用していますが、RZ座標でも同様です。同図のように、傾斜拘束とは、節点変位について、X軸、Y軸方向を拘束するのではなく、X軸からの傾斜角 $\theta_s$ の方向に移動するように拘束するものです。同図のように元のXY座標に対して、 $\theta_s$ だけ回転した座標軸をX'軸、Y'軸とします。X'Y'座標における変位ベクトル、荷重ベクトル等もすべて「'」を付けて表わすことにします。

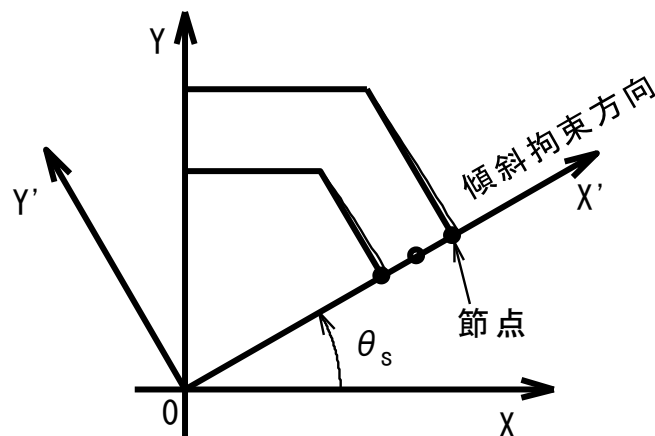


図2-5 傾斜拘束の説明図

傾斜拘束する各節点については、傾斜拘束のX'Y'座標系で剛性マトリックスをおよび節点荷重を表さねばなりません。なお、傾斜拘束する節点はいくつでも設定でき、その傾斜拘束方向 $\theta_s$ は複数あっても構いません。以下では、1つの節点について処理方法を

説明します。複数の節点に対しては、それを合成するだけです。

まず、XY座標系とX'Y'座標系の間には下記の関係があります。

$$\{\delta\} = [T]\{\delta'\} \quad (2-51)$$

$$\{F\} = [T]\{F'\} \quad (2-52)$$

ただし、 $\{\delta\}$ ：変位ベクトル・・・(2-16)式参照

$\{F\}$ ：荷重ベクトル。各変位方向の荷重。

$[T]$ ：座標変換マトリックス。本マトリックスは、転置行列が逆行列となる。

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s \\ \sin \theta_s & \cos \theta_s \end{bmatrix} \quad (2-53)$$

他方、剛性方程式は次式で表わされます

$$[K]\{\delta\} = \{F\} \quad (2-54)$$

ただし、 $[K]$ ：剛性マトリックス

(2-54)式に(2-51)式、(2-52)式を代入すると次のようになります。

$$[K][T]\{\delta'\} = [T]\{F'\} \quad (2-55)$$

$$\therefore [T]^T[K][T]\{\delta'\} = [T]^T[T]\{F'\} = \{F'\} \quad (2-56)$$

$$\therefore [K']\{\delta'\} = \{F'\} \quad (2-57)$$

$$\text{ただし、}[K'] = [T]^T[K][T] \quad (2-58)$$

また、(2-47)式から

$$\{F'\} = [T]^T\{F\} \quad (2-59)$$

従って、傾斜拘束節点に対しては、(2-59)式による節点荷重の変換、および(2-58)式による剛性マトリックスの変換を行なうことにより、傾斜拘束のX'Y'座標系の剛性方程式として(2-57)式が得られます。そして、傾斜拘束節点の剛性方程式を構造全体の剛性方程式に組み込みます。

構造全体の剛性方程式を解いたとき、傾斜拘束節点の変位はX'Y'座標系の変位 $\{\delta'\}$ になっています。その後で、(2-51)式によりXY座標系の変位 $\{\delta\}$ に戻します。そして、XY座標系の変位 $\{\delta\}$ により応力計算を行ないます。

注) 上記では1つの傾斜拘束節点ということで説明しましたが、実際の解析計算では構造全体でまとめた座標変換マトリックスを使用します。従って、1つの拘束節点の座標変換を組み入れたものは、次式のような形態となります。

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & & \\ & \cdot & & & & & & & \\ & & \cdot & & & & & & \\ & & & \cdot & & & & & \\ & & & & \cos \theta_s & -\sin \theta_s & & & \\ & & & & \sin \theta_s & \cos \theta_s & & & \\ & & & & & & \cdot & & \\ & & & & & & & \cdot & \\ & & & & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (2-60)$$



### 第3章 プログラムの機能・構成

#### [VBプロジェクト名] FEM2D

表3-1に本ソフトの解析機能を示します。同表のように、4種類の問題タイプに対応できます。一般によく適用されるタイプは、「平面応力」および「軸対称体」です。また、「板の曲げ」を除く各タイプで大変形問題にも対応できます。

表3-1 「FEM2D」解析機能

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

注) いずれも弾性変形内とし、また初期歪みは扱わない。

本ソフトの立ち上げ画面は、図3-1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断面データ」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。ただし、問題タイプの変更は、「解析データ」のサブメニュー「データ入力・修正」で実施します。また、「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。

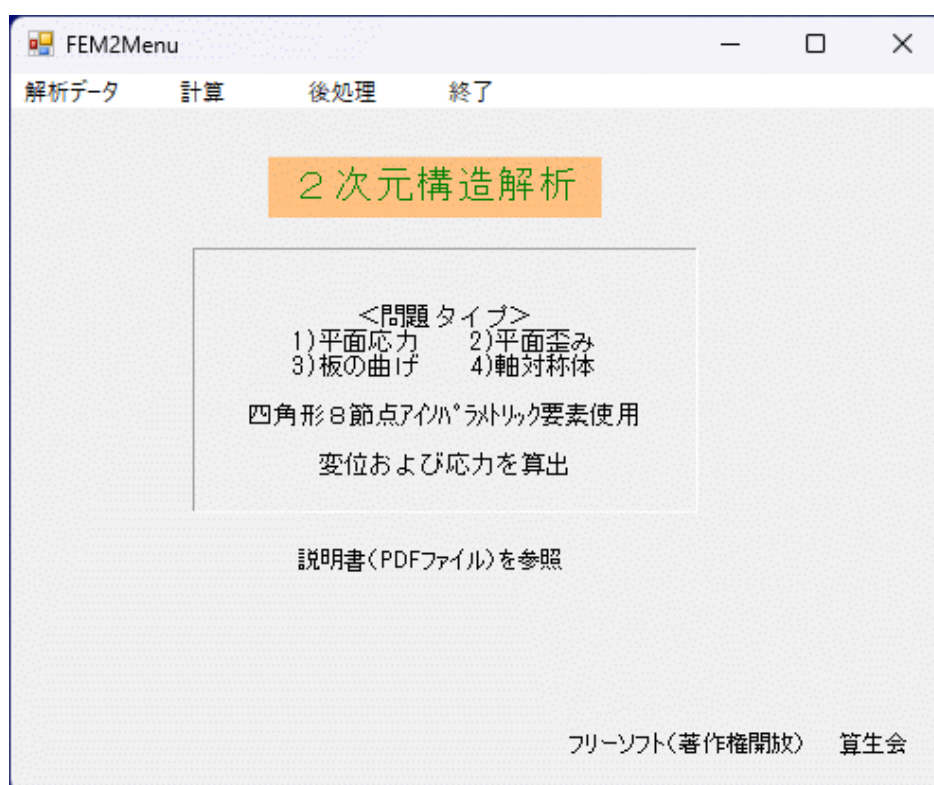


図3-1 「FEM2D」ソフトのメニュー画面

次に、図3-2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FEM2Menu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。ただし、本図には示していませんが、いくつかのプログラム部分で一時記憶ファイル（ファイル拡張子「.tmp」）も使用しています。これらデータファイルはいずれもテキスト形式であり、エディターや表計算ソフトで閲覧・印刷することができます。

表3-2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FEM2Dat1～3は、各種データを画面入力するためのものです。特にFEM2Dat2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り替えにより入力できるようにしています。

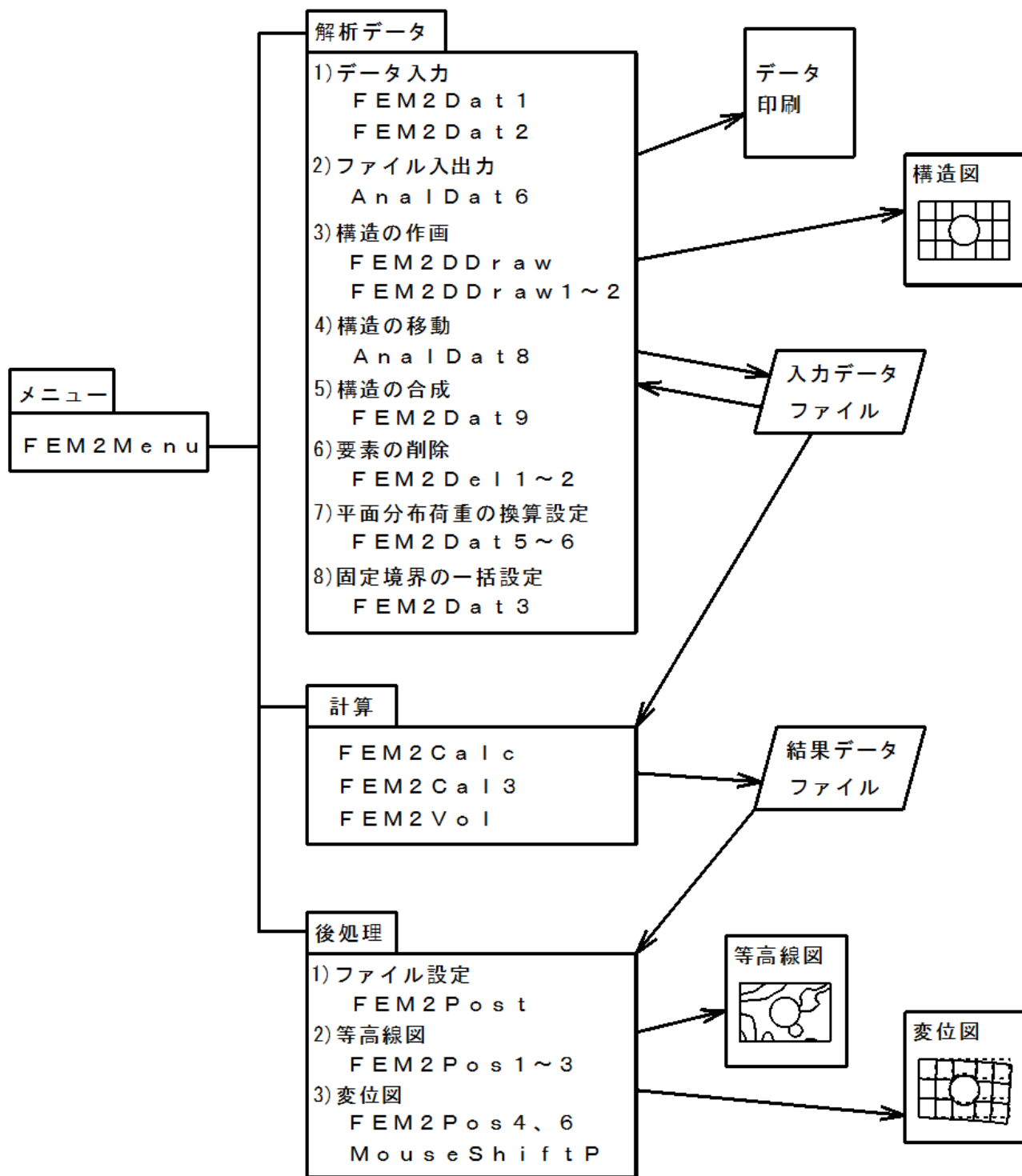


図3-2 「FEM2D」ソフトのプログラム構成

表3-2 「FEM2D」ソフトのファイルリスト

[全般]

ファイル名	内 容
FEM2Com. vb	共通変数の宣言とサブルーチンの定義
FEM2Menu. vb	メニューの提示・選択

[解析データ]

ファイル名	内 容
FEM2Dat1. vb	データ仕様の入力
FEM2Dat2. vb	各データの入力
AnalDat6. vb	データファイルの入出力
AnalDat8. vb	構造の移動
FEM2Dat3. vb	固定境界の一括設定
FEM2Dat5. vb	矩形平面荷重の換算設定（板の曲げ）
FEM2Dat6. vb	円形平面荷重の換算設定（板の曲げ）
FEM2Dat9. vb	構造の合成
FEM2DDraw. vb	構造の作画
FEM2DDraw1. vb	構造図で入力データ項目の選択
FEM2DDraw2. vb	構造図でデータの入力
FEM2Del1. vb	要素の削除数の入力と削除の実行
FEM2Del2. vb	要素削除の要素指定

[計算]

ファイル名	内 容
FEM2Calc. vb	計算に使用するファイルの設定
FEM2Cal3. vb	解析計算の実行
FEM2Vol. 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
FEM2Post. vb	後処理に使用するファイルの設定
FEM2Pos1. vb	等高線作画の変数の指定
FEM2Pos2. vb	等高線図の仕様設定
FEM2Pos3. vb	等高線図の作画実行
FEM2Pos4. vb	変位図の作画実行（板の曲げ）
FEM2Pos6. vb	変位図の作画実行
MouseShiftP. vb	マウス回転操作の説明（板の曲げ）

## 第4章 自動メッシュのデータの作り方

本章は「FEM断面データ」ソフトに属するものですが、参考のため、重複して説明します。

自動メッシュでは、最初に断面形状の元データを作成します。元データとは、形状を規定するデータのことです。この元データは、断面内のXY座標で設定します。座標軸の向きは、X軸が右方向、Y軸が上方向となる一般座標系です。また、軸対称体の場合は、R、Z軸をX、Y軸に当てはめます。

断面形状は外形と穴によって規定され、元データはそれらを構成する各線分によって表わします。本ソフトでは、各線分は直線線分か円弧線分の2種類を使用します。また、円弧線分は半円以下に限定しており、それ以上の円弧や全円は、2つの円弧線分に分割します。直線線分は両端の2点で、円弧線分は片方の端点、中間点、他方の端点の計3点で定義します。ただし、円弧の中間点は、円弧のある側を示す目的なので、中央点でなくても構いません。

具体例として、図4-1に示す簡単な形状で説明します。同図では、外形が長方形になっており、①～④の4つの線分で表わされます。そして、たとえば線分①は点1と点2で定義します。他方、中央に円形の穴が空いており、その円は、2つの円弧（半円）⑤と⑥で表わします。そして、たとえば円弧⑤は点5、点6、点7で定義します。線分や点の番号は任意に付番してよいですが、欠番があってはなりません。なお、外形線分の定義点（円弧の中間点を除く）は、自動メッシュ生成の際、優先的に節点として選択されます。それ故、外形の特定の点を荷重点などに設定したい場合は、同点を線分定義点とし、1つの線分を複数線分に分けても構いません。

〔備考〕①自動メッシュによらず、人手で要素分割を行なって次節の構造データを作成することもできます。

②複雑な断面形状で自動メッシュではうまく行かないことがあれば、適宜メッシュデータを修正するか、断面を複数に分割してメッシュ生成してください。

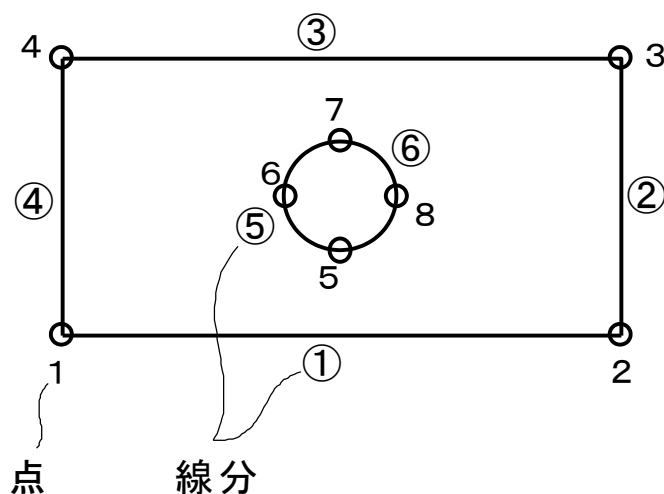


図4-1 線分による形状定義例

## 第5章 構造データの作り方

一般には前節の自動メッシュを利用しますので、人手で構造データを作成することはまれと思われます。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、大半が「FEM断面データ」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、境界条件等の設定についても説明します。

構造データは平面応力／ひずみ、板の曲げおよび軸対称体の各問題タイプで異なりますが、基本的なところは同じです。従って、各タイプに共通な形で説明し、タイプにより異なる所はその都度 補足説明することとします。

使用する要素は前掲の図1-1に示す四角形8節点アイソパラメトリック要素です。なお、ガウス積分点数は9ですが、データ上では1軸当りの3となります。

以降では、図5-1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。

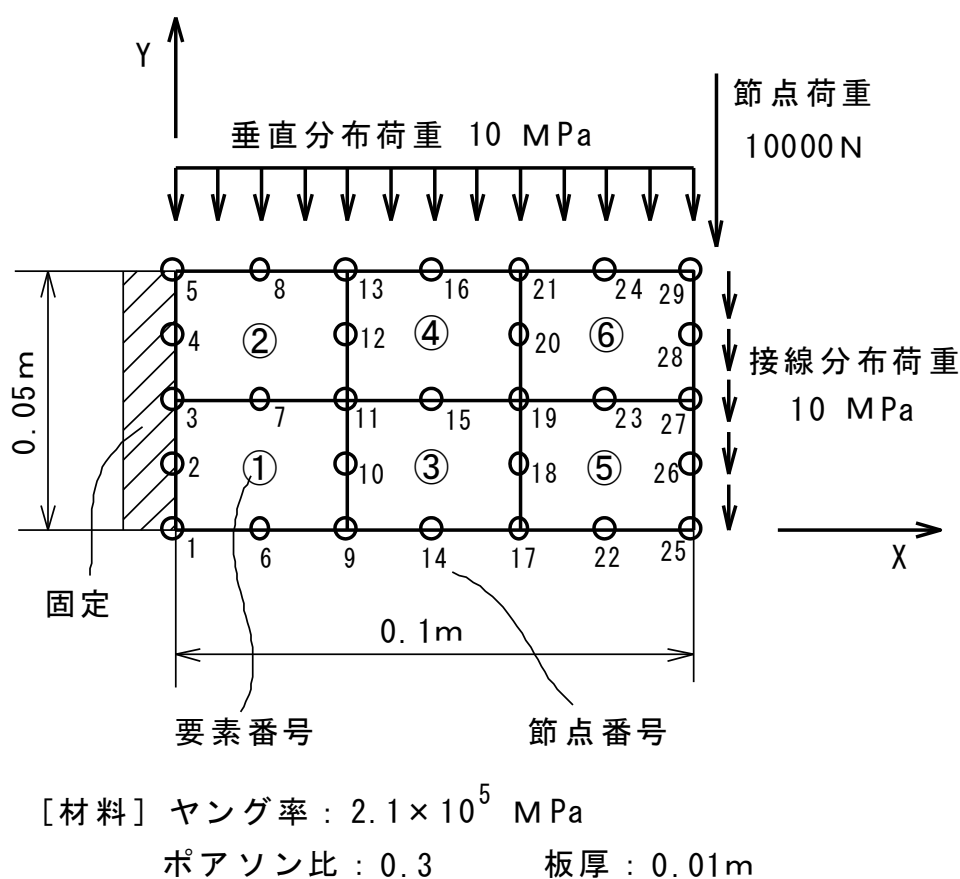


図5-1 テスト用構造モデル

1) 先ず構造を平面図に描きます。

①平面図には、座標軸も明記します。座標軸は、図5-2、5-3のように問題タイプにより異なります。

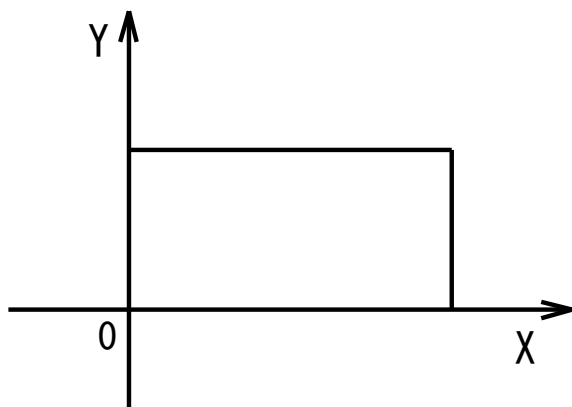


図5-2 平面応力／歪みと  
板の曲げの平面図

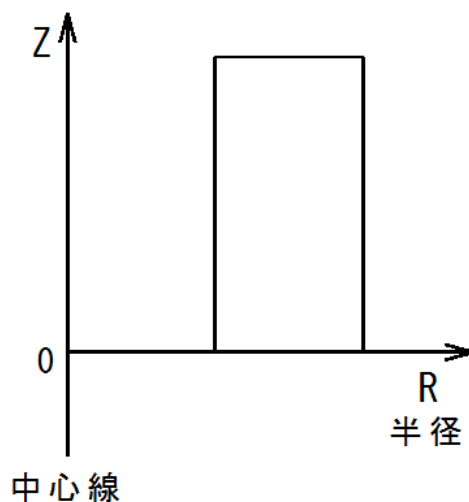


図5-3 軸対称体の平面図

- ②要素数を少なくするため、対称な形状の場合は、一対称部分のみを用いるのが有利です。たとえば、図5-4の対称形状の場合、材料、荷重、拘束条件なども対称であるならば、斜線の部分だけを計算すれば済みます。

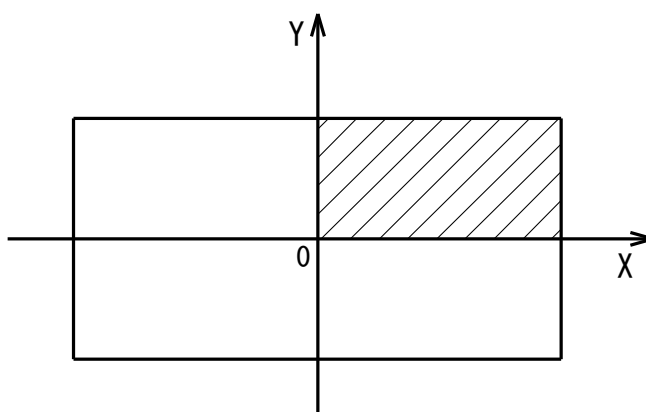


図5-4 対称形状の構造

2) 自動メッシュの場合は、「FEM断面データ」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、構造を四角形要素に分割し、各要素に所定の節点を設けます。

- ①構造すべてを適当な大きさの四角形に分割します。四角形の辺は直線でも曲線（円弧）でも構いません。また、形状は三角形であって、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。四角形の大きさは、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。自動メッシュでない場合、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。
- ②当然のことながら、1つの要素は同一材料（含板厚など）でなければなりません。

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。

節点番号は、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。そうすれば、バンド幅を最小にできます。

なお、本ソフトでは解析計算実行時に、節点順序の改良を実施してバンド幅を低減する処理を行なっています。従って、上記の節点順序の入力について特に注意しなくて構いません。

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。

すべての四角形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、「FEM断面データ」ソフトに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) 拘束条件（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。図5-5に各解析タイプの座標軸と変位の向きを示しておきます。

①構造が勝手に移動しないように、各座標軸方向を拘束しなければなりません。

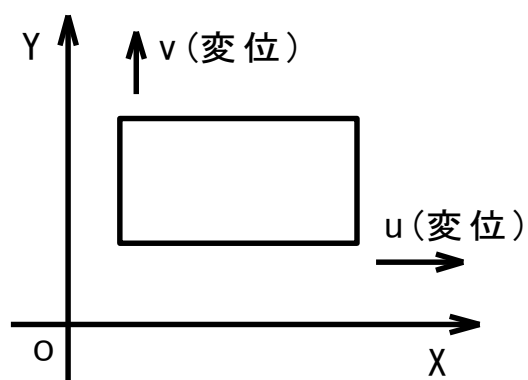
◇軸対称体で中心軸節点のR方向は、本ソフトでは解析計算時に自動的に0変位にしているので、入力データで拘束設定しなくても構いません。また、中心軸以外の節点のR方向は、リングとして釣り合うので、強制拘束以外は拘束しません。

②変位の指定量を0以外にすると、その量の強制変位となります。

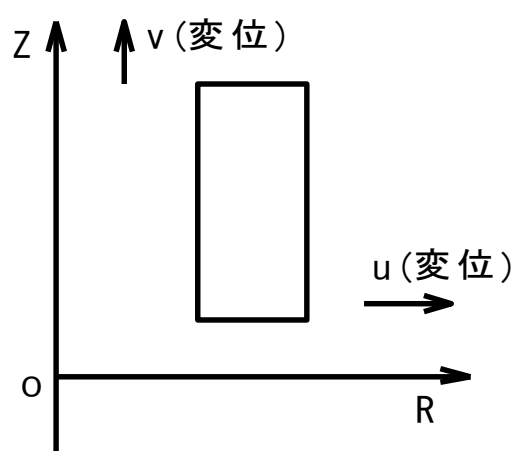
③もし、図5-1のモデルを板の曲げに用いて、四隅を単純支持した場合、節点1、5、25、29の撓み $w$ を0に拘束します。

④本ソフトでは傾斜拘束も可能で、図5-6にその説明図を示します。同図のように、X軸またはR軸からの角度 $\theta_s$ により傾斜拘束方向を指定します。傾斜拘束の節点では、変位は傾斜方向のみとなります。ただし、板の曲げでは、傾斜拘束はありません。

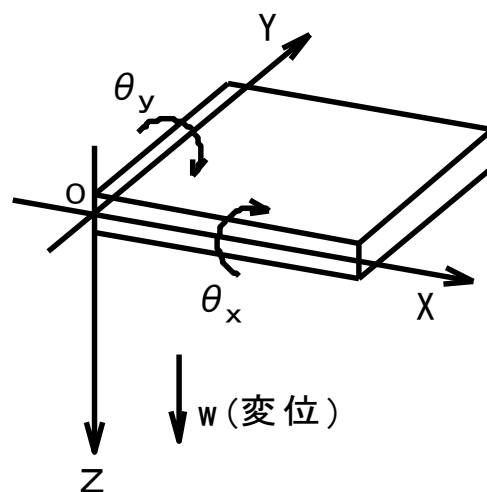




(a) 平面応力／歪み



(c) 軸対称体



(b) 板の曲げ

図5-5 座標軸と変位の向き

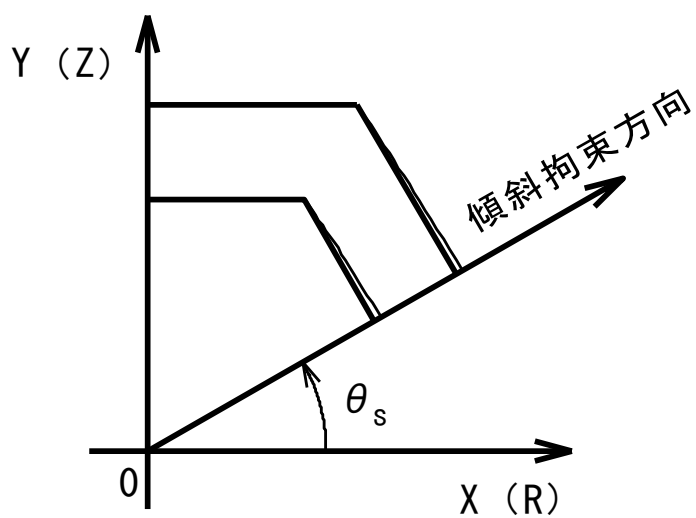


図5-6 傾斜拘束の説明図

7) 荷重条件を決めます。

表5-1に荷重と各構造の組合せを示します。

◇荷重はすべてまとめて計算するので、荷重条件を分けて計算したい場合は別のデータファイルとします。この別のデータファイルは、元のデータを修正して容易に作成できます。

表5-1 荷重と各構造の組合せ

荷重種類 構造タイプ	節点荷重、 座標位置荷重	分布荷重	自重 (地震荷重を含む)	回転遠心力
平面応力／歪み	X方向の力 Y方向の力	要素辺の垂直荷重 " 接線荷重 (単位面積当り)	X方向に任意倍率 Y方向に任意倍率 (正負とも可)	(なし)
板の曲げ	Z方向の力 $\theta_x$ 方向のモーメント $\theta_y$ 方向のモーメント	要素面のZ方向 垂直荷重 (単位面積当り)	Z方向に任意倍率 (正負とも可)	(なし)
軸対称体	R方向の力 Z方向の力 (全周分)	要素辺の垂直荷重 " 接線荷重 (単位面積当り)	Z方向に任意倍率 (正負とも可)	軸回転数による R方向の質量 遠心力

注) ①節点荷重、座標位置荷重の正負の向きは変位と同じで、図5-5(a)～(c)に正の向きを矢印で示す。

②要素辺の分布荷重の正の向きを図5-7に矢印で示す。

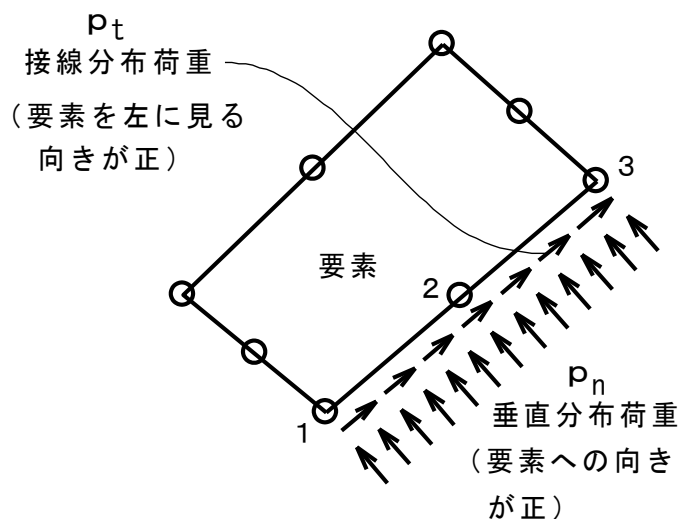


図5-7 要素辺の分布荷重の向き（平面応力／歪み、軸対称体）

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、板の曲げの場合、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、板の曲げでは、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。

#### 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（板の場合は回転を含む）方向に与えます。ただし、同じ変位について、6) 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）。なお、傾斜拘束節点に対しては、バネ支持できません。

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。

$$f = k \cdot u + f_s \quad (5-1)$$

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(5-1)式と同様に $k$ と $f_s$ を設定します。また、2節点共、6) 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よいですが、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5-2に単位系の例を示しておきます。

表5-2 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>2</sup>	kgf/mm <sup>2</sup>
力	N	kgf
分布荷重	Pa (=N/m <sup>2</sup> )	kgf/mm <sup>2</sup>
モーメント	N・m	kgf・mm
応力	Pa (=N/m <sup>2</sup> )	kgf/mm <sup>2</sup>
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。

#### 11) 構造モデルの移動

本ソフトでは、一旦作成した構造モデルを、原点回りに回転したり、X、Y軸方向に平行移動することができます。従って、最初はあるべく座標軸に平行でわかりやすい外形位置でモデルを作成し、その後で本来の位置に移動させたり、次項の構造の合成に利用すると便利です。

#### 12) 構造の合成

本ソフトでは1つの構造モデルに別の構造モデルを合成して、新たな構造モデルを生成することができます。また、この操作を繰り返して、いくつでも構造モデルを合成することができます。

〔構造の合成方法〕

- ①2つの構造を組合せます。
- ②片方の構造をベース構造、他方を追加構造と呼びます。
- ③ベース構造の要素および節点はそのまま保持されます。
- ④2つの構造で同一の座標位置の節点どうしを重ね合わせます。
  - ◇節点どうしを重ね合わせたときに、要素が正しく接続されるように配慮しておく必要があります。
  - ◇合成の際に、追加構造を平行・回転移動させることも可能です。
- ⑤追加構造の要素番号と節点番号は、ソフト内で自動的に付番し直します。

上記の合成方法で、最も問題になるのは④の節点座標位置です。図5-8に構造の合成の説明図を示します。同図で、構造1と構造2を合わせて、右側の合成構造を生成するものとします。その際、構造1と構造2の結合境界では、節点数および寸法が同一でなくてはなりません。もし自動メッシュにより構造1や構造2を生成する場合は、結合境界で要素どうしが正しく接続されるようにメッシュ数等を設定しておきます。もし自動メッシュだけではうまく行かないときは、後で結合境界の要素について人手で調整する必要があります。

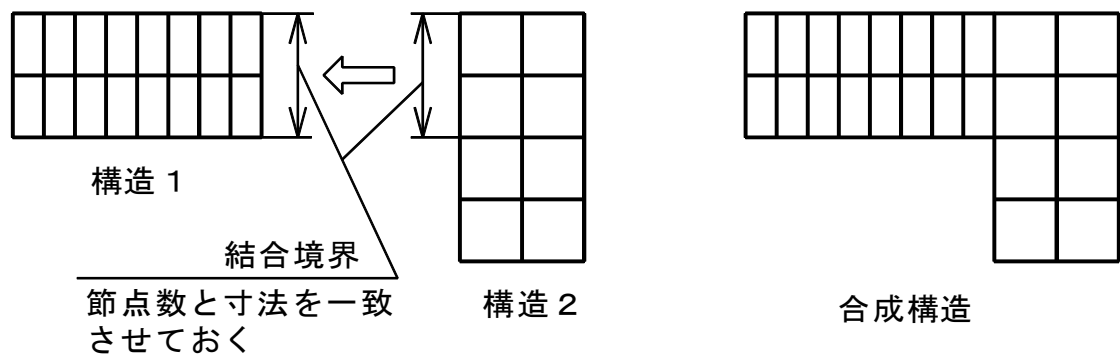


図5-8 構造の合成の説明

## 第6章 「解析データ」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「解析データ」のサブメニュー選択画面を図6-1に示します。同図に示すように、13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。

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。

◇「FEM断面データK」ソフトによる本解析用データファイルを読み込みます。

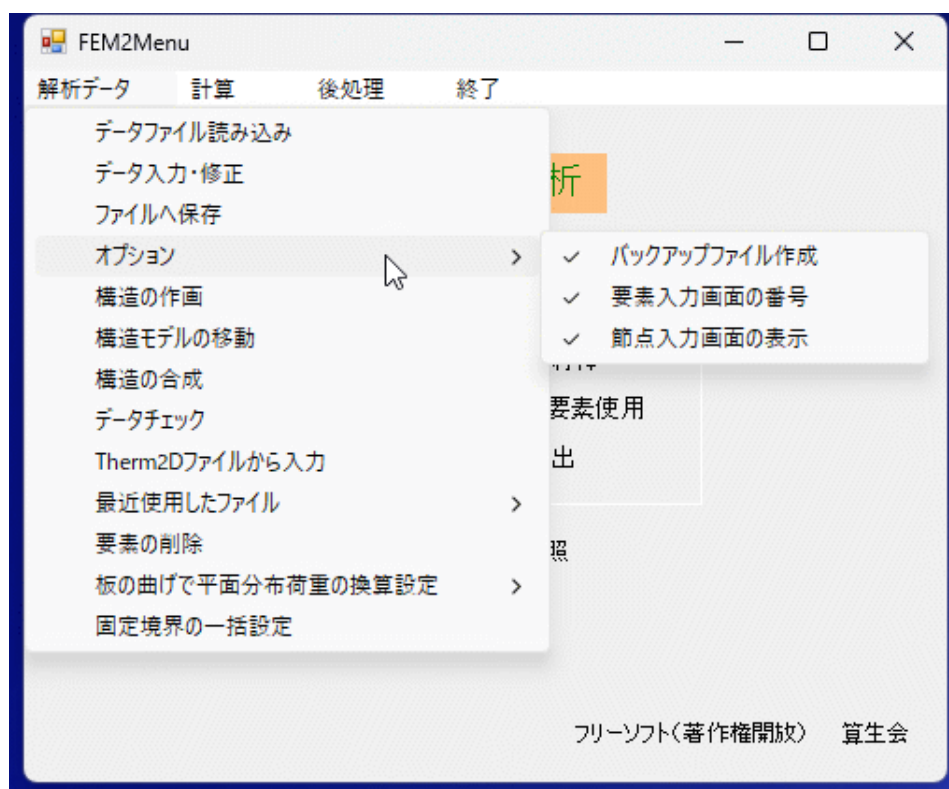


図6-1 「解析データ」サブメニュー画面

### 6.2 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。

### 6.3 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6-2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6-2では図5-1の例題を取り上げており、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問題のタイプは、4種類の内からいずれかを選択します。
- ③節点数～傾斜拘束節点数は、各構造モデルに応じた数を入力します。なお、拘束のない構造は存在しないので、拘束節点数は1以上でなければなりません。  
 ◇軸対称体の中心節点のR方向拘束は、解析計算時に自動的に0変位にしているので、拘束しなくても構いません。
- ④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。
- ⑤問題のタイプで「軸対称体」を選択した場合は、図6-3の画面となります。同画面では、回転遠心力について「なし」か「有り」を選択します。  
 ◇回転遠心力の「有り」を選択した場合は、回転数（単位時間当り）と重力加速度を入力します。
- ⑥本画面の「設定」ボタンをクリックすると、要素データ入力画面に移ります。
- ⑦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。

データを入力してください。

タイトル

問題のタイプ

- ☒ 平面応力
- ☐ 平面歪み
- ☐ 板の曲げ
- ☐ 軸対称体

節点数       要素数

拘束節点数       材料データ数

荷重節点数       座標位置荷重数

表面分布荷重数

パネ支持個数

傾斜拘束節点数

自重の有無(0:なし、1:有り)

図6-2 データ仕様入力画面

図6-3 データ仕様入力画面（軸対称体の場合）

#### 6.4 要素データ入力画面（オプションで省略可能）

図6-4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から節点順8までは、各要素の節点番号8個を、必ず頂点節点を最初に、かつ左回りの順に（節点の入力順に辺を進んだ時いつも左側に要素があるように）入力します。 例）図6-5の入力順は、1、4、6、7、8、5、3、2（どの頂点が先頭でも可）

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節点データ入力画面に移ります。



FEM2Dat2

要素データの入力

[要素の節点順] 頂点節点が最初で、要素を左側に見る順序

	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
▶	1	1	1	6	9	10	11
	2	1	3	7	11	12	13
	3	1	9	14	17	18	19
	4	1	11	15	19	20	21
	5	1	17	22	25	26	27
	6	1	19	23	27	28	29
*							

設定 戻る コピー 貼り付け 取り消し

図6-4 要素データ入力画面

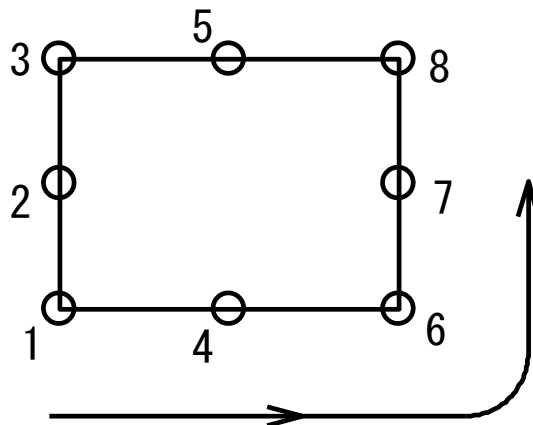


図6-5 要素の節点番号の入力順序（左回り）

#### 6.5 節点データ入力画面（オプションで省略可能）

図6-6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。
- ②四角形要素辺の中間節点は、辺が直線ならば、後で「中間節点自動計算」を実施できるので、座標を入力しなくても構いません。ただし、辺が円弧等の曲線の場合は、「中間節点自動計算」の後で、本画面で中間節点座標を修正します。
- ③「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。

- ④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拘束節点データ入力画面に移ります。

節点番号	X座標	Y座標
1	0	0
2	0	.0125
3	0	.025
4	0	.0375
5	0	.05
6	.01666667	0
7	.01666667	.025
8	.01666667	.05
9	.03333334	0
10	.03333334	.0125
11	.03333334	.025
12	.03333334	.0375
13	.03333334	.05
14	.05	0
15	.05	.025

図6-6 節点データ入力画面

## 6.6 拘束節点データ入力画面

図6-7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。

◇「板の曲げ」の場合は、 $\theta X$ と $\theta Y$ の強制変位も設定できますが、それらはラジアン単位となります。

注）傾斜拘束設定の角度単位が $^\circ$ であるのと間違わないでください。 $\theta X$ と $\theta Y$ をラジアン単位としているのは、解析結果の $\theta X$ と $\theta Y$ がラジアン単位であるのに合わせたためです。

- 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。

拘束節点データの入力

節点番号に-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	節点番号	X拘束	δX	Y拘束	δY
▶	1	1	1	0	1	0
	2	2	1	0	1	0
	3	3	1	0	1	0
	4	4	1	0	1	0
	5	5	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6-7 拘束節点データ入力画面

## 6.7 材料データ入力画面

図6-8に材料データ入力画面を示します。

- ①材料のヤング率，ポアソン比，厚さ，比重量を入力します。

◇比重量は、自重有りの場合、または軸対称体で回転遠心力有りの場合に有効となります。そうでない場合は、比重量を入力しても無視され、後で0に変換されます。

◇軸対称体の場合は、厚さの入力はありません。

- ②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次の画面に移ります。

## 6.8 節点荷重データ入力画面

本入力は、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6-9に節点荷重データ入力画面（平面応力／歪み）を示します。

- ①荷重節点数の分だけ荷重番号が表示されているので、それぞれ節点番号と各軸方向の荷重を入力します。

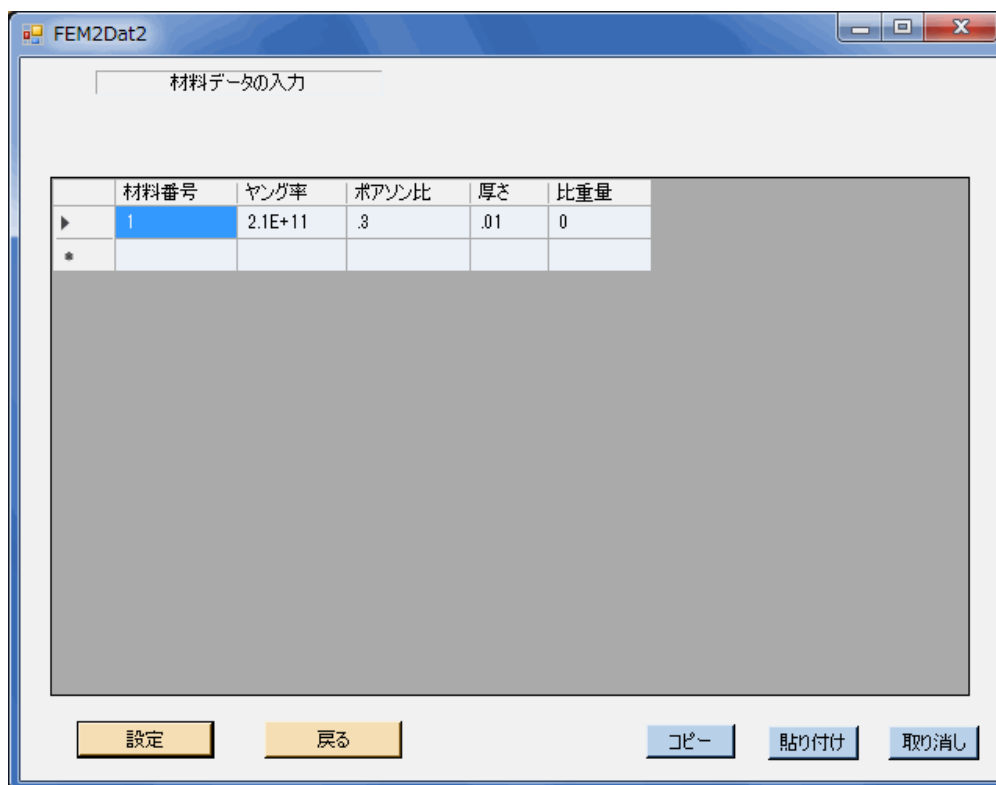
◇板の曲げの場合は、モーメントも入力できます。

- 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」

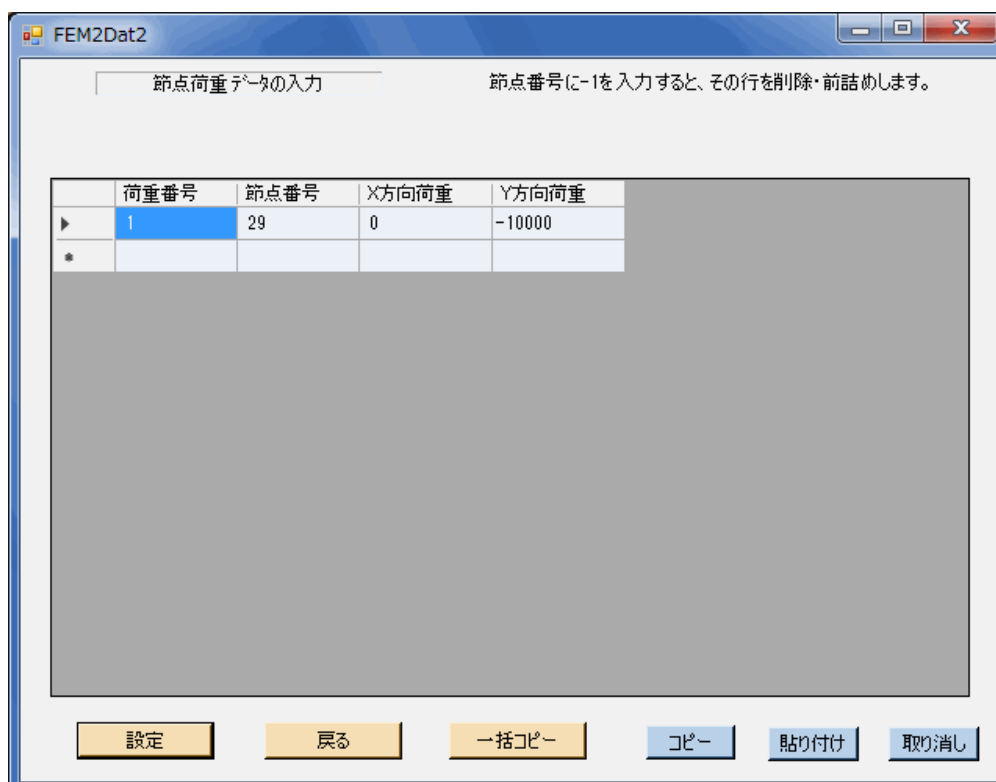
ボタンをクリックして、まとめて実施できます。ただし、節点番号はコピーされません。

- 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。



材料番号	ヤング率	ポアソン比	厚さ	比重量
1	2.1E+11	.3	.01	0
*				

図6-8 材料データ入力画面



荷重番号	節点番号	X方向荷重	Y方向荷重
1	29	0	-10000
*			

図6-9 節点荷重データ入力画面（平面応力／歪み）

## 6.9 座標位置荷重データ入力画面

本入力は、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6-10に座標位置荷重データ入力画面（平面応力／歪み）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座標と各軸方向の荷重を入力します。
  - ◇軸対称体では、X、Yの代わりにR、Zになります。
  - ◇板の曲げの場合は、モーメントも入力できます。
- ②最初の座標（本例では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。

荷重番号	X座標	Y座標	X方向荷重	Y方向荷重
1	.04	.02	8000	-4000
*				

図6-10 座標位置荷重データ入力画面（平面応力／歪み）

## 6.10 表面分布荷重データ入力画面

本入力は、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6-11に表面分布荷重データ入力画面を示します。ただし、「板の曲げ」の場合は図6-12の画面となります。

- ①図6-11の画面では、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、それぞれ辺の節点番号3個と垂直分布荷重および接線分布荷重を入力します。  
◇辺の節点番号3個は必ず要素を左側に見る順序で入力します（図6-5に示した要素の節点番号入力順序と同様）。  
◇垂直分布荷重と接線分布荷重はいずれも単位面積当りの力を入れます。
- ②図6-11の画面で、節点1 番号に「-1」を入力すると、その行を削除して前詰めします。
- ③図6-12の「板の曲げ」の画面では、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、それぞれ要素番号と垂直分布荷重を入力します。  
◇垂直分布荷重は、要素の面でw変位方向（下向き）が正となり、単位面積当りの力を入れます。
- ④図6-12の画面で、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。
- ⑤1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。
- ⑥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。

荷重番号	節点1 番号	節点2 番号	節点3 番号	垂直分布荷重	接線分布荷重
1	13	8	5	1E+07	0
2	21	16	13	1E+07	0
3	29	24	21	1E+07	0
4	27	28	29	0	-1E+07
5	25	26	27	0	-1E+07
*					

図6-11 表面分布荷重データ入力画面

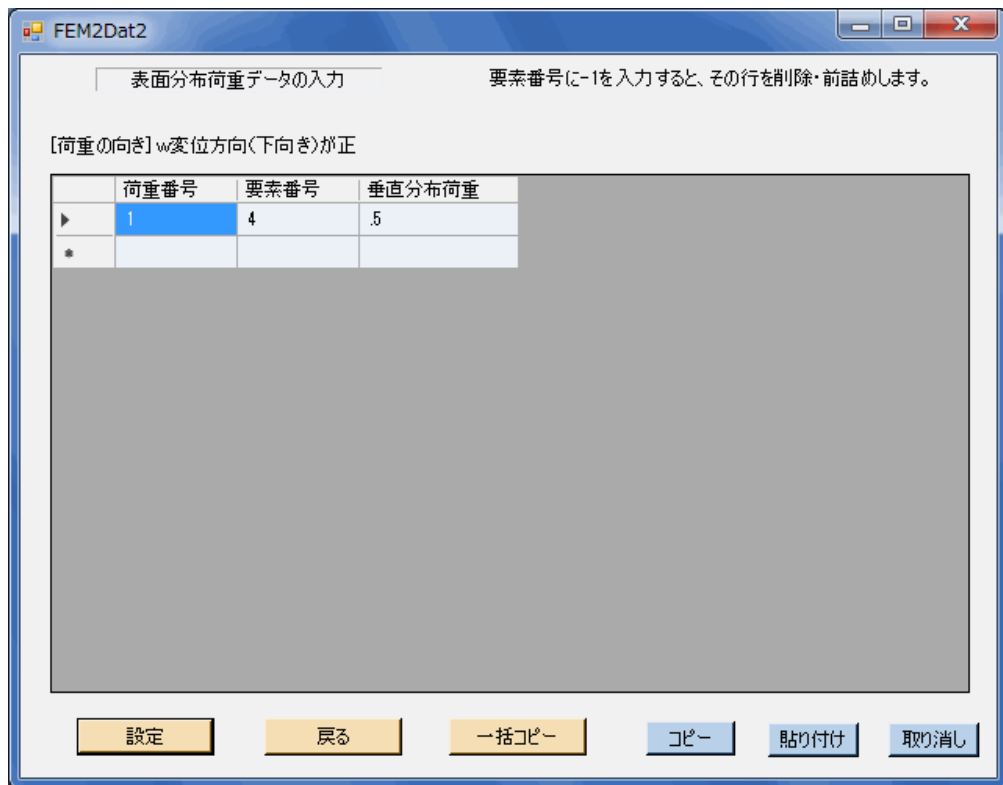


図6-12 表面分布荷重データ入力画面（板の曲げの場合）

#### 6.11 バネ支持データ入力画面

本入力は、バネ支持がある場合（バネ支持個数が1以上）にのみ実施します。図6-13にバネ支持データ入力画面を示します。ただし、「板の曲げ」の場合は図6-14の画面になります。

- 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5章の(5-1)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）。
  - ◇図6-14の「板の曲げ」の画面では、節点間バネがないので節点番号は1つだけの表示となります。また、 $\theta x$ 、 $\theta y$ 方向をそれぞれ $x_r$ 、 $y_r$ で表示しています。
- 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。

FEM2Dat2

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KxとFsxに入力(節点番号1基準)。  
 [Kx等]バネ定数(正方向単位変位当たりの力で負数) [Fsx等]初期バネ力(正方向の力)

	No.	節点番号1	節点番号2	Kx	Fsx	Ky	Fsy
▶	1	25	0	0	0	-2E+07	5000
*							

設定 戻る 一括コピー コピー 貼り付け 取り消し

図6-13 バネ支持データ入力画面

FEM2Dat2

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

[Kz等]バネ定数(正方向単位変位当たりの力で負数) [Fsz等]初期バネ力(正方向の力)

	No.	節点番号	Kz	Fsz	Kxr	Fsxr	Kyr	Fsyr
▶	1	48	-2000	-200	0	0	0	0
*								

設定 戻る 一括コピー コピー 貼り付け 取り消し

図6-14 バネ支持データ入力画面(板の曲げの場合)



## 6.12 傾斜拘束節点データ入力画面

本入力は、傾斜拘束がある場合（傾斜拘束節点数が1以上）にのみ実施します。

図6-15に傾斜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傾斜角度を入力します。  
◇傾斜角度は、X軸（またはR軸）正方向からの左回転角を°単位で入力します。
- 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つの傾斜拘束番号のデータを他の傾斜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すべての傾斜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、次の画面に移ります。

図6-15 傾斜拘束節点データ入力画面

## 6.13 自重倍率データ入力画面

本入力は、自重がある場合にのみ実施します。また、材料データに比重量を入力しておく必要があります。図6-16に自重倍率データ入力画面（平面応力／歪みの場合）を示します。

- ①各座標軸方向の自重倍率を入力します。  
◇「板の曲げ」の場合はW方向、「軸対称体」の場合はZ方向のみです。  
◇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わったら「設定」ボタンをクリックして、図6-2または図6-3のデータ仕様入力画面に戻ります。

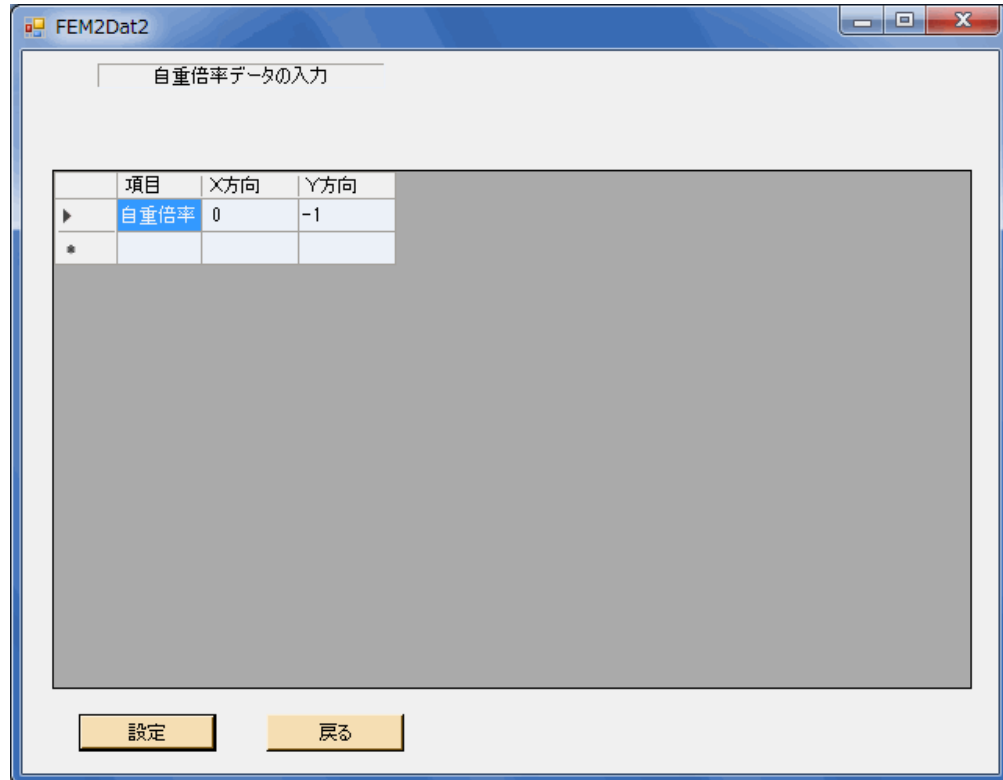


図6-16 自重倍率データ入力画面（平面応力／歪みの場合）

#### 6.14 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。

◇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6-17に入力データファイル例を示します。

```

プログラム名, FEM2D
片持ち梁モデル (幅0.05m×長さ0.1m×厚さ0.01m)
問題のタイプ, 1
節点数, 29
要素数, 6
拘束節点数, 5
材料データ数, 1
荷重節点数, 1
座標位置荷重数, 0
表面分布荷重数, 5
バネ支持個数, 0
傾斜拘束節点数, 0
自重の有無 (0:なし、1:あり), 0
回転遠心力の有無 (0:なし、1:あり), 0
ガウス積分点数, 3
1節点当り変数の数, 2
材料データの成分数, 4
要素データ (要素番号、材料番号、8節点番号)
1, 1, 1, 6, 9, 10, 11, 7, 3, 2
2, 1, 3, 7, 11, 12, 13, 8, 5, 4
3, 1, 9, 14, 17, 18, 19, 15, 11, 10
4, 1, 11, 15, 19, 20, 21, 16, 13, 12
5, 1, 17, 22, 25, 26, 27, 23, 19, 18
6, 1, 19, 23, 27, 28, 29, 24, 21, 20
節点データ (節点番号、X座標、Y座標)
1, 0, 0
2, 0, .0125
3, 0, .025
4, 0, .0375
5, 0, .05
6, .01666667, 0
7, .01666667, .025
8, .01666667, .05
9, .03333334, 0
10, .03333334, .0125
11, .03333334, .025
12, .03333334, .0375
13, .03333334, .05
14, .05, 0
15, .05, .025
16, .05, .05
17, .06666667, 0
18, .06666667, .0125
19, .06666667, .025
20, .06666667, .0375
21, .06666667, .05
22, .08333334, 0
23, .08333334, .025
24, .08333334, .05

```

図6-17 (1/2) 入力データファイル例

25,	.1,	0
26,	.1,	.0125
27,	.1,	.025
28,	.1,	.0375
29,	.1,	.05
拘束節点データ (拘束番号、節点番号、X拘束、 $\delta X$ 、Y拘束、 $\delta Y$ )		
1,	1, 1, 0,	1, 0
2,	2, 1, 0,	1, 0
3,	3, 1, 0,	1, 0
4,	4, 1, 0,	1, 0
5,	5, 1, 0,	1, 0
材料データ (材料番号、ヤング率、ポアソン比、厚さ、比重量)		
1,	2.1E+11,	.3, .01, 0
荷重節点 (荷重番号、節点番号、X方向荷重、Y方向荷重)		
1,	29,	0, -10000
表面分布荷重 (表面荷重番号、3 節点番号、垂直方向分布荷重、接線方向分布荷重)		
1,	13,	8, 5, 1E+07, 0
2,	21,	16, 13, 1E+07, 0
3,	29,	24, 21, 1E+07, 0
4,	27,	28, 29, 0, -1E+07
5,	25,	26, 27, 0, -1E+07

図6-17 (2/2) 入力データファイル例

## 6.15 構造の作画

サブメニューの「構造の作画」を選択すると、構造図が画面に作画されます。図6-18に構造作画の画面例を示します。同図は本画面に移った状態のもので、作画のパラメーターは標準条件になっています。

- ①複数材料の場合は、材料別に色分けして表示されます。
- ②本画面の左側に、「番号表示の項目」その他のパラメーターを表示してあります。これらのパラメーターを変更することができます。変更した後は、「再描画」ボタンをクリックすると、新しいパラメーター条件による作画画面に変更されます。
- ③「標準・全画面切換」ボタンをクリックすると、標準画面と全画面を切り換えることができます。また、画面Formの右下コーナー等をマウスドラッグすることにより、標準画面と全画面の間で自由に拡大・縮小できます。
- ④マウス中ボタン、ホイールにより移動、拡大・縮小を行なうことができます。中ボタンを押したまま動かせば図形を移動できます。また、ホイールの回転により拡大・縮小ができます。
- ⑤マウスドラッグ矩形により、構造図の一部を拡大できます。

◇マウスドラッグ矩形は、拡大したい部分の左上隅にマウスを移動し、そこでマウスの左ボタンを押し、その左ボタンを押した状態で拡大部分の右下隅までマウスを移動させ、そこで左ボタンを離します。そうしますと、図6-19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？」と問ってきます。そこで、「はい」を選択すると、選択領域が拡大されて

表示されます。

◇上記の選択領域に関しては、要素全体（8 節点）が選択領域に入っている要素だけがすべて拡大の対象となります。

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

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

◇「番号表示の文字サイズ」は任意の値に設定できます。

◇「要素番号」、「節点番号」、「材料番号」をすべて選択して、「再描画」させた部分拡大画面を図6-20に示します。ただし、本画面では、「番号表示の文字サイズ」を12に変更してあります。

- ⑦「条件設定部の表示」は、「拘束節点（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。「拘束節点（緑色）」では傾斜拘束節点も表示されます。なお、自重については除外しています。

◇選択した項目がカラーで表示されます。図6-21に「拘束節点（緑色）」と「荷重部分（赤色）」を表示した構造図を示します。

- ⑧任意の要素を右クリックすると、図6-22のように当該要素の各番号が表示されます。

◇ESCキーを押すと上記の番号表示が解除されます。

- ⑨「データ設定モード」を選択して、任意の要素を右クリックすると図6-23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。

◇図6-23において、データ項目「傾斜拘束節点」は板の曲げには適用されません。

◇図6-23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6-24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6-24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。

- ⑩繰り返して描画を実施した場合、「前の描画」ボタンをクリックすると1つずつ前の描画にさかのぼることができます。

◇さかのぼれる描画の数は最大8つです。

- ⑪「Ctrlキー+マウス」で矩形ドラッグすると、図6-25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、要素辺、または節点の任意の領域となります。ただし、要素辺は外周の辺（穴の辺を含む）に限定されます。

◇図6-25において、データ項目「傾斜拘束節点」は板の曲げには適用されません。

◇条件項目に必要な要素・辺・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。

◇図6-25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6-26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、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6-26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6-27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。

- 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6-18 構造作画の画面例



図6-19 構造作画における拡大領域選択例

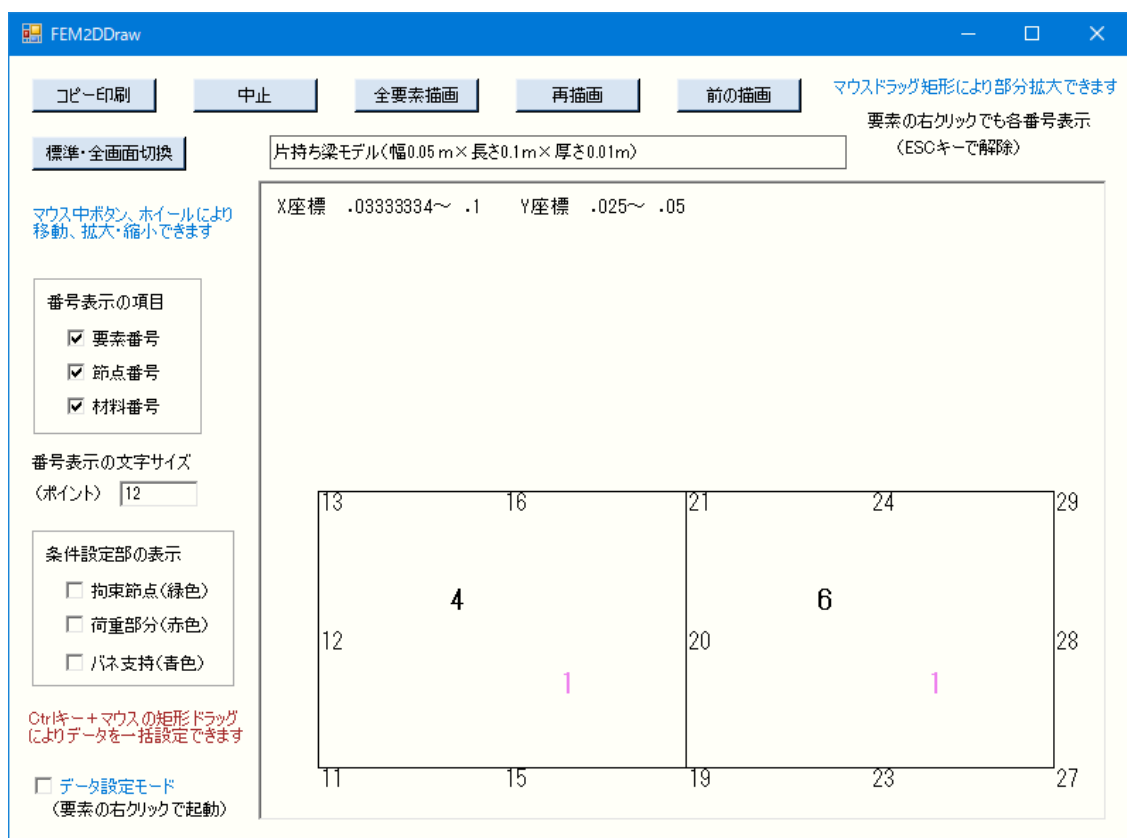


図6-20 構造作画における部分拡大例

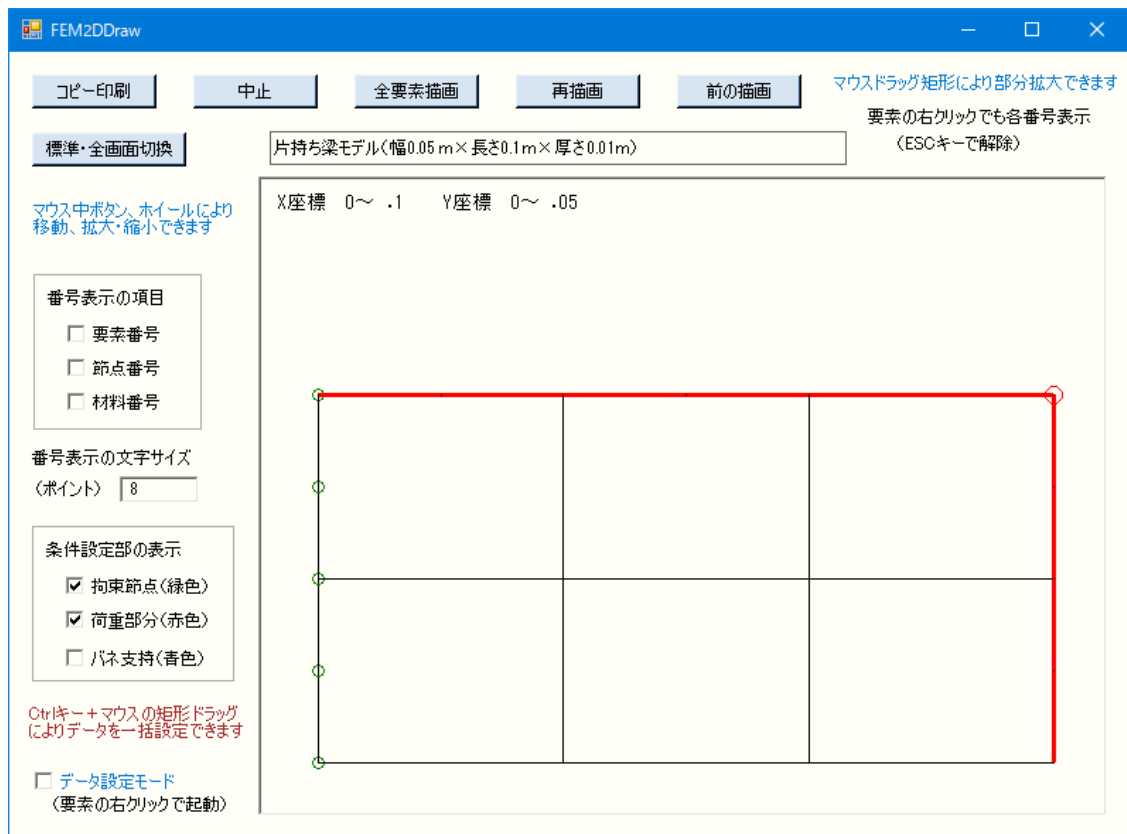


図6-21 構造作画の条件設定部表示有りの画面例

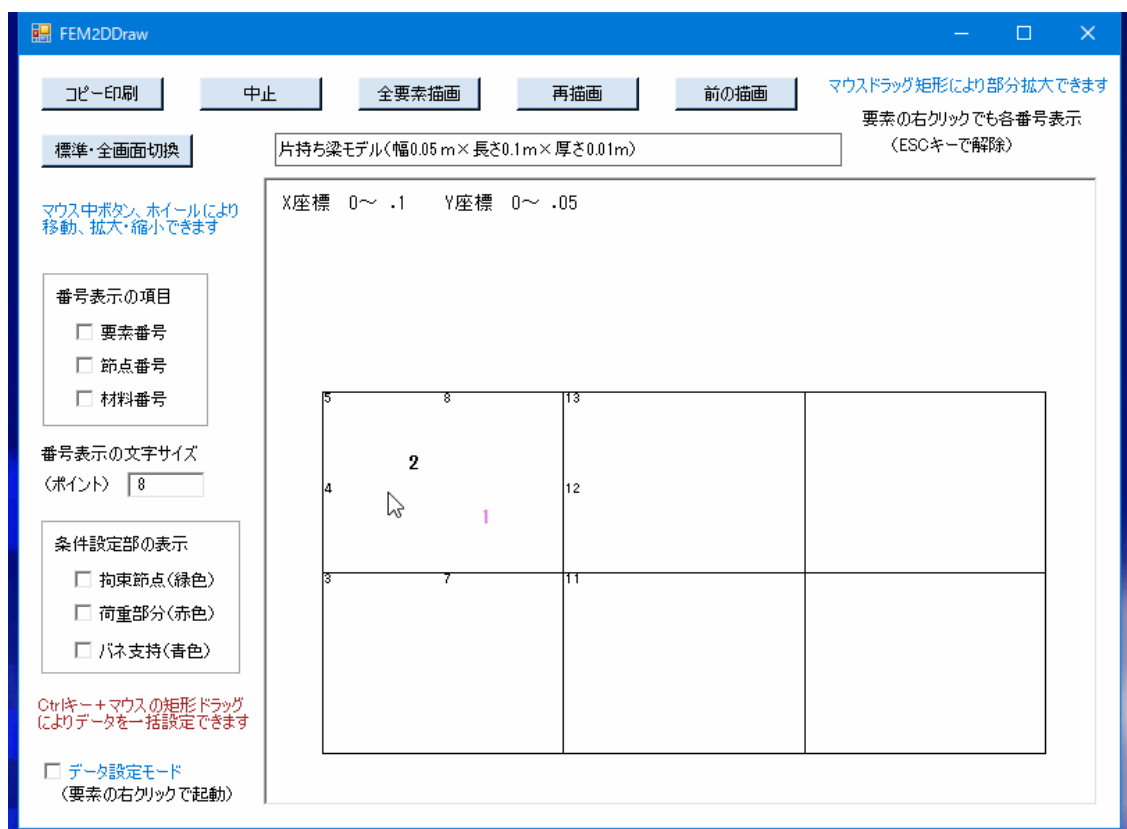


図6-22 構造作画における要素右クリック画面例





図6-23 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

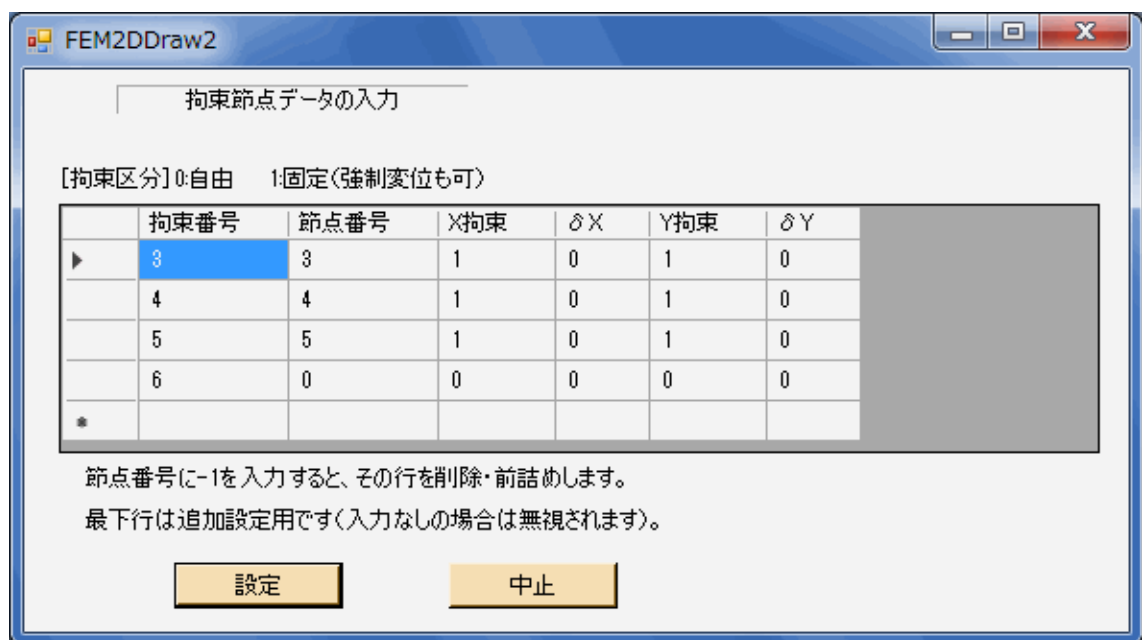
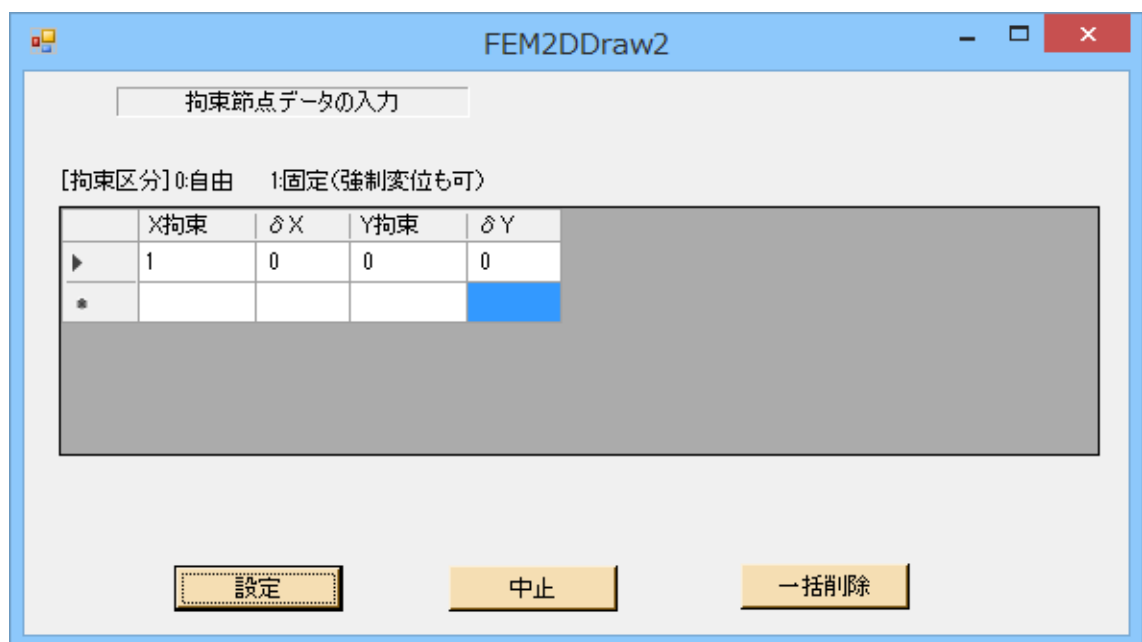
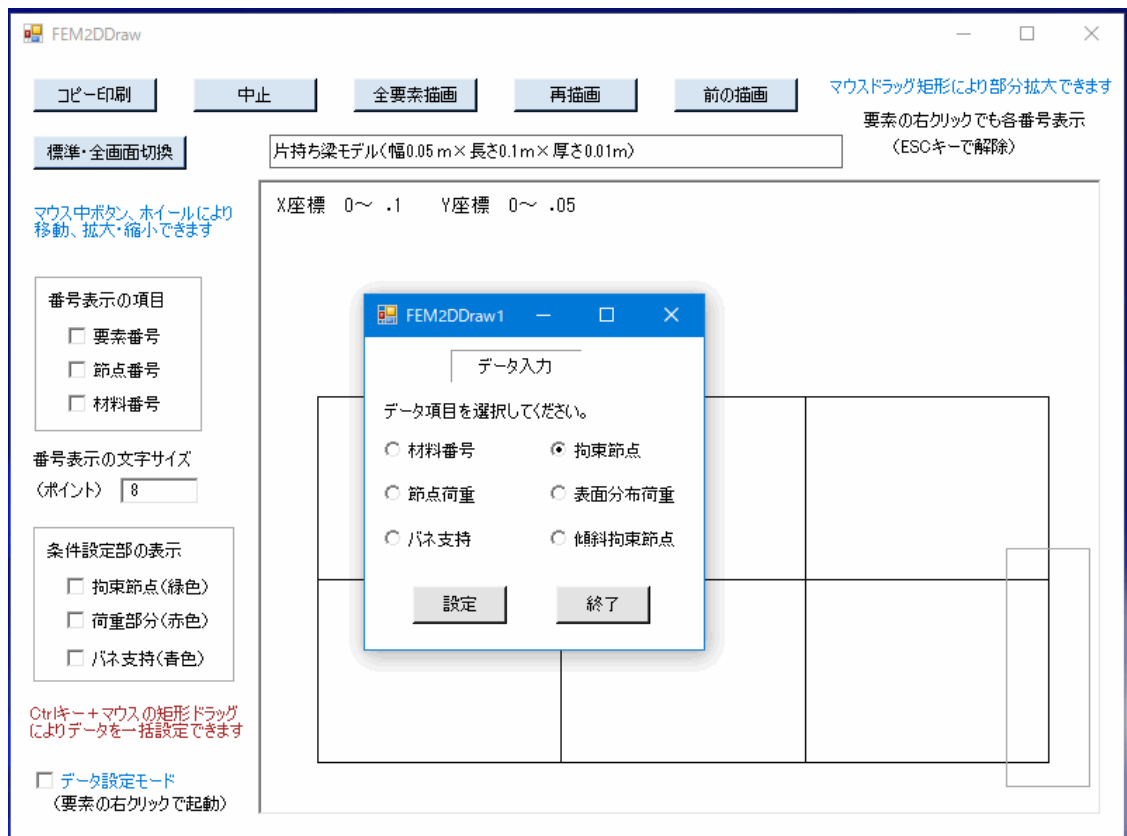


図6-24 構造作画におけるデータ入力画面例（拘束節点の場合）



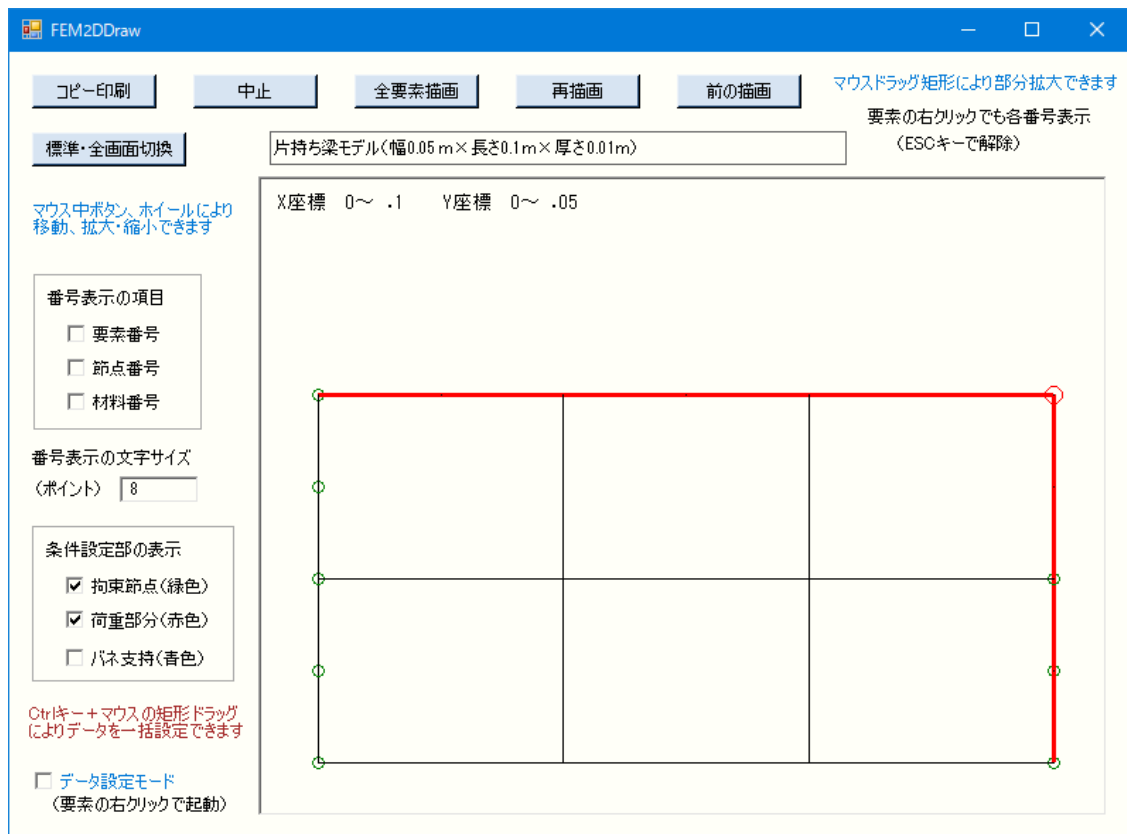


図6-27 一括設定終了後の構造作画の画面例（拘束節点の場合）  
注）右側辺に拘束節点の追加表示

また、図6-28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。

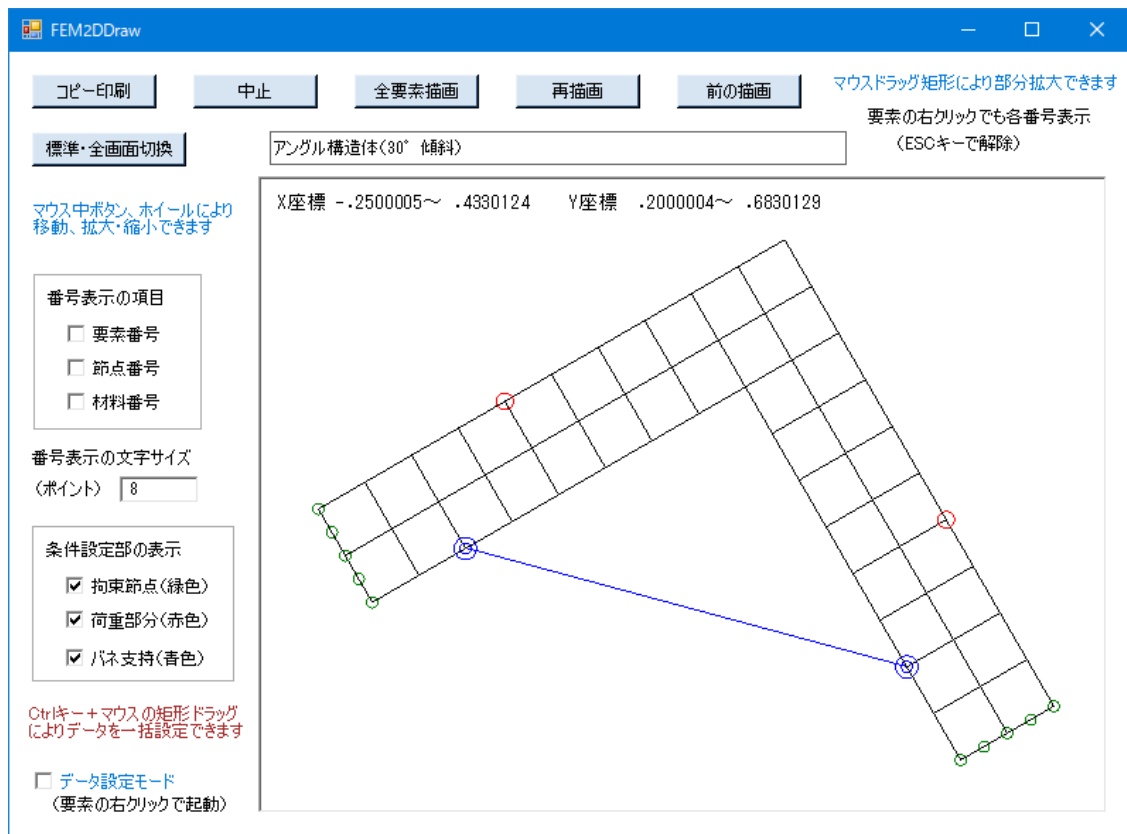


図6-28 節点間バネの構造作画の画面例

## 6.16 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6-29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、および原点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、原点回りの回転、次にX, Y軸方向（またはR, 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、繰り返し途中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。

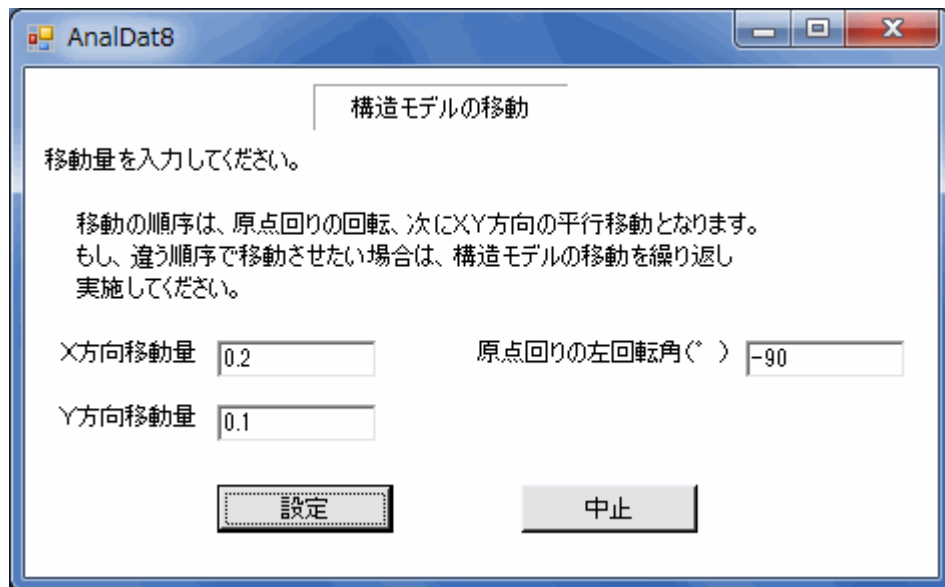


図6-29 構造モデルの移動量入力画面

## 6.17 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6-30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（入力データファイルに同じ）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（回転なし）」、「結合点2個所指定（回転有り）」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ことです。節点の指定は結合方法の下部に表示される第1結合点で行ないます（図6-31参照）。

◇「結合点2個所指定（回転有り）」とは、追加構造を平行・回転移動して2個所の指定節点どうしで結合するということです。節点の指定は結合方法の下部に表示される第1結合点と第2結合点で行ないます（図6-31参照）。

2) 図6-30の画面で「作画」ボタンをクリックすると、図6-31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6-31のように指定節点が赤丸と青丸で表示されます。

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6-32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6-30 合成ファイル設定画面（作画前）



図6-31 合成ファイル設定画面（作画有り）

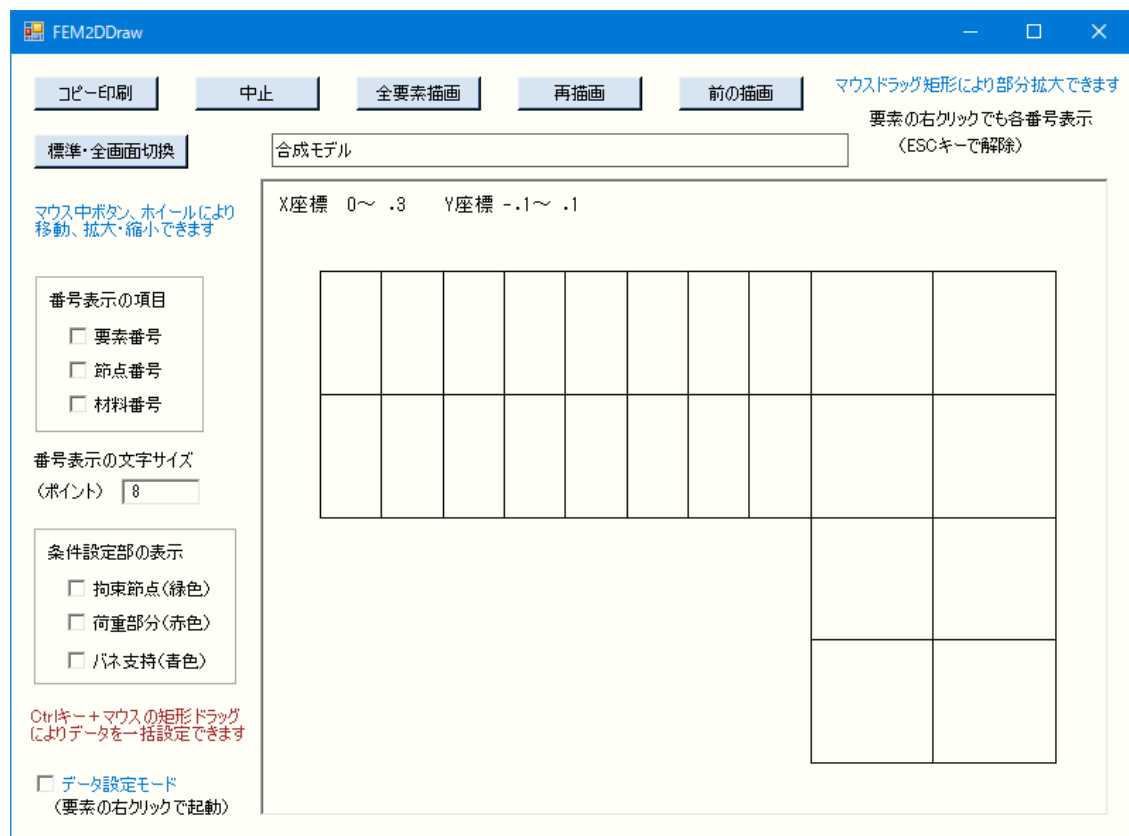


図6-32 合成されたモデルの構造図の画面例

## 6.18 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。

## 6.19 Therm2Dファイルから入力

サブメニューの「Therm2Dファイルから入力」を選択すると、「2次元熱伝導解析K」の入力データファイルを読み込んで「2次元構造解析K」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。

## 6.20 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。

## 6.21 要素の削除

サブメニューの「要素の削除」を選択すると、図6-33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、図6-34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・辺は、要素削除による番号変更に自動追従します。

図6-34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6-33 削除要素数の入力画面

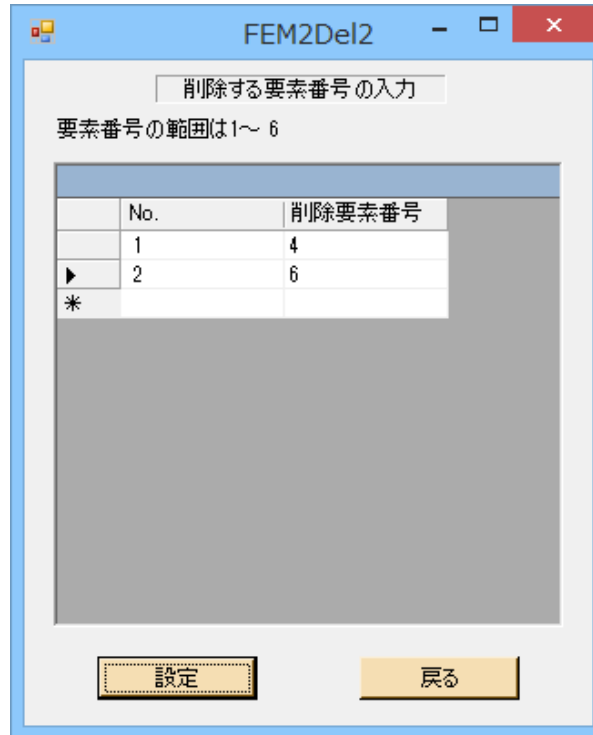


図6-34 削除要素番号の入力画面

## 6.22 板の曲げで平面分布荷重の換算設定

サブメニュー「板の曲げで平面分布荷重の換算設定」の表示画面を図6-35に示します。本メニューは、問題タイプが「板の曲げ」の場合でのみ使用できます。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。

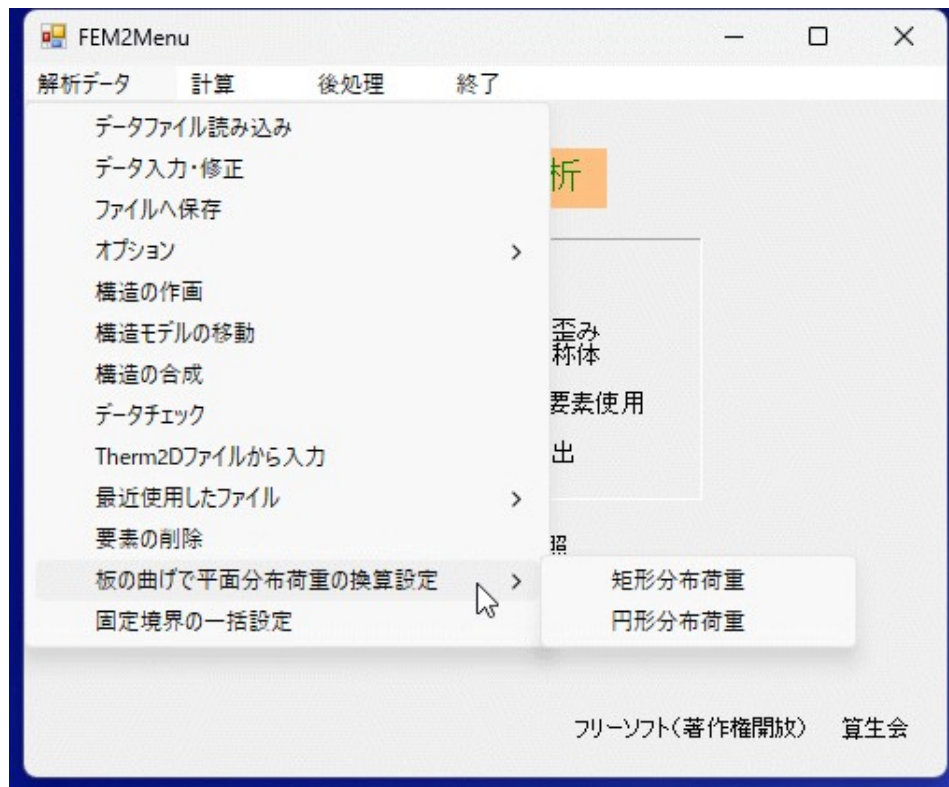


図6-35 サブメニュー「板の曲げで平面分布荷重の換算設定」の表示画面

例として、フランジ構造で図6-36に矩形分布荷重、図6-37に円形分布荷重の説明図を示します。フランジ構造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。

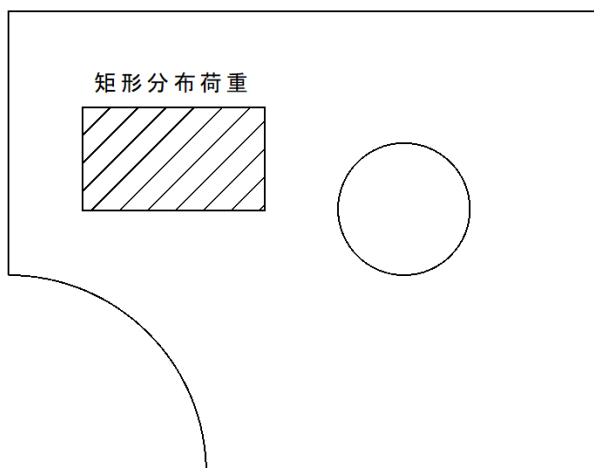


図6-36 フランジ構造の矩形分布荷重

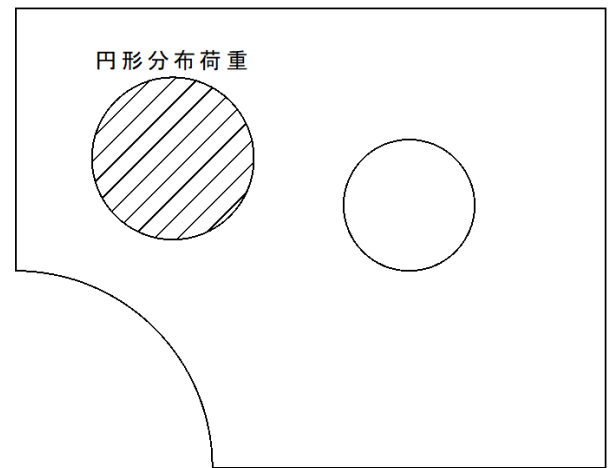


図6-37 フランジ構造の円形分布荷重

## 6.23 矩形分布荷重（換算設定）

「板の曲げで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6-38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を入力します。

②矩形の第1辺と第2辺の分割数 $m_1, m_2$ を入力します。

◇矩形を $m_1 \times m_2$ 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（W方向）を入力します。

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
点A	.01	.04
点B	.04	.04
点C	.04	.06

分割数  $m_1$  6

分割数  $m_2$  4

合計荷重(W方向) 1000

設定 中止

図6-38 矩形分布荷重（換算設定）の入力画面

#### 6.24 円形分布荷重（換算設定）

「板の曲げで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6-39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 $X, Y$ を入力します。

②円の中心点Cの全体座標 $X, Y$ 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6-40に $5 \times 5$ 分割の円形図を示します。

④全体荷重（W方向）を入力します。

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。

FEM2Dat6

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
点A	.04	.05
点B	.03	.06
点C	.03	.05

分割数 m

合計荷重(W方向)

図6-39 円形分布荷重（換算設定）の入力画面

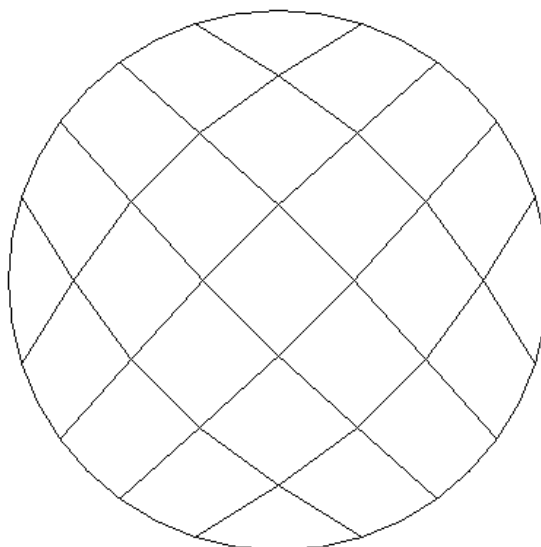


図6-40 5×5分割の円形図

## 6.25 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6-41の設定画面となります。ただし、本画面は「平面応力」と「平面歪み」の場合で、「板の曲げ」や「軸対称体」ではそれぞれ表示が変わります。本画面では、固定境界の節点を一括設定できます。

①まず、固定する変位（ $\delta X$ 、 $\delta Y$ ）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。

②次に、X座標範囲、Y座標範囲、円周範囲について、条件設定したい任意のものをチェック選択します。

③X座標範囲、Y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。

- ④円周範囲をチェック選択した場合は、円筒面定義式における中心座標A、B、および半径の下限、上限を入力します。

◇半径の下限と上限は、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。

- 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。

FEM2Dat3

固定境界の一括設定

条件範囲の節点について、変位を0固定できます。

固定変位(複数指定可)

☐ δX 固定 ☒ δY 固定

☐ X座標範囲 X下限  X上限

☒ Y座標範囲 Y下限  Y上限

☐ 円周範囲

$(X-A)^2+(Y-B)^2=\text{半径}^2$  A  B

半径下限  半径上限

設定 中止

図6-41 固定境界の一括設定画面

## 第7章 「計算」プログラム

### 7.1 サブメニュー画面

「メニュー」プログラムにおける「計算」のサブメニュー画面を図7-1に示します。サブメニューは「構造解析の実行」と「体積計算の実行」の2つがあります。「構造解析の実行」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、「体積計算の実行」は補助機能であり、7.5節で説明します。

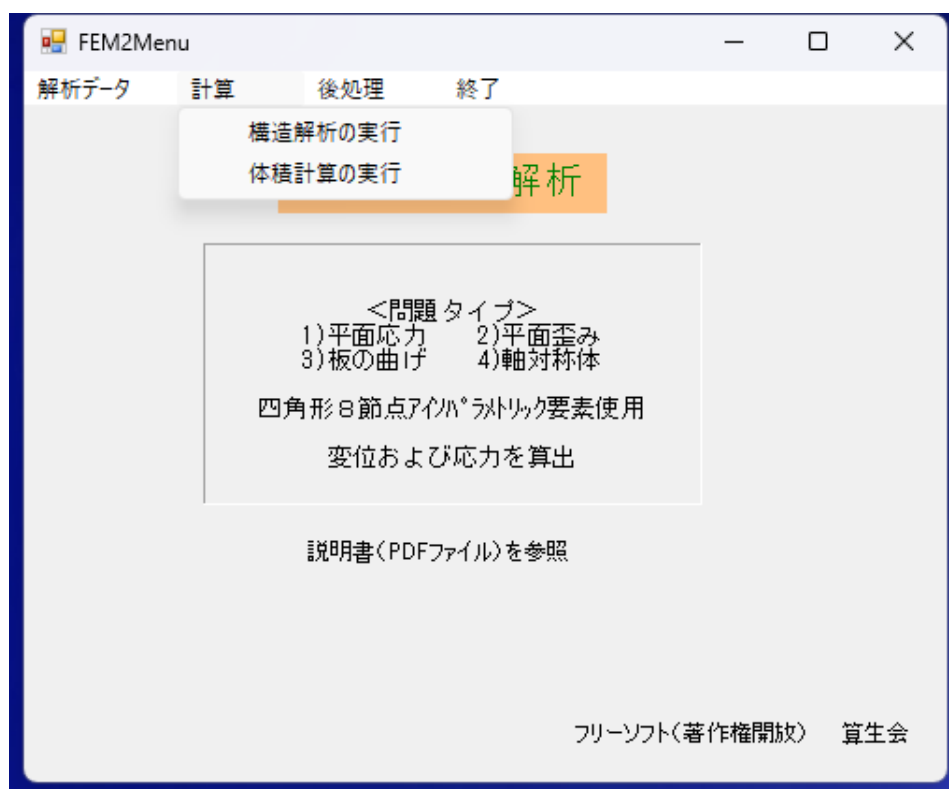


図7-1 「計算」サブメニュー画面

### 7.2 「計算」ファイル設定

図7-2に「計算」ファイル設定画面を示します。

- 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、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。
- ②変形区分で「小変形」か「大変形」を選択できます（板の曲げでは選択無効）。

「大変形」を選択すると図7-3の画面となります。

◇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。

◇図7-3の画面では、最大繰返し計算回数と収束基準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。この基準誤差率とは、各回の繰返し計算において、全節点の変位の最大変化量を最大変位で割ったものです。収束基準誤差率はデフォルトで0.005になっています。

◇最大繰返し計算回数や収束基準誤差率は、必要に応じて変更してください。なお、収束基準誤差率を小さくすると、繰返し計算回数が増えます。

③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、計算が開始されます。

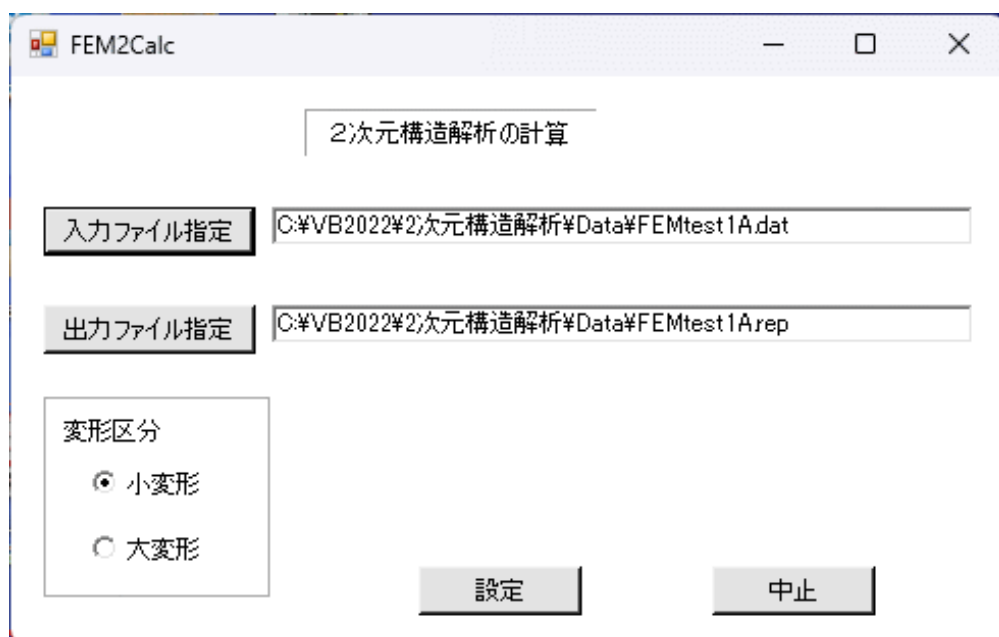


図7-2 「計算」ファイル設定画面

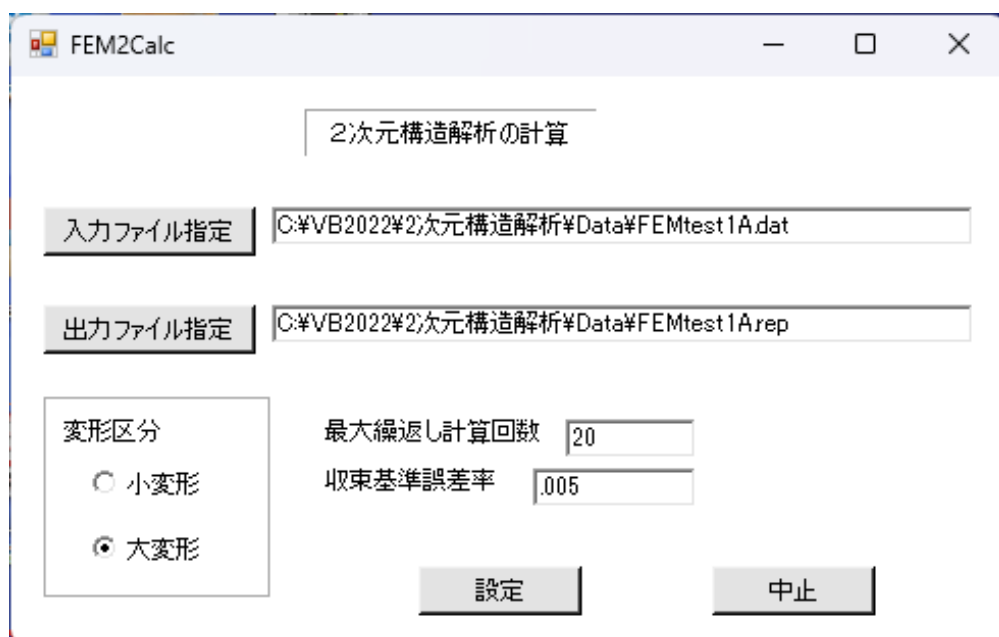


図7-3 「計算」ファイル設定画面（大変形を選択した場合）

### 7.3 計算終了

図7-4に計算終了画面、図7-5に計算確認ダイアログ画面を示します。図7-4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7-5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。

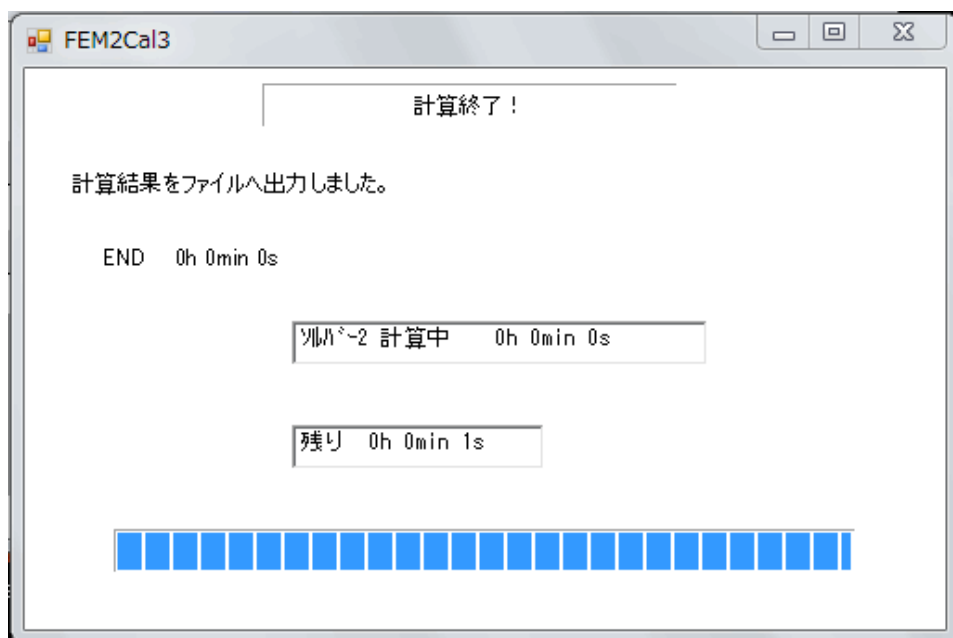


図7-4 計算終了画面

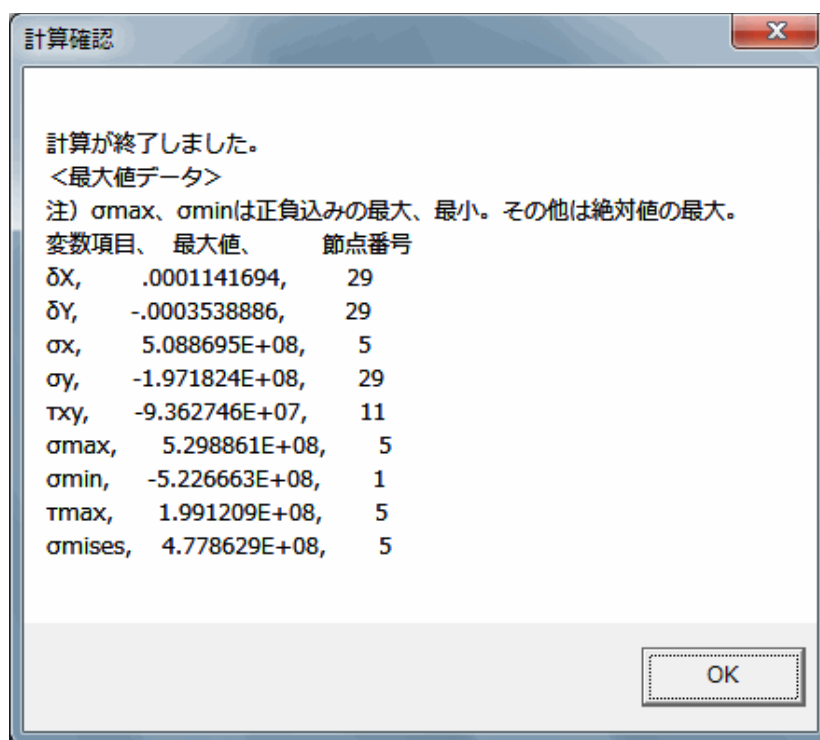


図7-5 計算確認ダイアログ画面



## 7.4 計算結果

7.2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7-6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バンド幅が22と出力されています。
- ②保存配列のインデックス数が855と出力されています。このインデックス数は、FEM行列（ハーフバンド）の要素の内、実際に保存された個数を意味します。
- ③変位等の出力では、すべての節点について、各変位（ $\delta X$ 、 $\delta Y$ ）が出力されています。
- ④本例では、節点29における下向き変位（Y方向で－符号）0.000354m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。
  - ◇ $\theta_{\text{ps}}$ は、2次元平面内の第1主応力方向のX軸（またはR軸）に対する角度（°）です。
- ⑦本行以下に各節点毎に応力を出力されています。

〔節点応力の算出方法〕

各要素において、全ガウス点の応力から各節点の応力を外挿法で計算します。  
節点が複数要素に共通の場合は、複数要素間で平均を取ります。
- ⑧拘束節点の反力が出力されています。
  - ◇傾斜拘束節点については、別途、傾斜に垂直の反力が出力されます。
- 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最後に計算時間も出力されます（本例では0s）。



```

26,      4010213,      -9949963,      -2.087384E+07,      1.904009E+07,      -2.497984E+07,
2.200997E+07,      3.823789E+07,      -35.7552
27,      -1.326988E+07,      -8.319048E+07,      -4.718135E+07,      1.049206E+07,      -1.069524E+08,
5.872224E+07,      1.125658E+08,      -26.73121
28,      -3.052841E+07,      -1.715194E+08,      -4.588994E+07,      -1.69079E+07,      -1.851399E+08,
8.411599E+07,      1.772916E+08,      -16.53132
29,      2.23283E+07,      -1.971824E+08,      -4.173908E+07,      2.999691E+07,      -2.04851E+08,
1.17424E+08,      2.213789E+08,      -10.41071

```

-----

\* \* 拘束節点の反力 \* \*

⑧

<節点番号、Fx、Fy>

```

1,      24370.1,      10669.55
2,      30994.29,      -2042.625
3,      67.75916,      6830.473
4,      -30598.81,      -1957.401
5,      -24833.34,      10944.44

```

-----

<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

```

δX,      .0001141694,      29
δY,      -.0003538886,      29
σx,      5.088695E+08,      5
σy,      -1.971824E+08,      29
τxy,      -9.362746E+07,      11
σmax,      5.298861E+08,      5
σmin,      -5.226663E+08,      1
τmax,      1.991209E+08,      5
σmises,      4.778629E+08,      5

```

END 0h 0min 0s

⑩

図7-6 (2/2) 結果ファイルへの出力例

## 7.5 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7-7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。

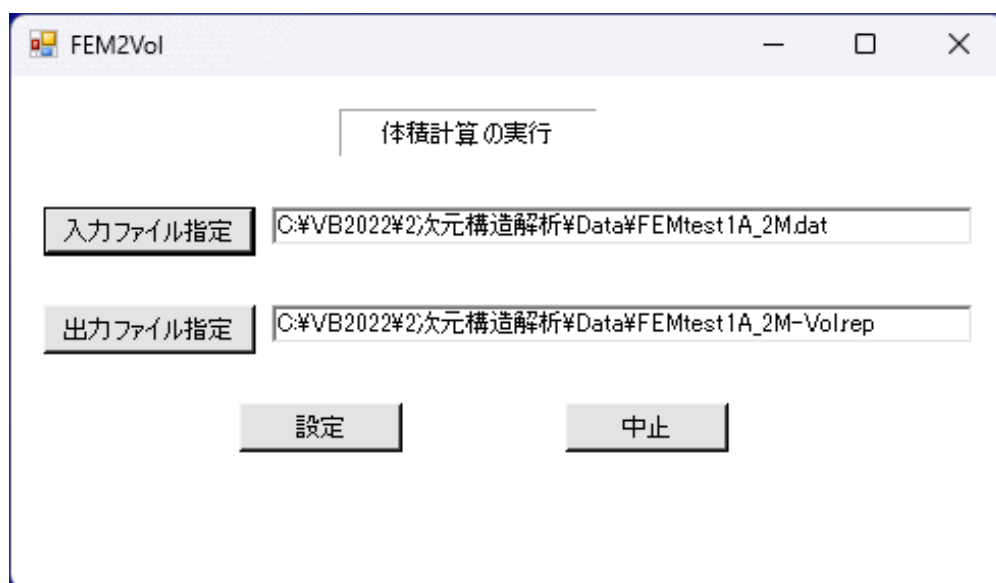


図7-7 体積計算の実行画面

図7-8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。

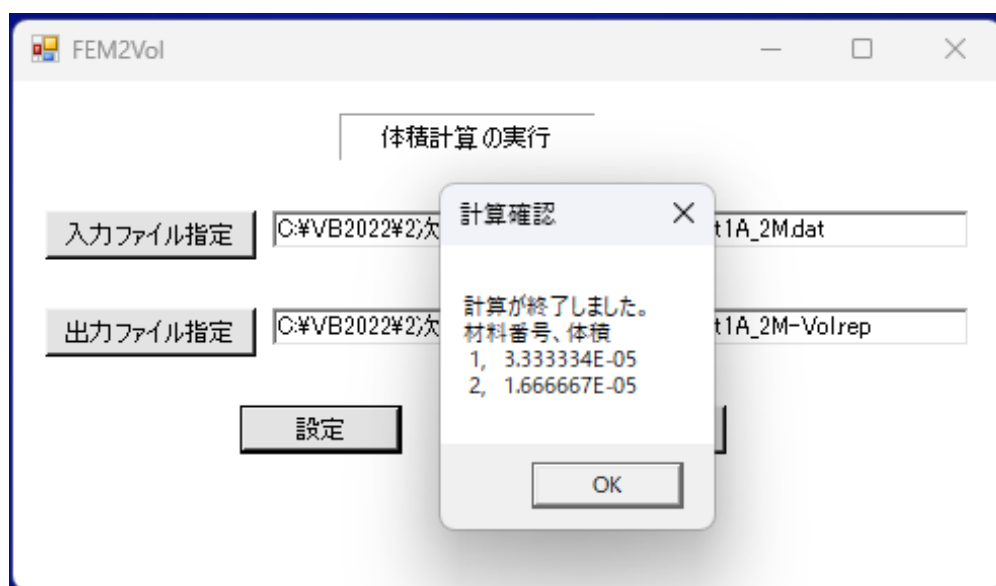


図7-8 体積計算の終了画面

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7-9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。

◇軸対称体データの場合は、重心のR座標が0なので、重心のZ座標のみ出力されます。

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>>
片持ち梁モデル（幅0.05m×長さ0.1m×厚さ0.01m）
[入力データファイル]，C:\¥VB2022¥2次元構造解析¥Data¥FEMtest1A_2M.dat
-----
材料番号、体積、重量                                ①
1,      3.333333E-05,      2.6
2,      1.666667E-05,      1.211667
合計,      5E-05,      3.811667                                ②
重心のX座標、Y座標                                ③
.04922751,      .025
END
```

図7-9 体積計算の結果ファイルへの出力例

## 第8章 「後処理」プログラム

### 8.1 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8-1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。

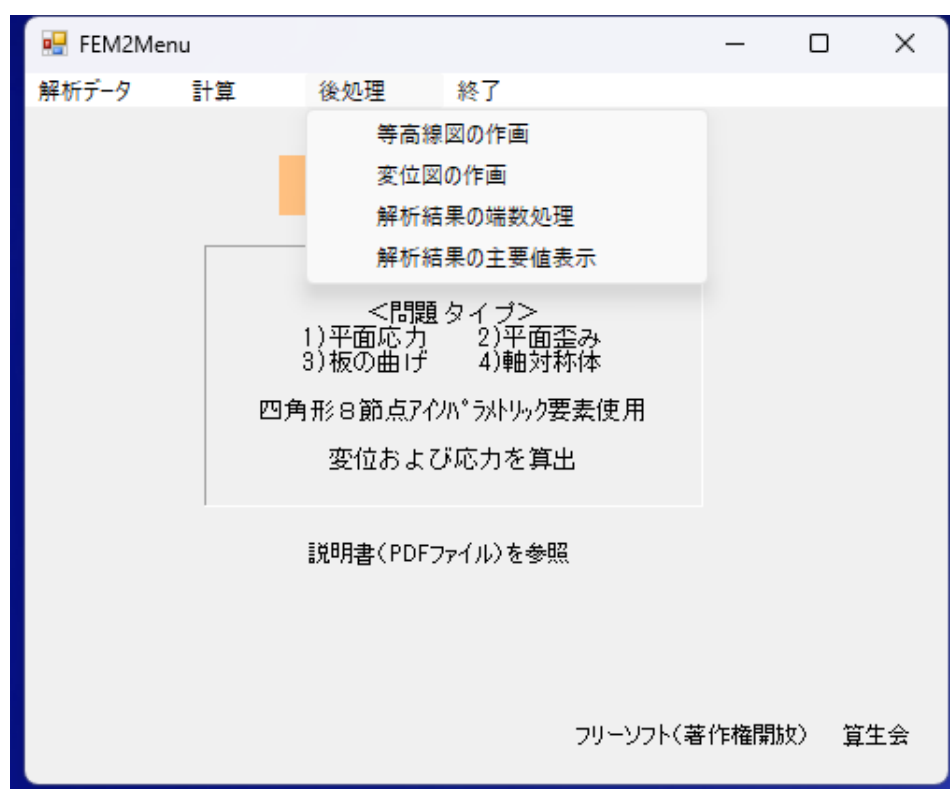


図8-1 「後処理」サブメニュー画面

### 8.2 使用ファイルの設定

図8-2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8-2 使用ファイル設定画面

### 8.3 等高線の指定画面

図8-3～6に問題タイプ別の等高線指定画面を示します。

①本画面で、作画したい変数項目を選択します。

◇「最大値データ」のボタンをクリックすると、最大値データが表示されます。

図8-7に最大値データの表示例を示します。

◇図8-5の板の曲げの画面で、 $\sigma_{\max}$ (裏)と $\sigma_{\min}$ (裏)は板の下面の応力で、上面側から見た等高線図を作画します。

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。

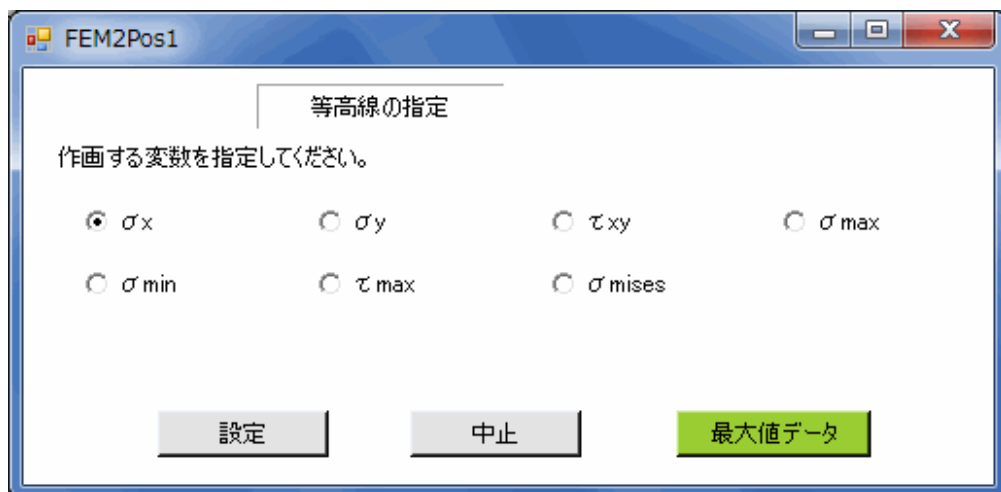


図8-3 等高線指定画面（平面応力の場合）

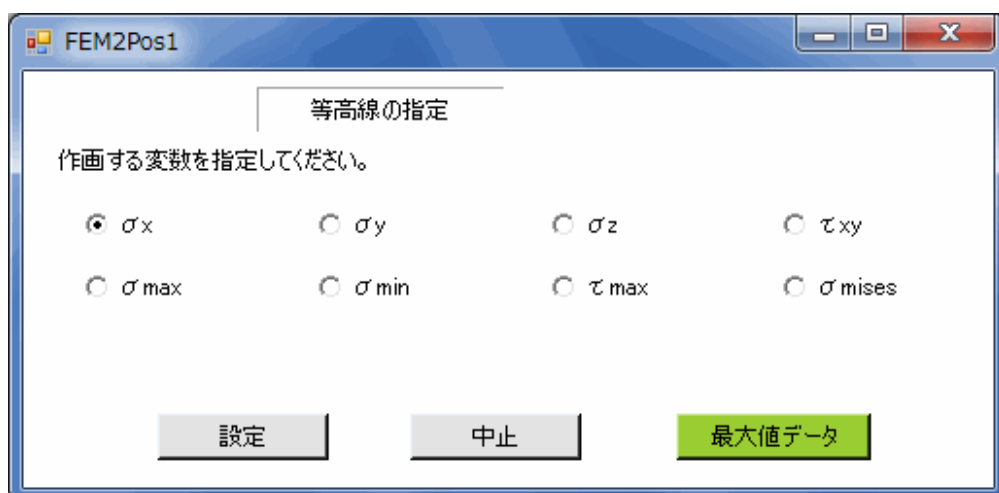


図8-4 等高線指定画面（平面歪みの場合）

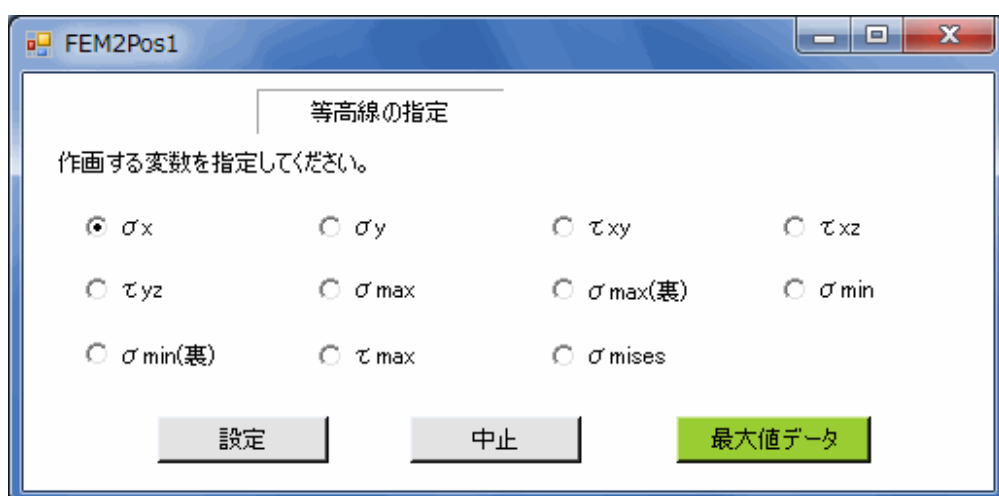


図8-5 等高線指定画面（板の曲げの場合）

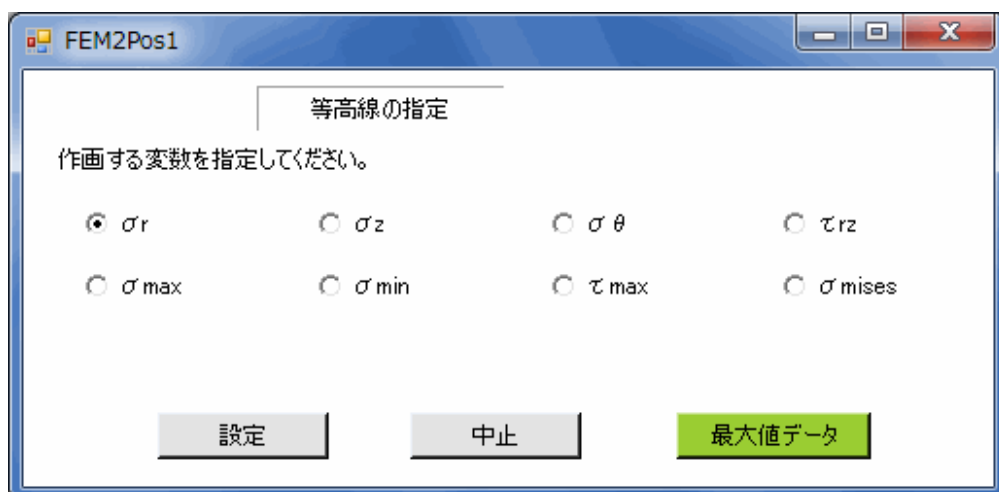


図8-6 等高線指定画面（軸対称体の曲げの場合）



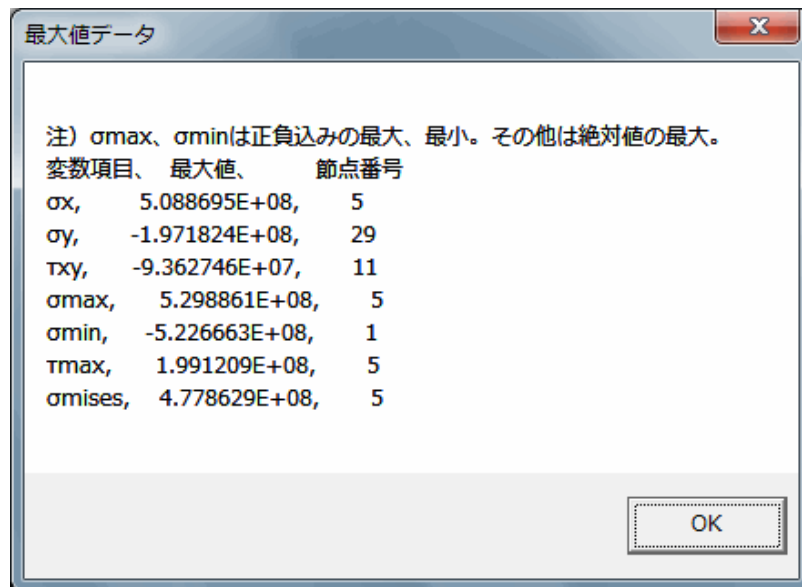


図8-7 最大値データの表示例（平面応力の場合）

#### 8.4 等高線図の仕様設定画面

図8-8に等高線図の仕様設定画面を示します。本画面の入力について補足説明します。

- ①まず、等高線の表示変数について、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。

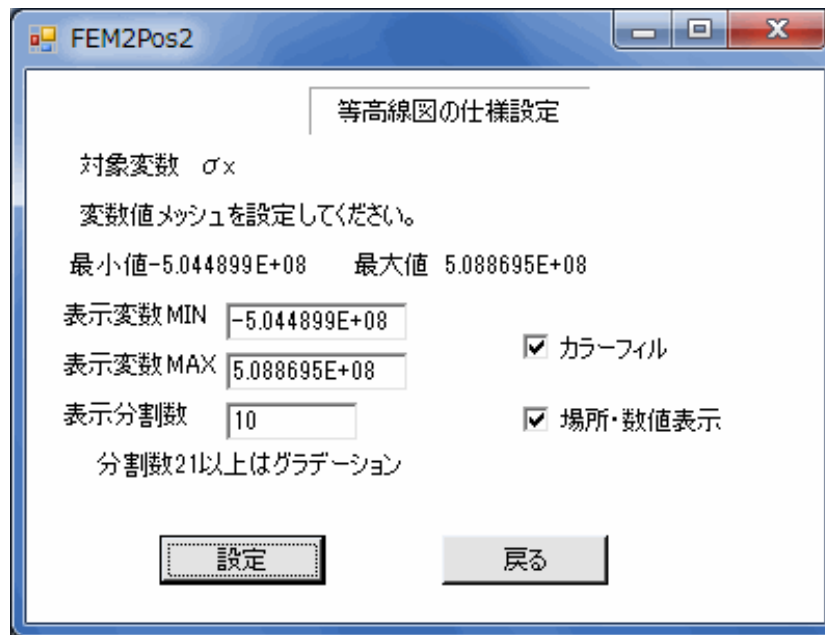


図8-8 等高線図の仕様設定画面

## 8.5 等高線図の作画画面

図8-9に板の曲げ以外の等高線図の作画画面を示します。同図は、本画面に移った状態のもので、作画のパラメータは標準条件になっています。

- ①同画面のように、変形後の図上に等高線がカラー表示され、右欄には各等高線における変数値も明示してあります。
- ②本画面の左側の「変位作画の倍率」は、構造寸法に対する変位の作画倍率を示します。本数値を任意に変更して「更新」ボタンをクリックすると、変更が反映されます。  
◇0を設定すると、変位なしの構造図の上に等高線が作画されます。
- ③本画面の左側の「要素辺の表示」は、「なし」か「有り」を選択できます。選択した後に「再描画」ボタンをクリックします。  
◇「要素辺の表示」が「有り」の等高線図を図8-10に示します。同図では、各要素の辺がすべて表示されています。
- ④マウス右クリックで任意の節点を選択すると、図8-11のように同節点の変数値が表示されます。  
◇ESCキーを押すと節点選択が解除されます。
- ⑤「標準・全画面切換」ボタンをクリックすると、標準画面と全画面を切り換えることができます。また、画面Formの右下コーナー等をマウスドラッグすることにより、標準画面と全画面の間で自由に拡大・縮小できます。
- ⑥マウス中ボタン、ホイールにより移動、拡大・縮小を行なうことができます。中ボタンを押したまま動かせば図形を移動できます。また、ホイールの回転により拡大・縮小ができます。
- ⑦マウスドラッグ矩形により、等高線図の一部を拡大できます。操作方法は6.15節の構造図と同じです。
- ⑧本画面で「コピー印刷」ボタンをクリックすると、プリンターで画面コピーを印刷

できます。

◇「通常画面」の作画が印刷されます。

⑨本画面を終了するには、「戻る」ボタンをクリックして、仕様設定画面に戻ります。

また、もし等高線図の出来栄えに不満があれば、「戻る」ボタンで仕様設定画面に戻って仕様変更し、再度、等高線図を作画することができます。

また、図8-12にグラデーションの等高線図の画面例を示します。グラデーションの場合、画面右側のカラーゲージに4等分した5つの変数値が示されます。

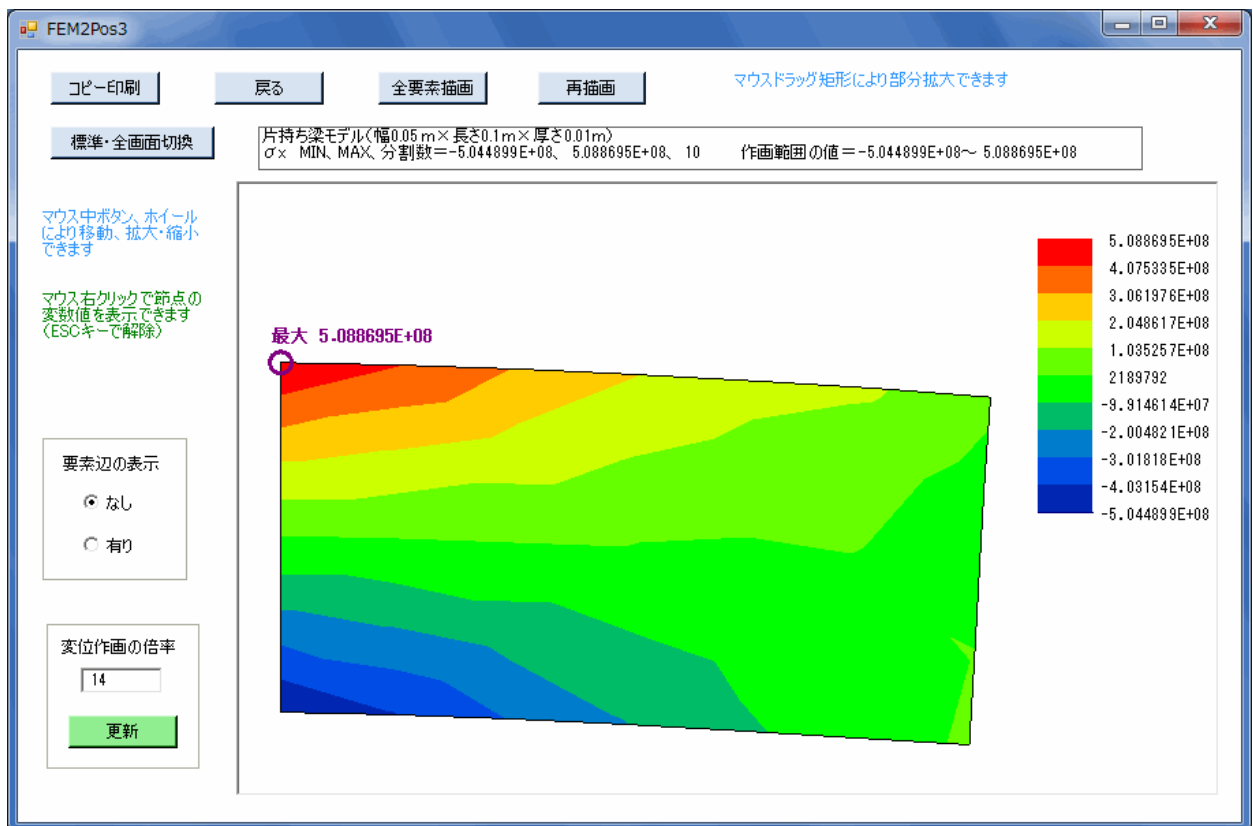


図8-9 等高線図の作画画面

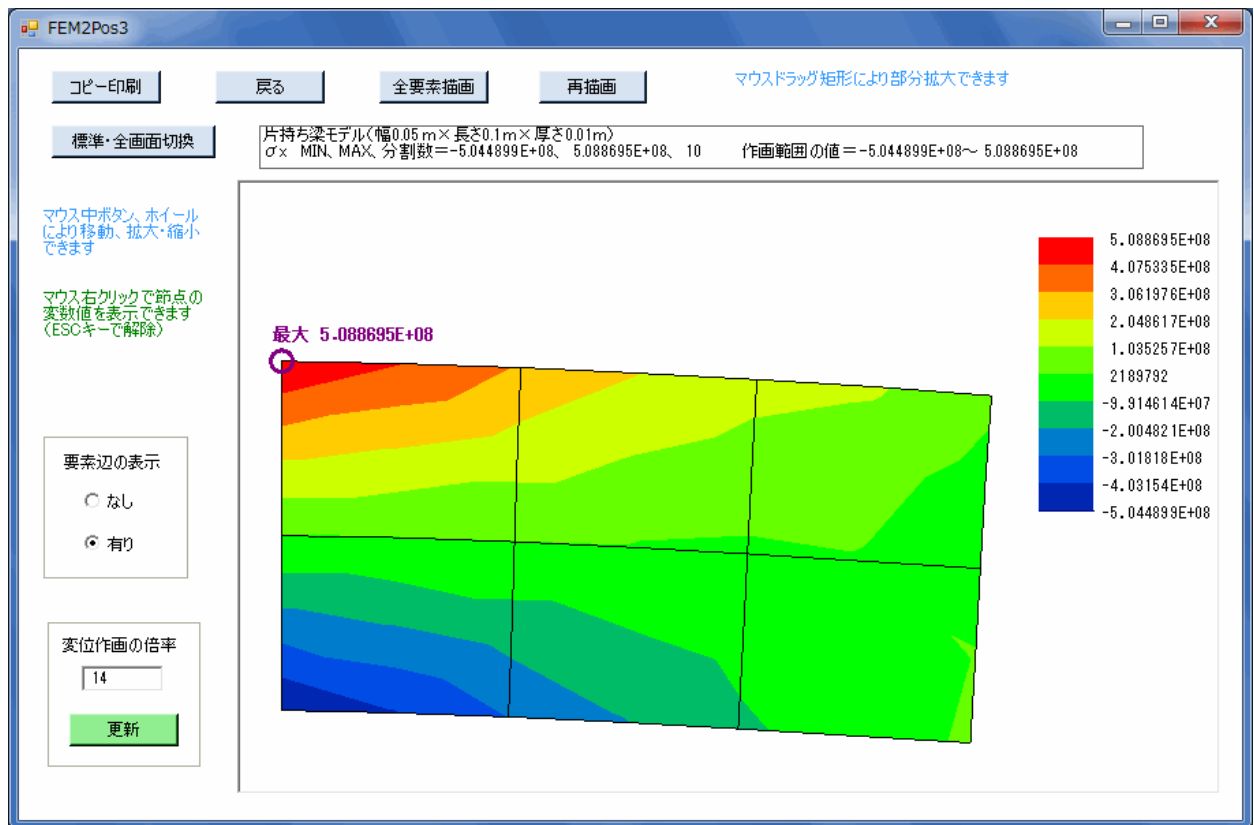


図8-10 等高線図の作画画面（要素辺の表示有り）

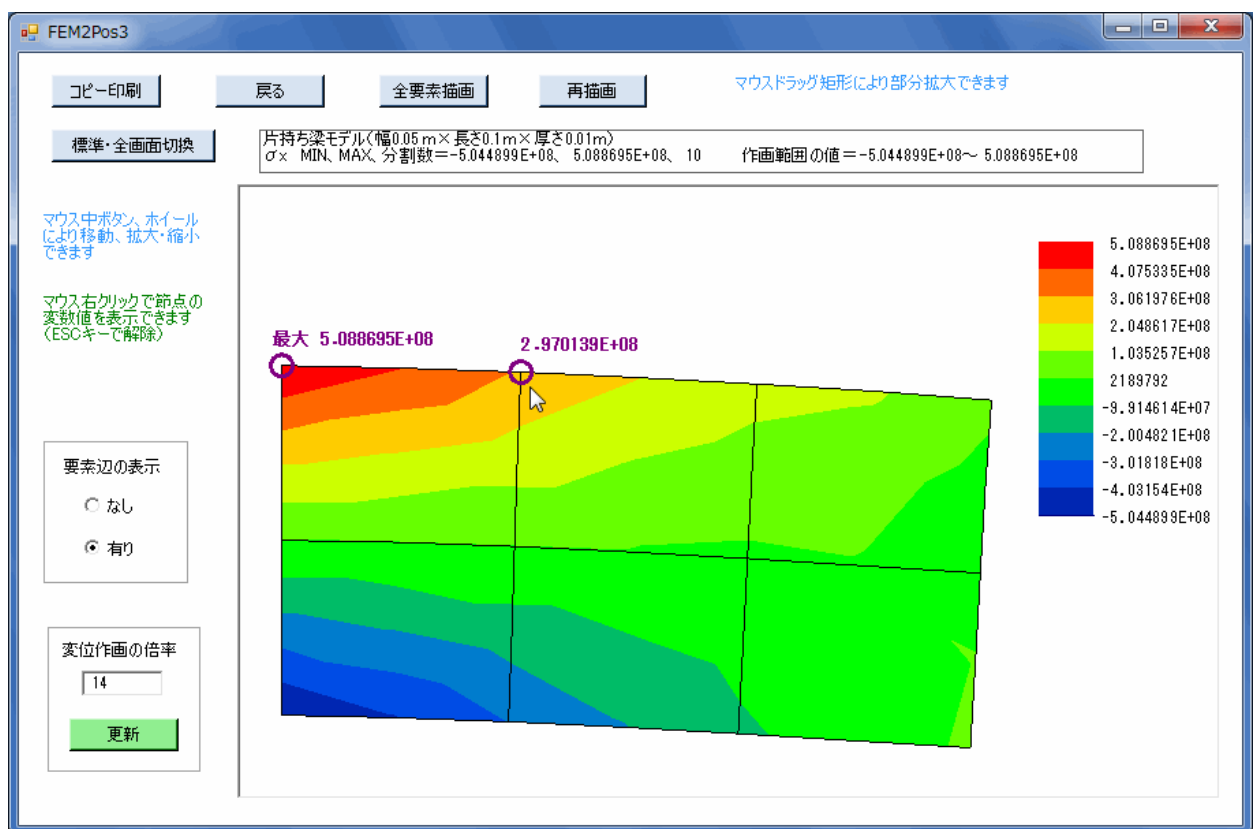


図8-11 等高線図の作画画面（マウス右クリックの節点の変数値表示）

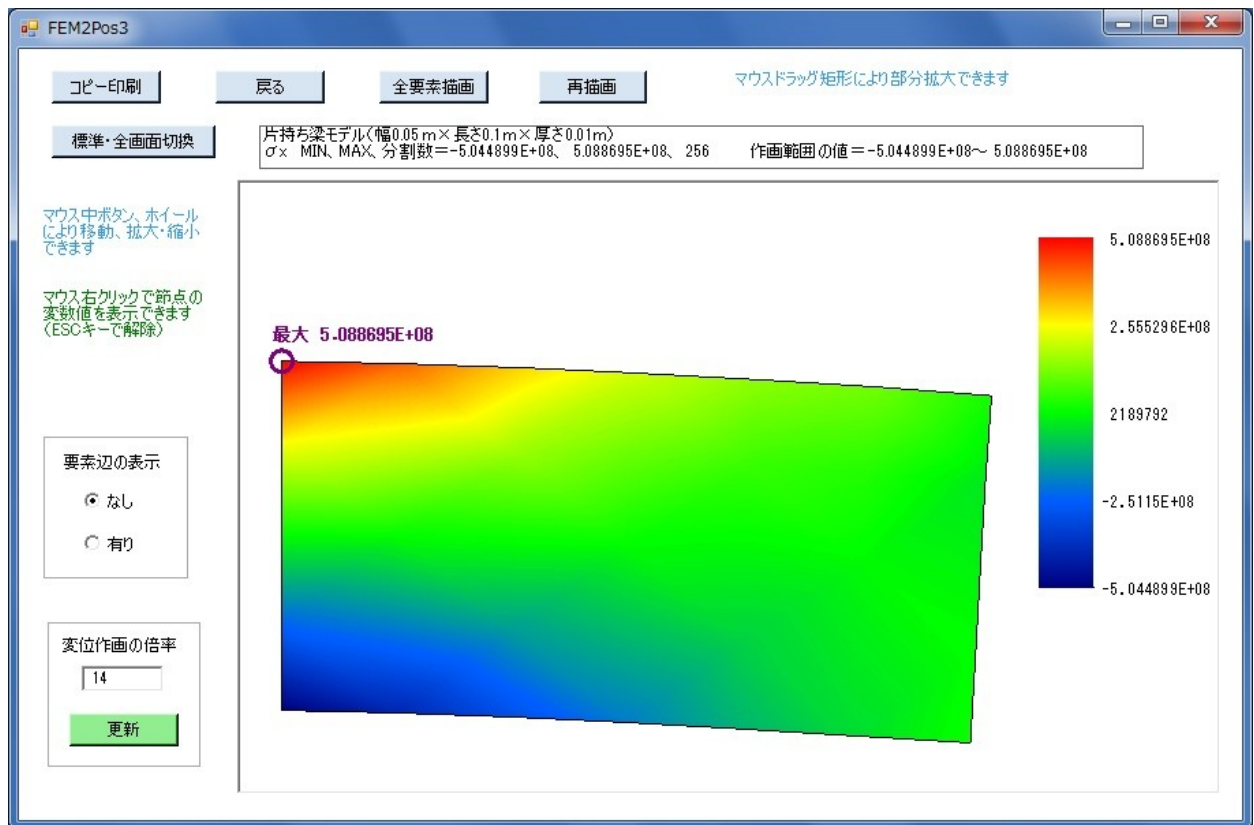


図8-12 等高線図の作画画面（グラデーション）

## 8.6 等高線図の作画画面（板の曲げ）

図8-13に板の曲げの等高線図作画画面（フランジ）を示します。板の曲げの場合は、変位なしの等高線図になります。それ以外は前節と同様です。

- ①同画面のように、等高線がカラー表示され、右欄には各等高線における変数値も明示してあります。
- ②本画面の左側の「要素辺の表示」は、「なし」か「有り」を選択できます。選択した後に「再描画」ボタンをクリックします。  
◇「要素辺の表示」が「有り」の等高線図は、第10章の計算例の図を参照してください。
- ③マウス右クリックで任意の節点を選択すると、同節点の変数値が表示されます。画面例は、第10章の計算例の図を参照してください。  
◇ESCキーを押すと節点選択が解除されます。
- ④「標準・全画面切換」ボタンをクリックすると、標準画面と全画面を切り換えることができます。また、画面Formの右下コーナー等をマウスドラッグすることにより、標準画面と全画面の間で自由に拡大・縮小できます。
- ⑤マウス中ボタン、ホイールにより移動、拡大・縮小を行なうことができます。中ボタンを押したまま動かせば図形を移動できます。また、ホイールの回転により拡大・縮小ができます。
- ⑥マウスドラッグ矩形により、等高線図の一部を拡大できます。操作方法は6.17節の構造図と同じです。

⑦本画面で「コピー印刷」ボタンをクリックすると、プリンターで画面コピーを印刷できます。

◇「通常画面」の作画が印刷されます。

⑧本画面を終了するには、「戻る」ボタンをクリックして、仕様設定画面に戻ります。また、もし等高線図の出来栄に不満があれば、「戻る」ボタンで仕様設定画面に戻って仕様変更し、再度、等高線図を作画することができます。

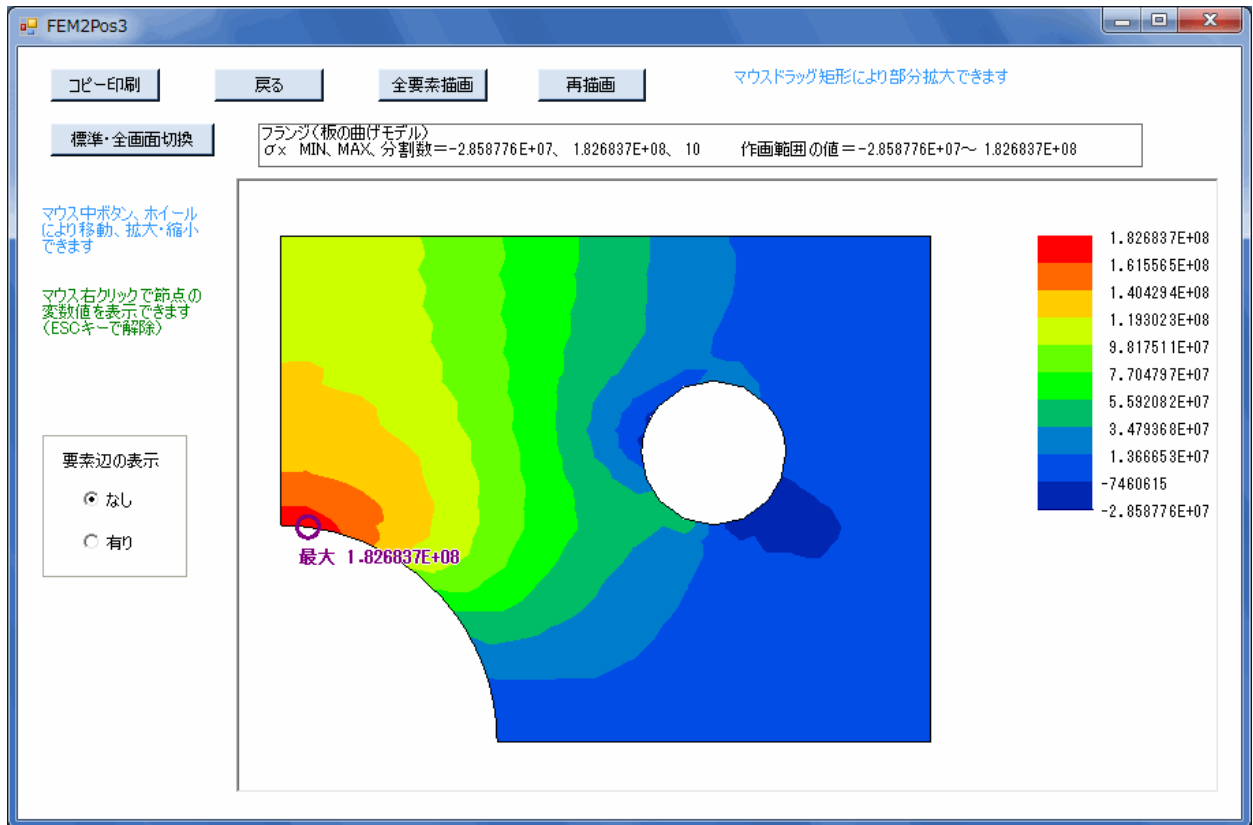


図8-13 板の曲げの等高線図作画画面（フランジ）

## 8.7 変位図の作画画面（平面応力、平面歪み、軸対称体）

図8-14に板の曲げ以外の変位図作画画面を示します。

①同画面のように、元の構造図に対して、青色で変位図が表示されています。

②本画面の左側の「変位作画の倍率」は、構造寸法に対する変位の作画倍率を示します。本数値を任意に変更して「更新」ボタンをクリックすると、変更が反映されます。

③本画面の左側に「変位線の幅」のパラメーターを表示してあり、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8-15のように構造図なしの変位図だけになります。同図で「構造図作画」ボタンをクリックすると元の画面に戻ります。

⑤「標準・全画面切換」ボタンをクリックすると、標準画面と全画面を切り換えることができます。また、画面Formの右下コーナー等をマウスドラッグすることにより、

標準画面と全画面の間で自由に拡大・縮小できます。

- ⑥マウス右クリックで変位図の任意の節点を選択すると、図8-16のように同節点の変位値が表示されます。

◇ESCキーを押すと節点選択が解除されます。

- ⑦マウス中ボタン、ホイールにより移動、拡大・縮小を行なうことができます。中ボタンを押したまま動かせば図形を移動できます。また、ホイールの回転により拡大・縮小ができます。

- ⑧マウスドラッグ矩形により、変位図の一部分を拡大できます。操作方法是6.15節の構造図と同じです。

- ⑨本画面で「コピー印刷」ボタンをクリックすると、プリンターで画面コピーを印刷できます。

◇「通常画面」の作画が印刷されます。

- ⑩本画面を終了するには、「中止」ボタンをクリックします。

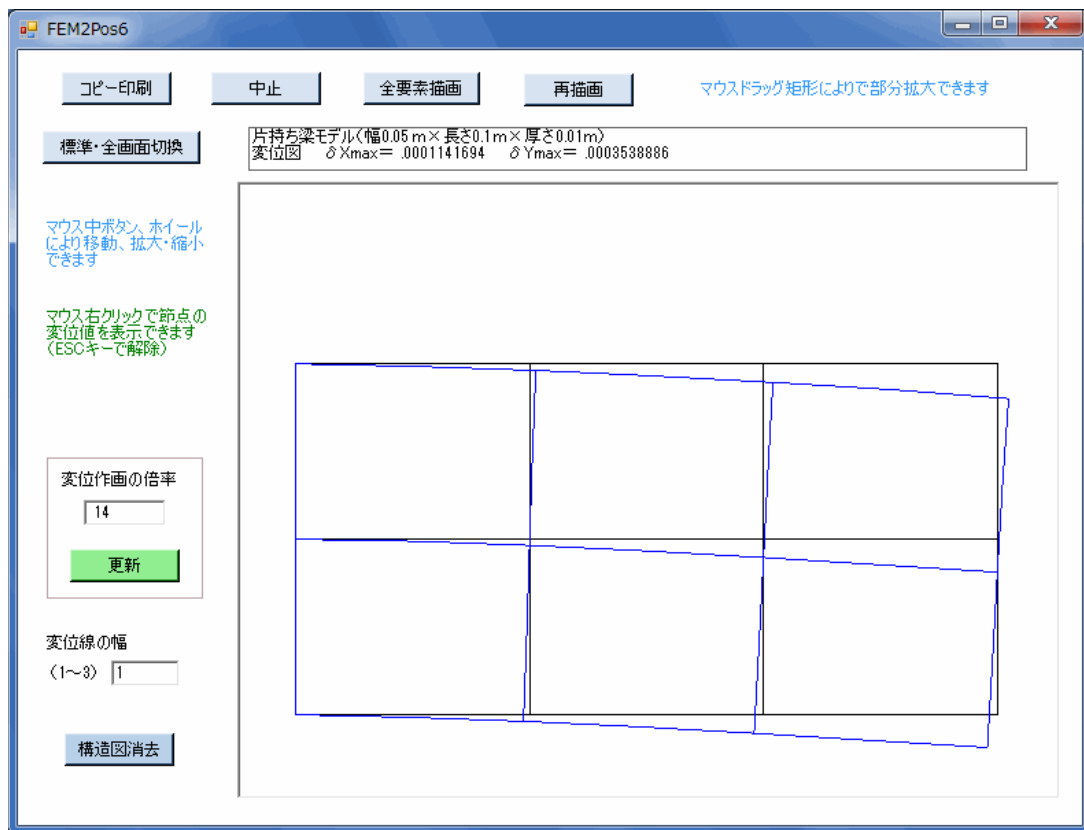


図8-14 変位図の作画画面

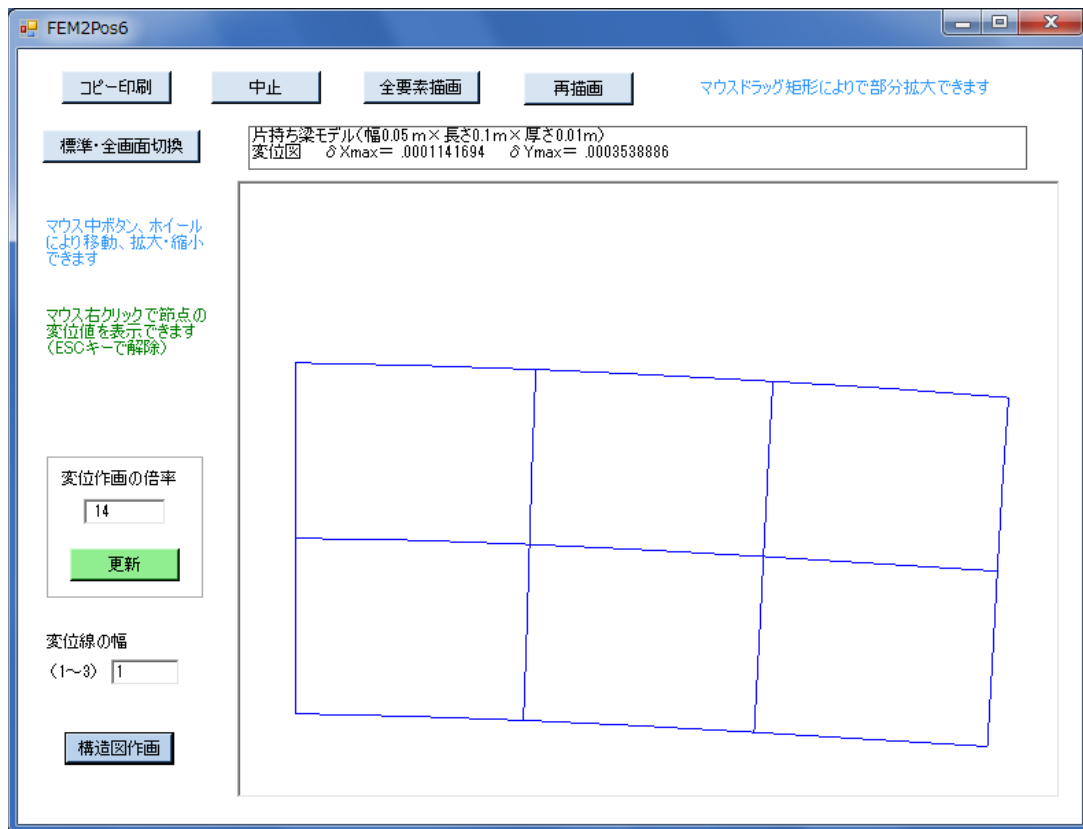


図8-15 変位図の作画画面（構造図消去）

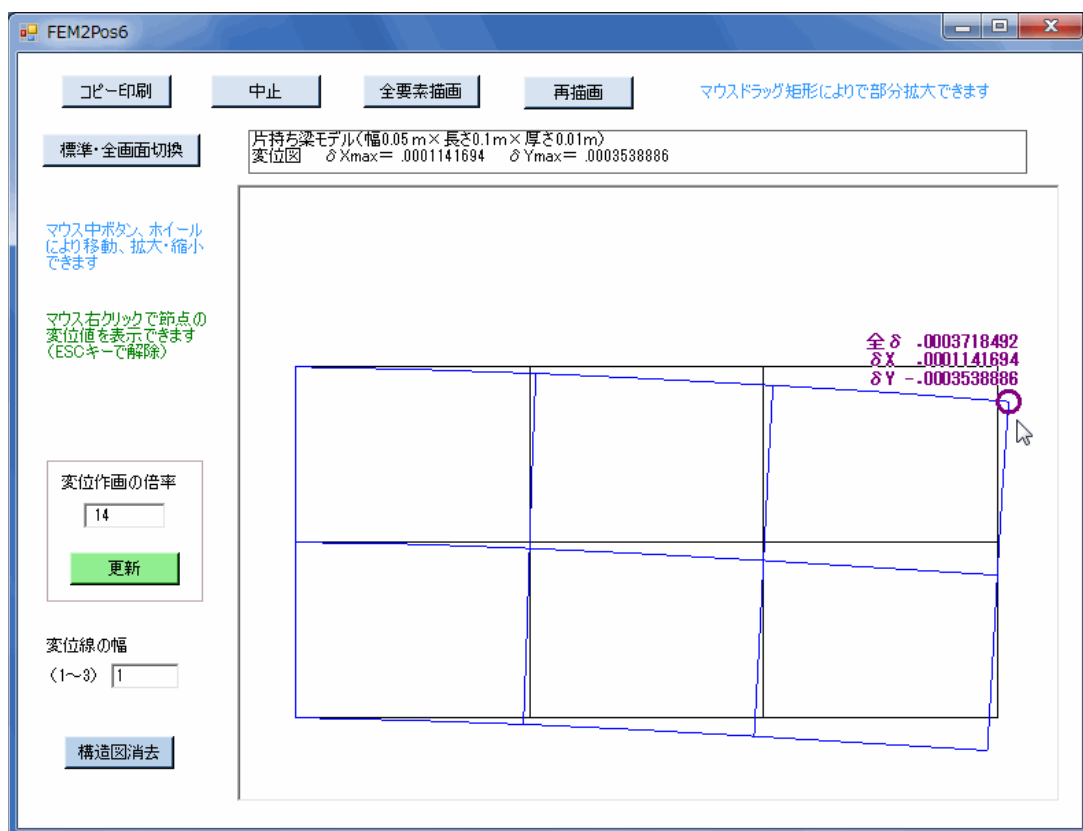


図8-16 変位図の作画画面（マウス右クリックの節点の変位値表示）



## 8.8 変位図の作画画面（板の曲げ）

図8-17に板の曲げの変位図作画画面（フランジ）を示します。同図のように、3次元グラフィックの変位図となっています。ただし、板の厚さは無視しています。

図8-17は、本画面に移った状態のもので、作画のパラメーターは標準条件になっています。

- ①同画面のように、元の構造図に対して、青色で変位図が表示されています。
- ②本画面の左側の「変位作画の倍率」は、構造寸法に対する変位の作画倍率を示します。本数値を任意に変更して「更新」ボタンをクリックすると、変更が反映されます。
- ③本画面の左側に「変位線の幅」のパラメーターを表示してあり、それを変更できます。変更した後は、「再描画」ボタンをクリックすると作画画面が変更されます。  
◇「変位線の幅」は1～3が可能で、初期値は1にしてあります。
- ④本画面の左下側の「構造図消去」ボタンをクリックすると、図8-18のように構造図なしの変位図だけになります。同図で「構造図作画」ボタンをクリックすると元の画面に戻ります。
- ⑤「変位作画の倍率」と「構造図消去（または作画）」以外のパラメーターを変更した後、最初の状態に戻すには、「標準条件に設定」ボタンをクリックします。
- ⑥「Shift+マウス」により構造を回転することができます。  
◇変位図の任意の場所で、Shiftキーとマウス左ボタンを押したまま、回転したい方向へマウスを移動させ、そこでマウスボタンを離します。そうしますと、回転が実行されます。  
◇図8-19にマウスの操作方向と回転方向の関係を示します。同図のように、スクリーンの場所により、垂直軸上向き回り、X軸回りの各回転、または構造中心回りの旋回が実施されます。 注）垂直軸上向きは-Z軸を表わします。  
◇変位図の「説明」ボタンをクリックすると、図8-19と同じ説明図が表示されます。
- ⑦「ホーム」ボタンをクリックすると、初期の回転位置に戻ります。
- ⑧マウス右クリックで任意の節点を選択すると、同節点の変位値が表示されます。画面例は、第10章の計算例の図を参照してください。  
◇本機能を使用中は、描画保存がありません（描画のさかのぼりが無効）。  
◇ESCキーを押すと節点選択が解除されます。
- ⑨「標準・全画面切換」ボタンをクリックすると、標準画面と全画面を切り換えることができます。また、画面Formの右下コーナー等をマウスドラッグすることにより、標準画面と全画面の間で自由に拡大・縮小できます。
- ⑩マウス中ボタン、ホイールにより移動、拡大・縮小を行なうことができます。中ボタンを押したまま動かせば図形を移動できます。また、ホイールの回転により拡大・縮小ができます。
- ⑪マウスドラッグ矩形により、変位図の一部を拡大できます。操作方法是6.15節の構造図と同様です。
- ⑫繰り返して描画を実施した場合、「前の描画」ボタンをクリックすると1つずつ前の描画にさかのぼることができます。

◇さかのぼれる描画の数は最大8つです。

◇回転操作があっても無視され、初期の回転位置で描画されます。

- ⑬本画面で「コピー印刷」ボタンをクリックすると、プリンターで画面コピーを印刷できます。

◇「通常画面」の作画が印刷されます。

- ⑭本画面を終了するには、「中止」ボタンをクリックします。

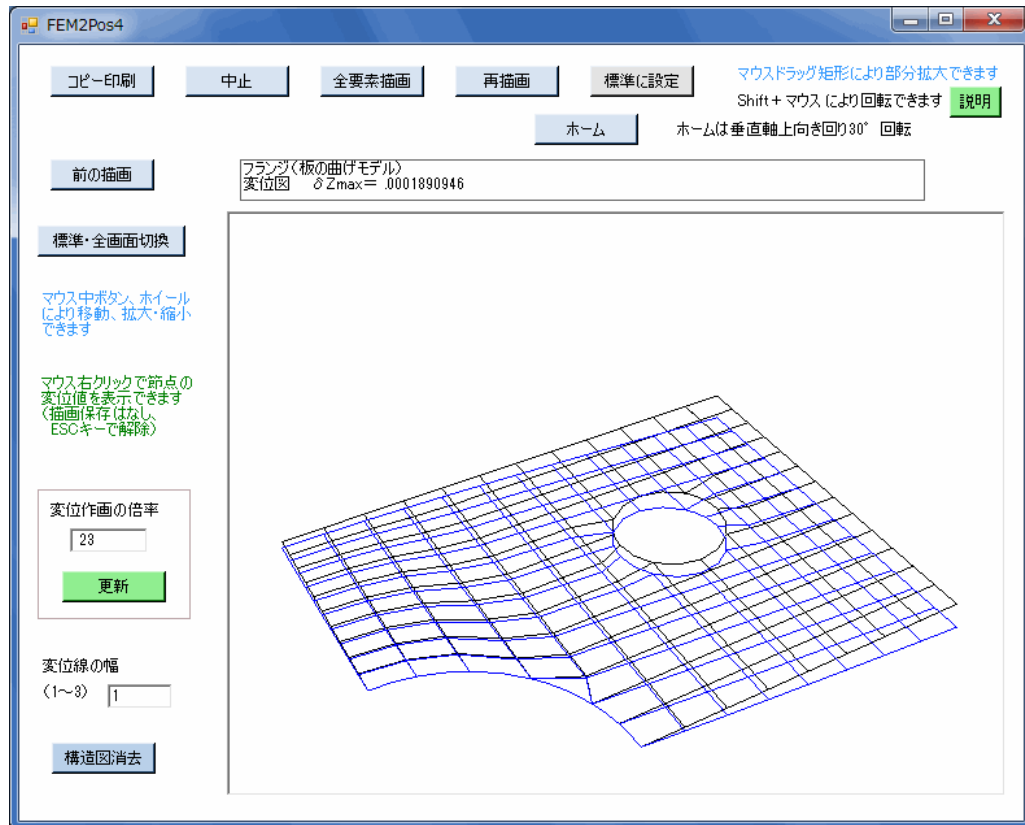


図8-17 板の曲げの変位図作画画面（フランジ）

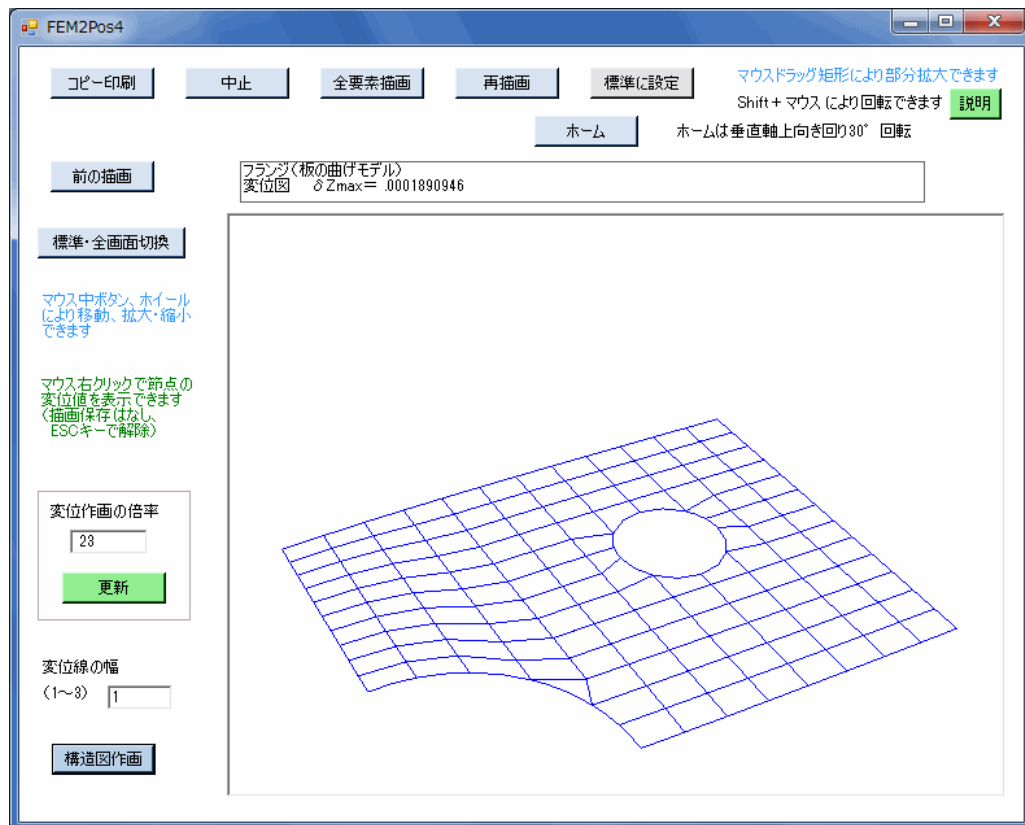


図8-18 板の曲げの変位図作画画面（フランジ、構造図消去）

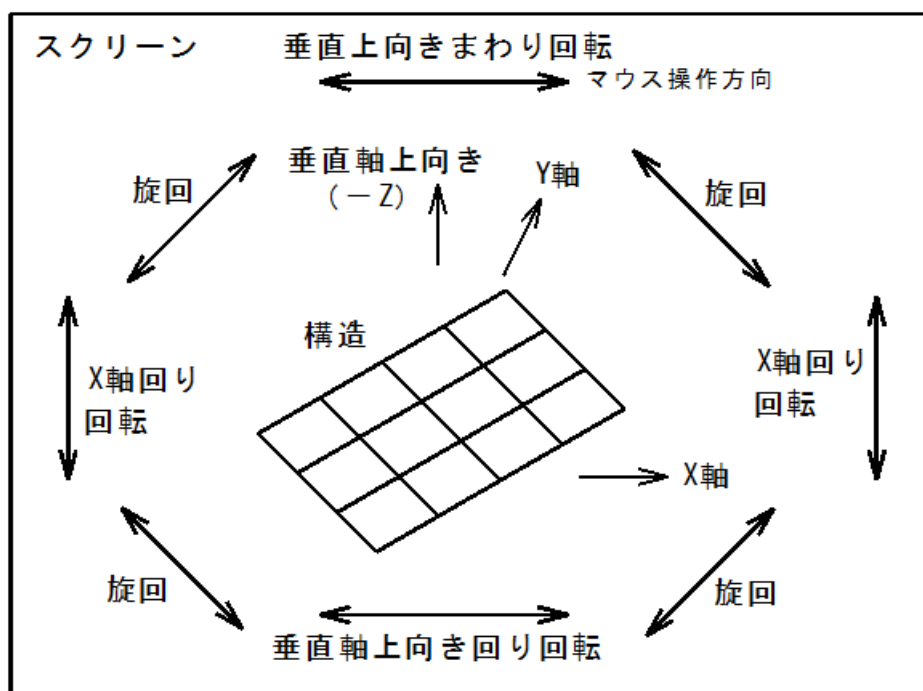


図8-19 マウスの移動方向と回転方向との関係（Shiftキー併用）

## 8.9 解析結果の主要値表示

図8-20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。

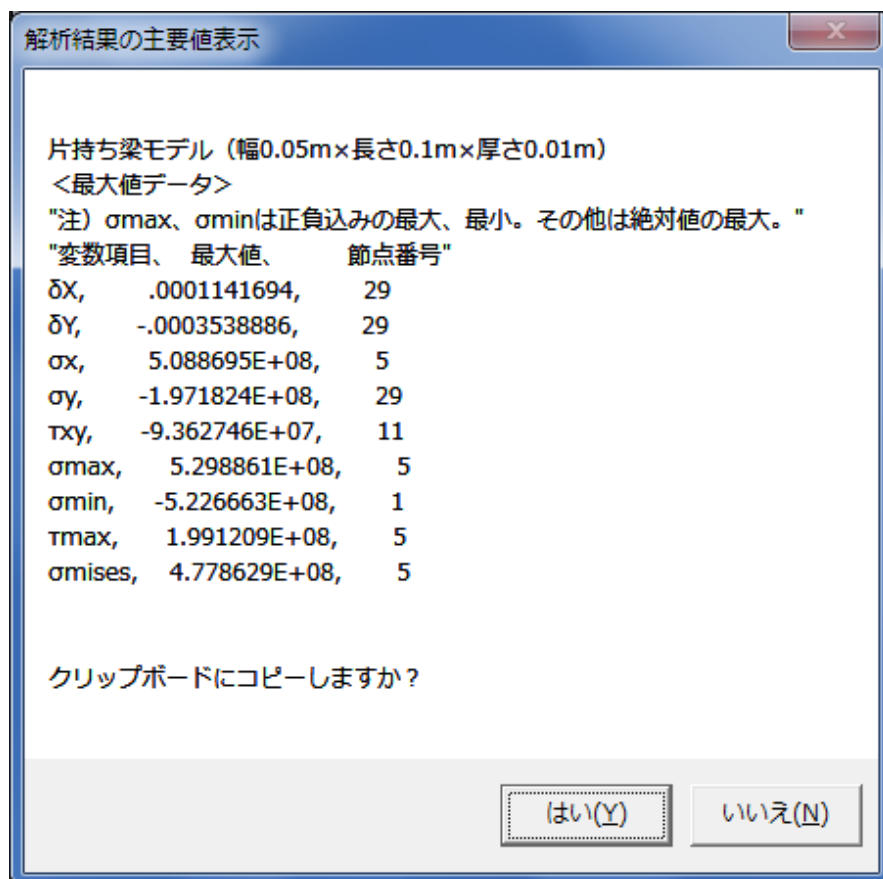


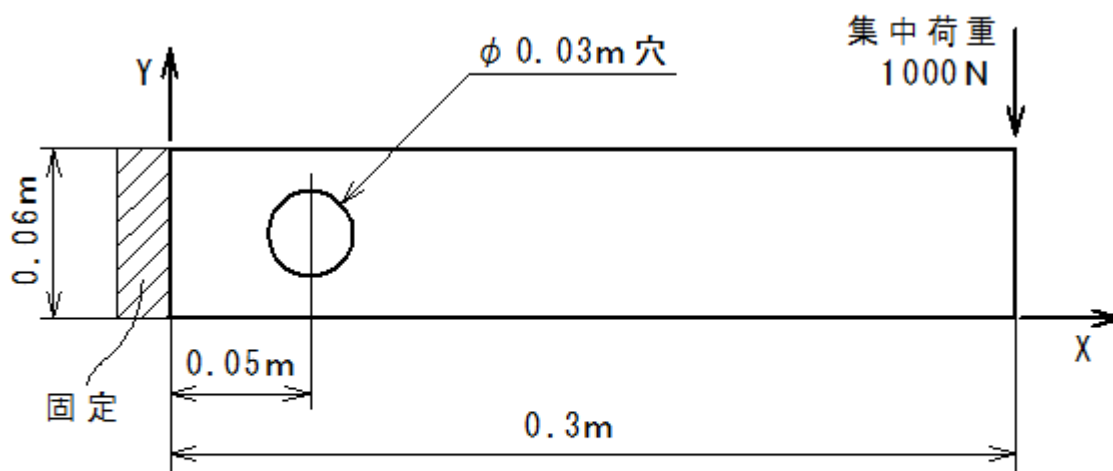
図8-20 解析結果の主要値表示の画面

## 第9章 平面応力／歪みの計算例

平面応力も平面歪みも構造はほとんど同じで、プログラム内の計算式がわずかに異なるだけなので、ここでは平面応力の計算例だけを示します。もっと複雑な構造解析も十分可能ですが、わかりやすい計算例を示すため、あえて簡単な構造を取り上げました（次章以降の計算例も同様）。

### 9.1 構造モデル

図9-1にモデル図を示します。同図のように、左端を固定した片持ち穴明き梁です。荷重は右端に1000Nの集中荷重が作用します。



[材料] ヤング率 :  $2.1 \times 10^5$  MPa  
ポアソン比 : 0.3      板厚 : 0.01m

図9-1 片持ち穴明き梁の構造モデル図

### 9.2 入力データ

図9-2に入力データファイルの内容を示します。

```

プログラム名, FEM2D
片持ち穴明き梁 (0.06m×0.3m長、φ0.03m穴)
問題のタイプ, 1
節点数, 282
要素数, 76
拘束節点数, 9
材料データ数, 1
荷重節点数, 1
座標位置荷重数, 0
表面分布荷重数, 0
バネ支持個数, 0
傾斜拘束節点数, 0
自重の有無 (0:なし、1:あり), 0
回転遠心力の有無 (0:なし、1:あり), 0
ガウス積分点数, 3
1節点当り変数の数, 2
材料データの成分数, 4
要素データ (要素番号、材料番号、8節点番号)
1, 1, 1, 10, 15, 16, 17, 11, 3, 2
2, 1, 3, 11, 17, 18, 19, 12, 5, 4
3, 1, 5, 12, 19, 20, 21, 13, 7, 6
4, 1, 7, 13, 21, 22, 23, 14, 9, 8
5, 1, 23, 22, 21, 25, 34, 36, 38, 27
6, 1, 38, 36, 34, 41, 52, 56, 58, 43
7, 1, 21, 20, 19, 24, 29, 32, 34, 25
8, 1, 34, 32, 29, 40, 47, 50, 52, 41
9, 1, 19, 18, 17, 26, 35, 33, 29, 24
10, 1, 29, 33, 35, 42, 53, 51, 47, 40
. . . . .
67, 1, 236, 243, 250, 251, 252, 244, 238, 237
68, 1, 238, 244, 252, 253, 254, 245, 240, 239
69, 1, 246, 255, 260, 261, 262, 256, 248, 247
70, 1, 248, 256, 262, 263, 264, 257, 250, 249
71, 1, 250, 257, 264, 265, 266, 258, 252, 251
72, 1, 252, 258, 266, 267, 268, 259, 254, 253
73, 1, 260, 269, 274, 275, 276, 270, 262, 261
74, 1, 262, 270, 276, 277, 278, 271, 264, 263
75, 1, 264, 271, 278, 279, 280, 272, 266, 265
76, 1, 266, 272, 280, 281, 282, 273, 268, 267
. . . . .
節点データ (節点番号、X座標、Y座標)
1, 0, 0
2, 0, .0075
3, 0, .015
4, 0, .0225
5, 0, .03
6, 0, .0375
7, 0, .045
8, 0, .0525
9, 0, .06
10, .01, 0
. . . . .
273, .289, .06
274, .3, 0
275, .3, .0075
276, .3, .015

```

図9-2 (1/2)

片持ち穴明き梁の入力データファイル

```

277, .3, .0225
278, .3, .03
279, .3, .0375
280, .3, .045
281, .3, .0525
282, .3, .06
拘束節点データ (拘束番号、節点番号、X拘束、 $\delta X$ 、Y拘束、 $\delta Y$ )
1, 3, 1, 0, 1, 0
2, 2, 1, 0, 1, 0
3, 1, 1, 0, 1, 0
4, 5, 1, 0, 1, 0
5, 4, 1, 0, 1, 0
6, 7, 1, 0, 1, 0
7, 6, 1, 0, 1, 0
8, 9, 1, 0, 1, 0
9, 8, 1, 0, 1, 0
材料データ (材料番号、ヤング率、ポアソン比、厚さ、比重量)
1, 2.1E+11, .3, .01, 0
荷重節点 (荷重番号、節点番号、X方向荷重、Y方向荷重)
1, 282, 0, -1000

```

図9-2 (2/2) 片持ち穴明き梁の入力データファイル

### 9.3 計算結果データ

図9-3に計算結果データファイルの内容を示します。同ファイルで、変位は節点262で最大となり、その $\delta Y$ の絶対値は0.000256mです。また、応力は節点9で最大（正方向）となり、 $\sigma_{\max}$ は57.14MPaです。

なお、計算時間は0秒台です。

### 9.4 応力の等高線図

図9-4に $\sigma_{\max}$ の等高線図を示します。

### 9.5 変位図

図9-5に変位図を示します。

<<2次元構造解析の計算結果>>

片持ち穴明き梁 (0.06m×0.3m長、φ0.03m穴)

[入力データファイル], C:¥VB2022¥2次元構造解析¥Data¥Plate1Beam.dat

\*\*\* 計算結果 \*\*\*

バンド幅, 92

保存配列のインデックス数, 18158

\*\* 変位等の出力 \*\*

<節点番号、 $\delta X$ 、 $\delta Y$ >

1,	0,	0
2,	0,	0
3,	0,	0
4,	0,	0
5,	0,	0
6,	0,	0
7,	0,	0
8,	0,	0
9,	0,	0
10,	-2.407915E-06,	-1.151842E-06
11,	-1.010486E-06,	-4.935339E-07
12,	-9.665001E-15,	-4.131648E-07
.....		
271,	-1.315977E-07,	-.0002406507
272,	1.800494E-05,	-.0002408775
273,	3.711365E-05,	-.0002409286
274,	-3.629819E-05,	-.0002538825
275,	-2.720624E-05,	-.0002538793
276,	-1.814075E-05,	-.0002538938
277,	-9.105517E-06,	-.0002539504
278,	-8.906704E-08,	-.0002540734
279,	8.960568E-06,	-.0002543256
280,	1.80841E-05,	-.0002546806
281,	2.748807E-05,	-.0002554994
282,	3.775645E-05,	-.0002564542

\*\* 節点応力の出力 \*\*

<節点番号、 $\sigma x$ 、 $\sigma y$ 、 $\tau xy$ 、 $\sigma max$ 、 $\sigma min$ 、 $\tau max$ 、 $\sigma mises$ 、 $\theta ps$ >

1,	-5.555488E+07,	-1.666646E+07,	-8017062,	-1.507854E+07,	-
5,	71428E+07,	2.103213E+07,	5.129359E+07,	-78.79655	
2,	-3.933014E+07,	-1.174027E+07,	-3617695,	-1.127379E+07,	-
3,	979662E+07,	1.426141E+07,	3.55276E+07,	-82.6526	
3,	-2.304644E+07,	-6913929,	-151830.2,	-6912500,	-
2,	304787E+07,	8067683,	2.048581E+07,	-89.46083	
4,	-1.042167E+07,	-3120151,	467974.5,	-3090279,	-
1,	045154E+07,	3680632,	9299805,	86.34767	
5,	-.07609343,	-.02282832,	676401.3,	676401.2,	-676401.3,
676401.3,	1171561,	44.99998			
6,	1.042168E+07,	3120152,	467974.4,	1.045155E+07,	
3090281,	3680634,	9299810,	3.652325		
7,	2.304644E+07,	6913931,	-151830.6,	2.304787E+07,	
6912502,	8067684,	2.048581E+07,	-.5391737		



```

. . . . .
. . . . .
276, 265501.6, -576292.5, -235696.8, 327002, -637792.9, 482397.5,
849864.5, -14.62413
277, 254503.5, -2487605, -476421.8, 334920, -2568021, 1451471,
2750816, -9.58081
278, -92186.51, -5025614, -852158.7, 50860.48, -5168661, 2609761,
5194278, -9.529076
279, -528275.8, -8807874, -1440239, -284899.8, -9051250, 4383176,
8912217, -9.591411
280, -2580464, -1.69744E+07, -3489559, -1779096, -1.777577E+07,
7998336, 1.695636E+07, -12.93357
281, -4339963, -2.648713E+07, -4650359, -3403131, -2.742396E+07,
1.201042E+07, 2.589069E+07, -11.39001
282, 4764826, -2.72092E+07, -5110473, 5561779, -2.800615E+07,
1.678397E+07, 3.116155E+07, -8.863606

```

\*\*\*\*\*

**\*\* 拘束節点の反力 \*\***

<節点番号、Fx、Fy>

```

3, 1095.705, 100.7131
2, 3407.623, -157.3845
1, 1618.811, 691.5446
5, -8.010864E-05, -5.78866
4, 1110.478, -131.9789
7, -1095.705, 100.7135
6, -1110.478, -131.9794
9, -1618.812, 691.5449
8, -3407.622, -157.3848

```

\*\*\*\*\*

**<最大値データ>**

注)  $\sigma_{max}$ 、 $\sigma_{min}$ は正負込みの最大、最小。その他は絶対値の最大。

変数項目、 最大値、 節点番号

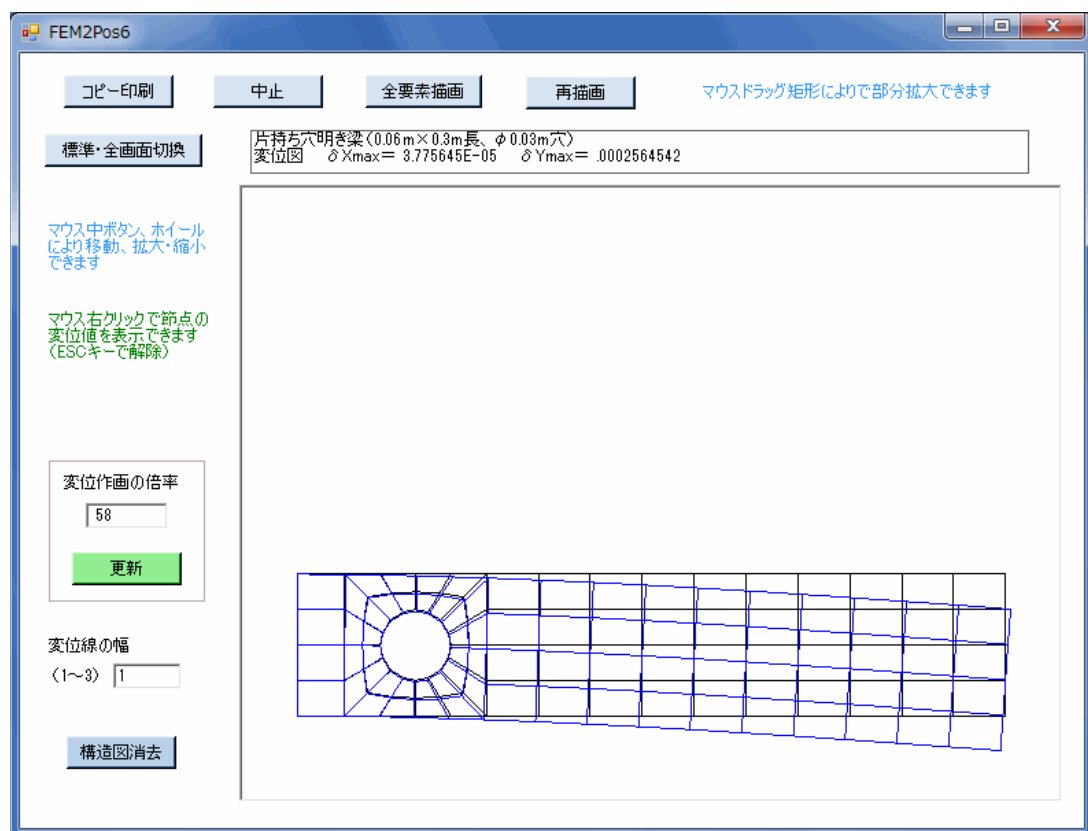
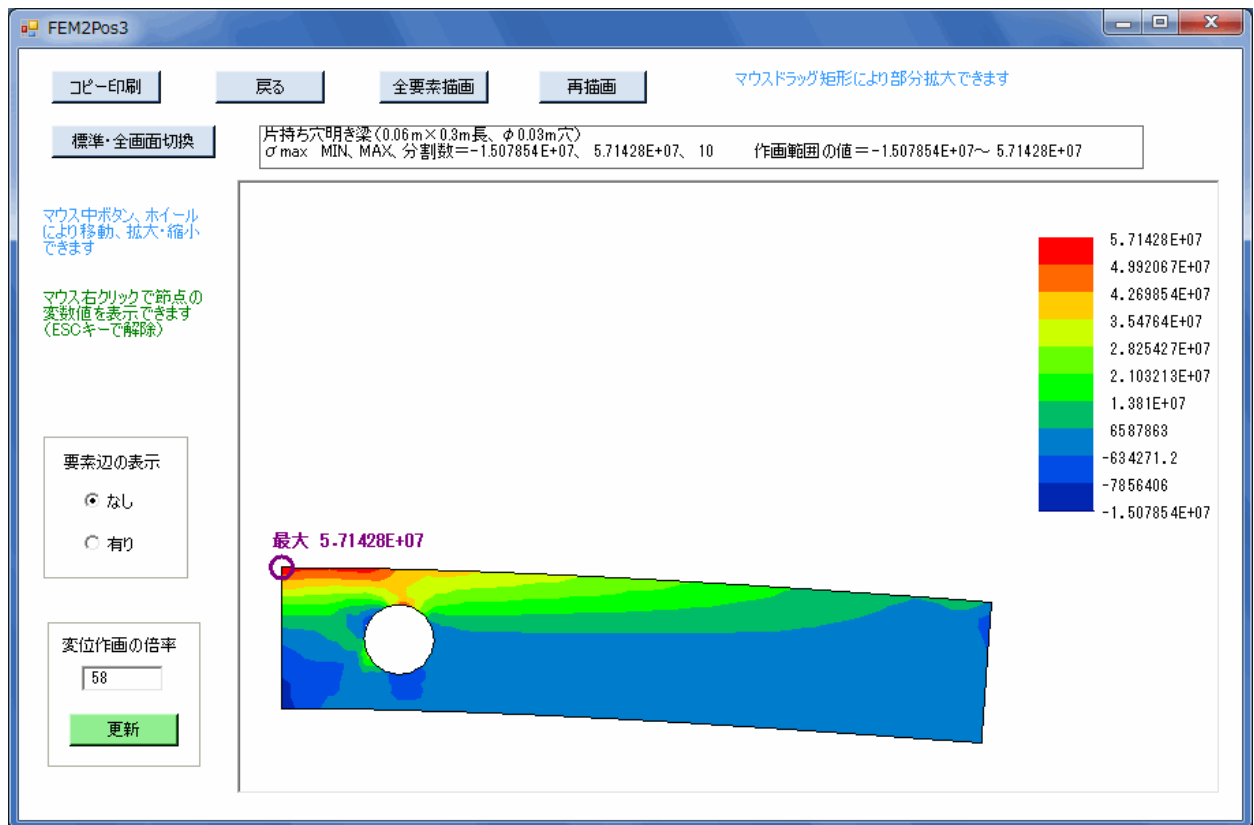
```

δX, 3.775645E-05, 282
δY, -.0002564542, 282
σx, -5.555488E+07, 1
σy, -2.72092E+07, 282
τxy, -1.156703E+07, 89
σmax, 5.71428E+07, 9
σmin, -5.71428E+07, 1
τmax, 2.728975E+07, 49
σmises, 5.496449E+07, 49

```

END 0h 0min 0s

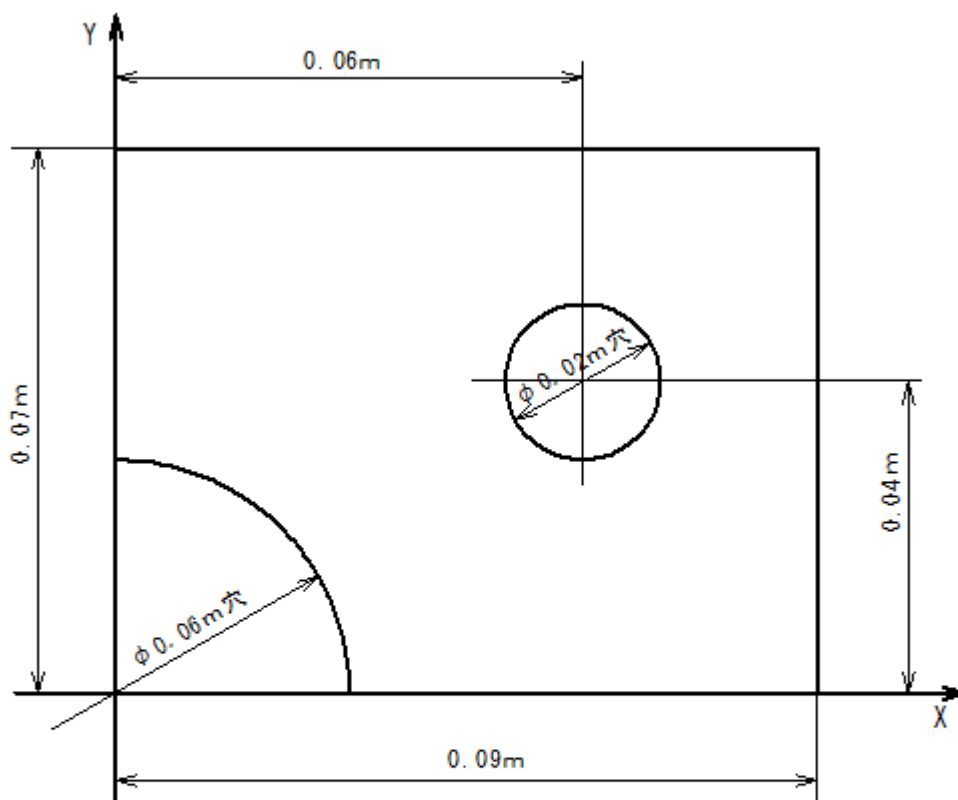
図9-3 (2/2) 片持ち穴明き梁の計算結果データファイル



## 第10章 板の曲げの計算例

### 10.1 構造モデル

図10-1にモデル図を示します。同図はフランジ部品で、対称性から4等分の1つだけを取り上げています。荷重は $\phi 0.02\text{m}$ 穴部に10000Nの荷重が作用します。



【材料】 ヤング率 :  $2.1 \times 10^5$  MPa

ポアソン比 : 0.3      板厚 : 0.02m      比重量は無視

【荷重】  $\phi 0.02\text{m}$  穴円周部に10000N (円周の8節点に振り分け)

【境界条件】  $\phi 0.06\text{m}$  穴円周を単純支持 (X軸、Y軸に関して対称)

図10-1      フランジの構造モデル図 (板の曲げ)

### 10.2 入力データ

図10-2に入力データファイルの内容を示します。

```

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

```

図10-2 (1/2) フランジの入力データファイル

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

図10-2 (2/2) フランジの入力データファイル

### 10.3 計算結果データ

図10-3に計算結果データファイルの内容を示します。同ファイルで、撓み $\delta Z$ は節点477で最大の0.000186mとなります。また、応力（絶対値）は節点22で最大となり、その $\sigma_x$ は182.7MPaです。なお、計算時間は0秒台です。

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

<< 2次元構造解析の計算結果 >>

フランジ（板の曲げモデル）

【入力データファイル】，C:\¥VB2022¥2次元構造解析¥Data¥Plate2N.dat

\*\*\* 計算結果 \*\*\*

バンド幅, 147

保存配列のインデックス数, 137709

\*\* 変位等の出力 \*\*

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

1,	0,	.001443167,	0
2,	2.820298E-06,	.001398591,	0
3,	5.665299E-06,	.001365588,	0
4,	8.486079E-06,	.001336697,	0
5,	1.128044E-05,	.001310057,	0
6,	1.402782E-05,	.00128361,	0
7,	1.672297E-05,	.001256677,	0
8,	1.93557E-05,	.001228899,	0
9,	2.192307E-05,	.001200169,	0
10,	2.442029E-05,	.001170627,	0
11,	2.684546E-05,	.001140302,	0
12,	2.919654E-05,	.001109414,	0
13,	3.147248E-05,	.001078044,	0
14,	3.367279E-05,	.00104639,	0
15,	3.579706E-05,	.001014534,	0
16,	3.784582E-05,	.0009826215,	0
17,	3.981914E-05,	.0009507089,	0
18,	4.171825E-05,	.0009188787,	0
19,	4.354365E-05,	.0008871326,	0
20,	4.529706E-05,	.0008554347,	0
. . . . .			
459,	.0001680694,	.000356095,	.002379878
460,	.0001690136,	.0003879188,	.00236555
461,	.0001700196,	.0004157242,	.00234922
462,	.0001710753,	.0004390723,	.002330775
463,	.0001721631,	.0004581572,	.002310701
464,	.0001732855,	.0004722708,	.00228959
465,	.0001744159,	.0004823512,	.002268051
466,	.0001755712,	.0004880999,	.002247485
467,	.0001767277,	.0004909378,	.002228386
468,	.0001779027,	.0004913199,	.002211757
469,	.0001790838,	.000490426,	.002197755
470,	.000180285,	.0004889973,	.002186529
471,	.0001814954,	.0004873435,	.002177679
472,	.0001827269,	.0004860736,	.002171063
473,	.0001839734,	.0004848803,	.002166288
474,	.000185236,	.0004840321,	.002163083
475,	.0001865121,	.0004833211,	.00216118
476,	.0001877988,	.0004829906,	.002160314
477,	.0001890946,	.0004828266,	.002159755

図10-3 (1/2)

フランジの計算結果データファイル

**\*\* 節点応力の出力 \*\***

< 節点番号、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{xz}$ 、 $\tau_{yz}$ 、 $\sigma_{max}$ 、 $\sigma_{max}$ (裏)、 $\sigma_{min}$ 、 $\sigma_{min}$ (裏)、 $\tau_{max}$ 、 $\sigma_{mises}$ 、 $\theta_{ps}$ >

```

1, 1.824098E+08, 1724037, 267026.7, 348879.1, -4097956, 1.824102E+08, -
1723642, 1723642, -1.824102E+08, 9.034326E+07, 1.816942E+08, .08467444
2, 1.662141E+08, 8260457, 398427, 312519.7, 1714712, 1.662152E+08, -
8259452, 8259452, -1.662152E+08, 7.897785E+07, 1.622713E+08, .1445234
3, 1.525814E+08, 1.574853E+07, 165941.4, -450671.8, 5738280, 1.525816E+08,
-1.574833E+07, 1.574833E+07, -1.525816E+08, 6.841663E+07,
1.456902E+08, .06948423
4, 1.457427E+08, 1.396818E+07, 151264.5, -160392.1, 6911624, 1.457429E+08,
-1.396801E+07, 1.396801E+07, -1.457429E+08, 6.588744E+07,
1.39799E+08, .06576997
5, 1.369314E+08, 1.392949E+07, 188616.7, -147062.8, 7935242, 1.369317E+08,
-1.392921E+07, 1.392921E+07, -1.369317E+08, 6.150126E+07,
1.312476E+08, .08785968

```

.....  
 .....

```

474, -280059.6, -699739.6, -45675.82, 144221.1, -1290267, -275146, 704653.1,
-704653.1, 275146, 1290267, 2331336, -6.140006
475, -253948.5, -488049.8, 92838.13, 122569.5, -704032.1, -221601.1,
520397.1, -520397.1, 221601.1, 704032.1, 1317821, 19.20977
476, -139738.6, -237287.5, 107342.3, 98592.35, -348660.7, -70609.2, 306417,
-306417, 70609.2, 348660.7, 686363.8, 32.78191
477, -308328.1, -155579.1, 118004.2, 166404.9, 14095.35, -91390.28, 372517,
-372517, 91390.28, 166404.9, 443558.9, 61.45583

```

**\*\* 拘束節点の反力 \*\***

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

```

1, 70.49454, 0, -8.088244
2, 0, 0, -29.03486
3, 0, 0, -13.29553

```

.....  
 .....

```

437, 0, -12.84179, 0
451, 0, -3.25072, 0

```

**< 最大値データ >**

注)  $\sigma_{max}$ 、 $\sigma_{min}$ は正負込みの最大、最小。その他は絶対値の最大。

変数項目、	最大値、	節点番号
$\delta Z$ ,	.0001890946,	477
$\theta X$ ,	.001444919,	33
$\theta Y$ ,	.002998227,	155
$\sigma_x$ ,	1.826837E+08,	22
$\sigma_y$ ,	1.54119E+08,	155
$\tau_{xy}$ ,	-7.778833E+07,	86
$\tau_{xz}$ ,	-3.727583E+07,	65
$\tau_{yz}$ ,	5.126983E+07,	97
$\sigma_{max}$ ,	1.853628E+08,	22
$\sigma_{min}$ ,	-1.853628E+08,	22
$\tau_{max}$ ,	9.107769E+07,	22
$\sigma_{mises}$ ,	1.856482E+08,	54
END	0h 0min 0s	

図10-3 (2/2) フランジの計算結果データファイル

## 10.4 応力の等高線図

図10-4に $\sigma_x$ の等高線図（要素辺とマウス右クリック点変数の表示有り）を示します。

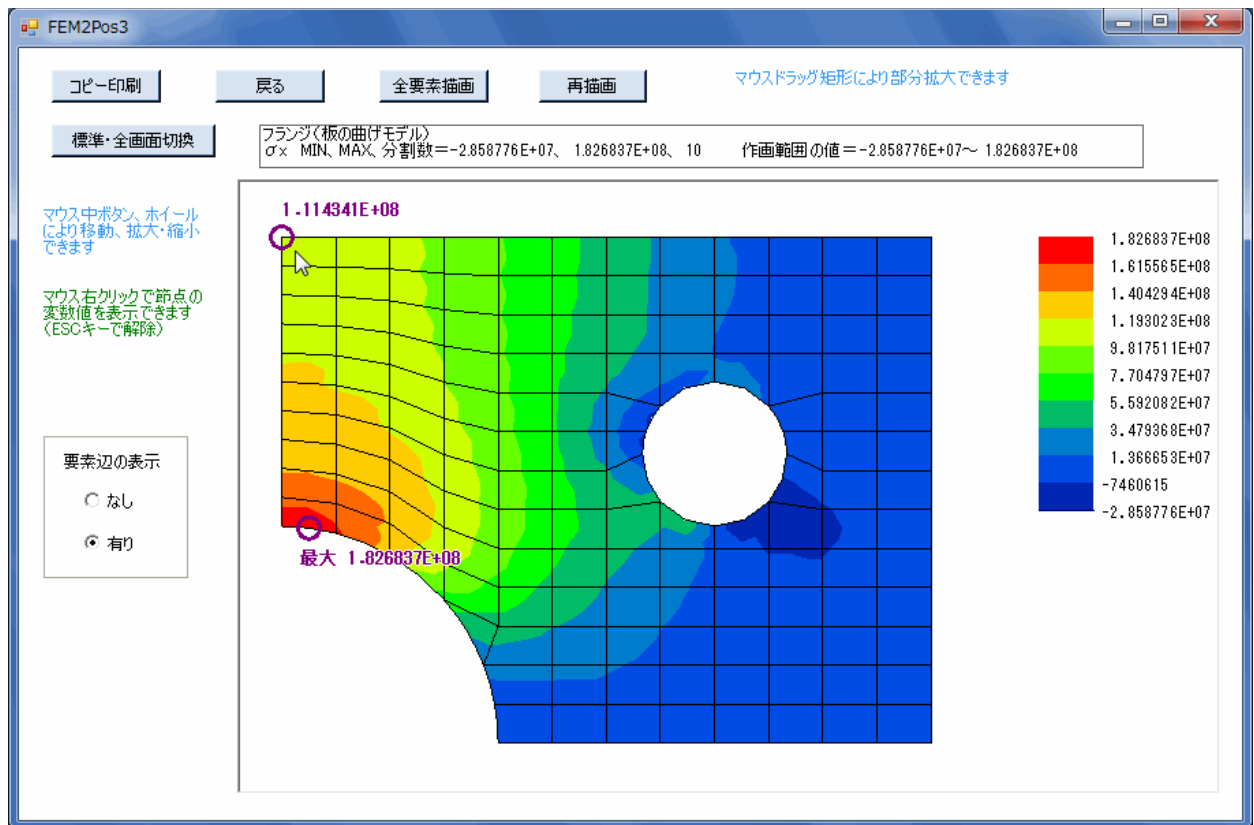


図10-4 フランジの応力 $\sigma_x$ の等高線図（要素辺とマウス右クリック点変数の表示有り）

## 10.5 変位図

図10-5に変位図（マウス右クリック点変数の表示有り）を示します。



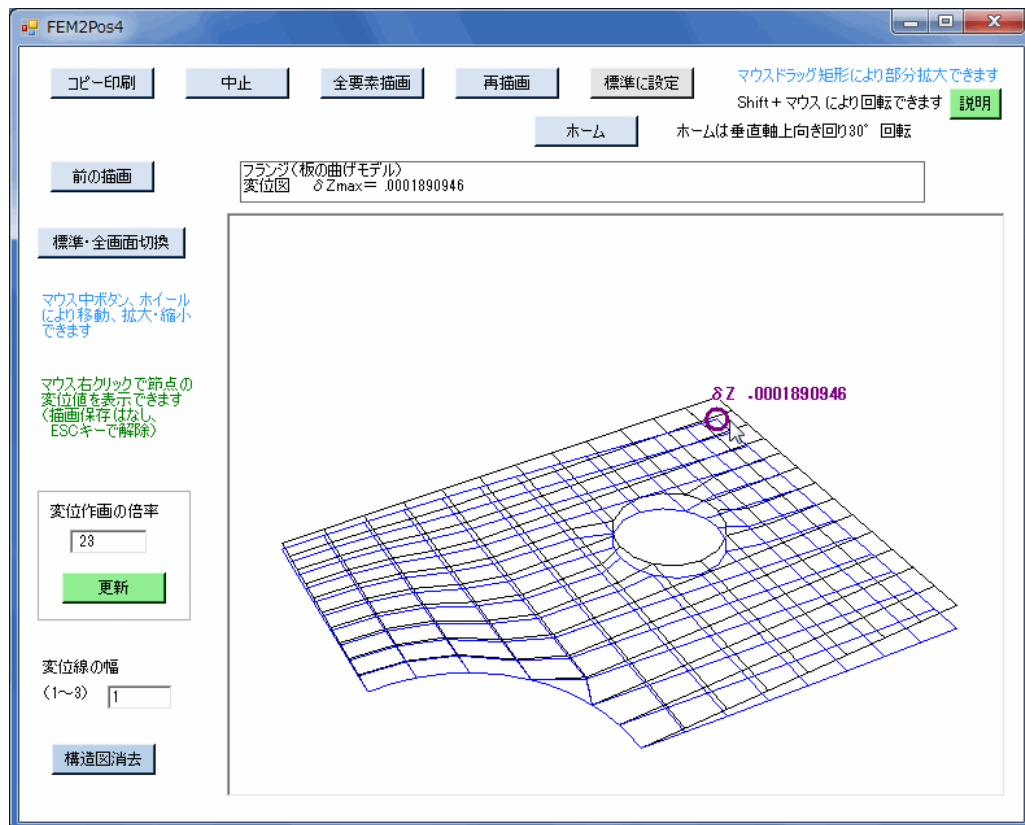
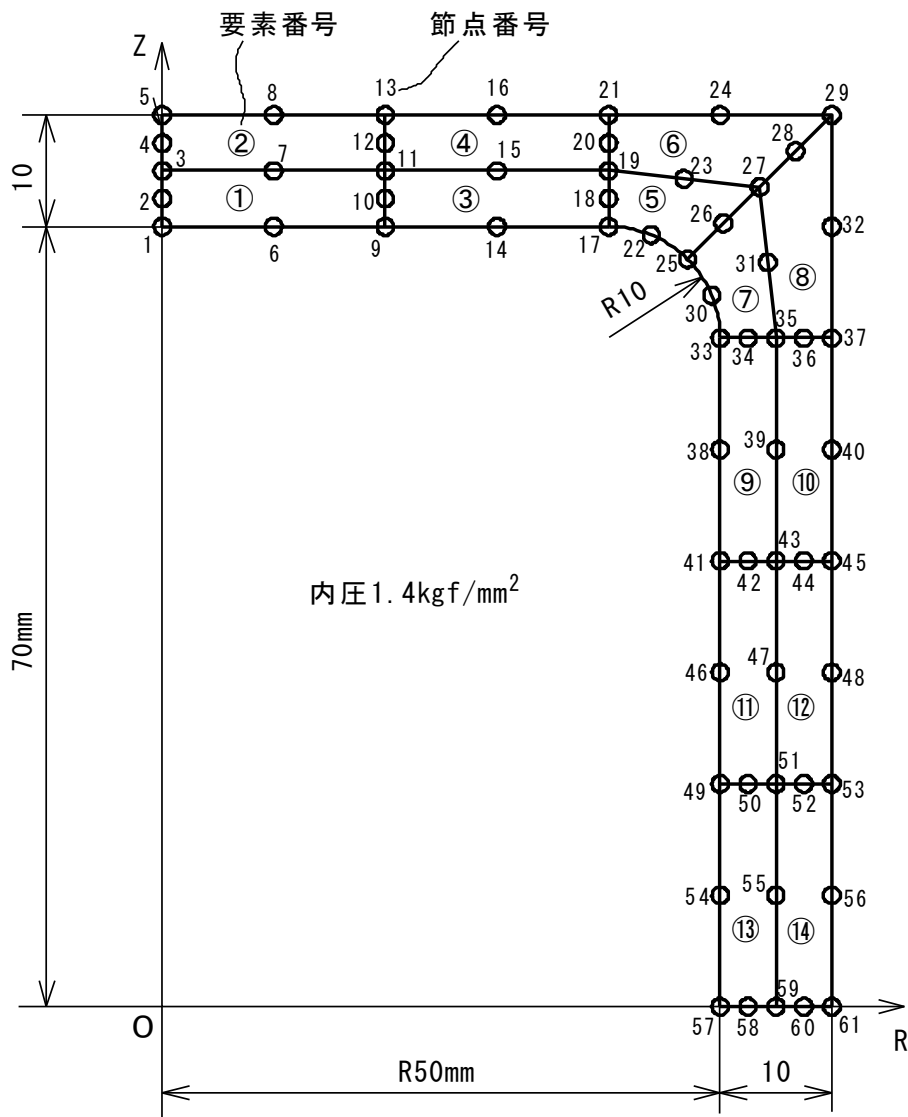


図10-5 フランジの変位図（マウス右クリック点変数の表示有り）

## 第11章 軸対称体の計算例

### 11.1 構造モデル

図11-1にモデル図を示します。同図は内圧容器で、対称性から中心軸断面の半分だけを取り上げています。荷重は容器内面全体に内圧1.4kgf/mm<sup>2</sup>が作用します。



〔材料〕 ヤング率：21000kgf/mm<sup>2</sup>      ポアソン比：0.3

〔境界条件〕 節点1～5はR方向が固定、Z方向がフリー

節点57～61はR方向がフリー、Z方向が固定

図11-1 内圧容器の構造モデル図（軸対称体）

### 11.2 入力データ

図11-2に入力データファイルの内容を示します。

プログラム名, FEM2D									
内圧容器の解析 (軸対称体モデル)									
問題のタイプ, 4									
節点数, 61									
要素数, 14									
拘束節点数, 5									
材料データ数, 1									
荷重節点数, 0									
座標位置荷重数, 0									
表面分布荷重数, 7									
バネ支持個数, 0									
傾斜拘束節点数, 0									
自重の有無 (0:なし、1:あり), 0									
回転遠心力の有無 (0:なし、1:あり), 0									
ガウス積分点数, 3									
1節点当り変数の数, 2									
材料データの成分数, 3									
要素データ (要素番号、材料番号、8節点番号)									
1,	1,	1,	6,	9,	10,	11,	7,	3,	2
2,	1,	3,	7,	11,	12,	13,	8,	5,	4
3,	1,	9,	14,	17,	18,	19,	15,	11,	10
4,	1,	11,	15,	19,	20,	21,	16,	13,	12
5,	1,	17,	22,	25,	26,	27,	23,	19,	18
6,	1,	19,	23,	27,	28,	29,	24,	21,	20
7,	1,	25,	30,	33,	34,	35,	31,	27,	26
8,	1,	27,	31,	35,	36,	37,	32,	29,	28
9,	1,	33,	38,	41,	42,	43,	39,	35,	34
10,	1,	35,	39,	43,	44,	45,	40,	37,	36
11,	1,	41,	46,	49,	50,	51,	47,	43,	42
12,	1,	43,	47,	51,	52,	53,	48,	45,	44
13,	1,	49,	54,	57,	58,	59,	55,	51,	50
14,	1,	51,	55,	59,	60,	61,	56,	53,	52
節点データ (節点番号、R座標、Z座標)									
1,	0,	70							
2,	0,	72.5							
3,	0,	75							
4,	0,	77.5							
5,	0,	80							
6,	10,	70							
7,	10,	75							
8,	10,	80							
9,	20,	70							
10,	20,	72.5							
11,	20,	75							
12,	20,	77.5							
13,	20,	80							
14,	30,	70							
15,	30,	75							
16,	30,	80							
17,	40,	70							
18,	40,	72.5							
19,	40,	75							
20,	40,	77.5							
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

図11-2 (1/2) 内圧容器の入力データファイル

29,	60,	80
30,	49. 24,	63. 83
31,	54. 27,	66. 77
32,	60,	70
33,	50,	60
34,	52. 5,	60
35,	55,	60
36,	57. 5,	60
37,	60,	60
38,	50,	50
39,	55,	50
40,	60,	50
41,	50,	40
42,	52. 5,	40
43,	55,	40
44,	57. 5,	40
45,	60,	40
46,	50,	30
47,	55,	30
48,	60,	30
49,	50,	20
50,	52. 5,	20
51,	55,	20
52,	57. 5,	20
53,	60,	20
54,	50,	10
55,	55,	10
56,	60,	10
57,	50,	0
58,	52. 5,	0
59,	55,	0
60,	57. 5,	0
61,	60,	0

拘束節点データ (拘束番号、節点番号、R拘束、 $\delta R$ 、Z拘束、 $\delta Z$ )

1,	57,	0,	0,	1,	0
2,	58,	0,	0,	1,	0
3,	59,	0,	0,	1,	0
4,	60,	0,	0,	1,	0
5,	61,	0,	0,	1,	0

材料データ (材料番号、ヤング率、ポアソン比、比重量)

1,	21000,	. 3,	0
----	--------	------	---

表面分布荷重 (表面荷重番号、3 節点番号、垂直方向分布荷重、接線方向分布荷重)

1,	1,	6,	9,	1. 4,	0
2,	9,	14,	17,	1. 4,	0
3,	17,	22,	25,	1. 4,	0
4,	25,	30,	33,	1. 4,	0
5,	33,	38,	41,	1. 4,	0
6,	41,	46,	49,	1. 4,	0
7,	49,	54,	57,	1. 4,	0

図11-2 (2/2) 内圧容器の入力データファイル

### 11.3 計算結果データ

図11-3に計算結果データファイルの内容を示します。同ファイルで、変位は節点5で最大となり、その $\delta Z$ は0.09317mmです。また、応力も節点5で最大となり、 $\sigma_{\max}$ は22.48kgf/mm<sup>2</sup>です。なお、計算時間は0秒台です。

### 11.4 応力の等高線図

図11-4に $\sigma_{\max}$ の等高線図(座標系は時計回りに90°回転)を示します。

### 11.5 変位図

図11-5に変位図(座標系は時計回りに90°回転)を示します。

<< 2次元構造解析の計算結果 >>

内圧容器の解析 (軸対称体モデル)

[入力データファイル], C:\¥VB2022¥2次元構造解析¥Data¥PresVesM. dat

\*\*\* 計算結果 \*\*\*

バンド幅, 22

保存配列のインデックス数, 1943

\*\* 変位等の出力 \*\*

<節点番号、 $\delta R$ 、 $\delta Z$ >

1,	0,	.0943326
2,	0,	.09496085
3,	0,	.09495269
4,	0,	.09439245
5,	0,	.09316656
6,	-.004578521,	.08767562
7,	.001085078,	.08814554
8,	.00675618,	.08651809
9,	-.007818718,	.07074658
10,	-.002691749,	.07106637
11,	.00216394,	.07094394
12,	.006958912,	.07047349
13,	.01218615,	.06958581
14,	-.007792306,	.0472426
15,	.003227642,	.04687513
16,	.01419717,	.04603961
17,	-.004420408,	.0243413
18,	.0001703164,	.02386215
19,	.004181651,	.02361538
20,	.008492642,	.02338698
. . . . .		
. . . . .		
43,	.009978115,	.002535818
44,	.009634895,	.003746171
45,	.009272793,	.00503274
46,	.01499962,	9.255112E-05
47,	.0141647,	.001726841
48,	.01335731,	.003319612
49,	.01731192,	.0003067264
50,	.01683962,	.0006837132
51,	.01639757,	.001087514
52,	.01596909,	.001495851
53,	.01555614,	.001850142
54,	.01827399,	.0002201921
55,	.01729829,	.000530672
56,	.01645822,	.0008316656
57,	.01851167,	0
58,	.0179906,	0
59,	.01752043,	0
60,	.0170856,	0
61,	.01668952,	0

図11-3 (1/2)

内圧容器の計算結果データファイル

```

** 節点応力の出力 **
<節点番号、 $\sigma_r$ 、 $\sigma_z$ 、 $\sigma_\theta$ 、 $\tau_{rz}$ 、 $\sigma_{max}$ 、 $\sigma_{min}$ 、 $\tau_{max}$ 、 $\sigma_{mises}$ 、 $\theta_{ps}$ >
1, -16.60592, -2.013381, -16.60592, -1.228459, -1.910687, -16.70861,
7.398962, 14.74684, -85.22142
2, -6.749717, -1.39446, -6.752218, -1.322847, -1.085516, -7.058661,
2.986573, 5.825972, -76.85445
3, 3.052782, -.4941573, 3.052782, -1.300319, 3.478409, -.9197837,
2.199096, 4.201579, -18.12455
4, 12.66102, -.05687006, 12.66352, -1.328131, 12.79823, -.1940865,
6.496161, 12.92549, -5.898612
5, 22.40875, .3520861, 22.40875, -1.216836, 22.47568, .2851579,
11.09526, 22.15714, -3.148197
. . . . .
. . . . .
23, 2.069026, 4.039847, 3.432184, -1.440046, 4.799362, 1.309511,
1.744926, 3.045815, -62.19173
24, -4.498063, .8773242, 2.814919, .6508998, 2.814919, -4.575757,
2.765387, 6.658483, 83.19317
25, 8.010576, 8.457232, 4.141121, -8.723762, 16.96052, -.492716,
8.72662, 15.65926, -45.73321
. . . . .
. . . . .
58, -.9937993, 2.92659, 7.924511, .1030995, 7.924511, -.9965088,
1.962904, 7.744311, 88.49461
59, -.5957468, 3.144561, 7.454505, .09462126, 7.454505, -.5981389,
1.872546, 6.979463, 88.55178
60, -.3270669, 3.471323, 7.311986, .0952329, 7.311986, -.3294531,
1.901581, 6.617704, 88.56469
61, .005082143, 3.631745, 6.932903, .08406373,
6.932903, .003134645, 1.815279, 6.003642, 88.67287
-----
** 拘束節点の反力 **
<節点番号、Fr、Fz>
57, 0, -693.2177
58, 0, -3154.626
59, 0, -1869.367
60, 0, -4063.177
61, 0, -1215.198
-----
<最大値データ>
注)  $\sigma_{max}$ 、 $\sigma_{min}$ は正負込みの最大、最小。その他は絶対値の最大。
変数項目、 最大値、 節点番号
 $\delta R$ , .01851167, 57
 $\delta Z$ , .09496085, 2
 $\sigma_r$ , 22.40875, 5
 $\sigma_z$ , 17.6315, 30
 $\sigma_\theta$ , 22.40875, 5
 $\tau_{rz}$ , -8.723762, 25
 $\sigma_{max}$ , 22.48238, 22
 $\sigma_{min}$ , -16.70861, 1
 $\tau_{max}$ , 11.09526, 5
 $\sigma_{mises}$ , 22.15714, 5
END 0h 0min 0s

```

図11-3 (2/2) 内圧容器の計算結果データファイル

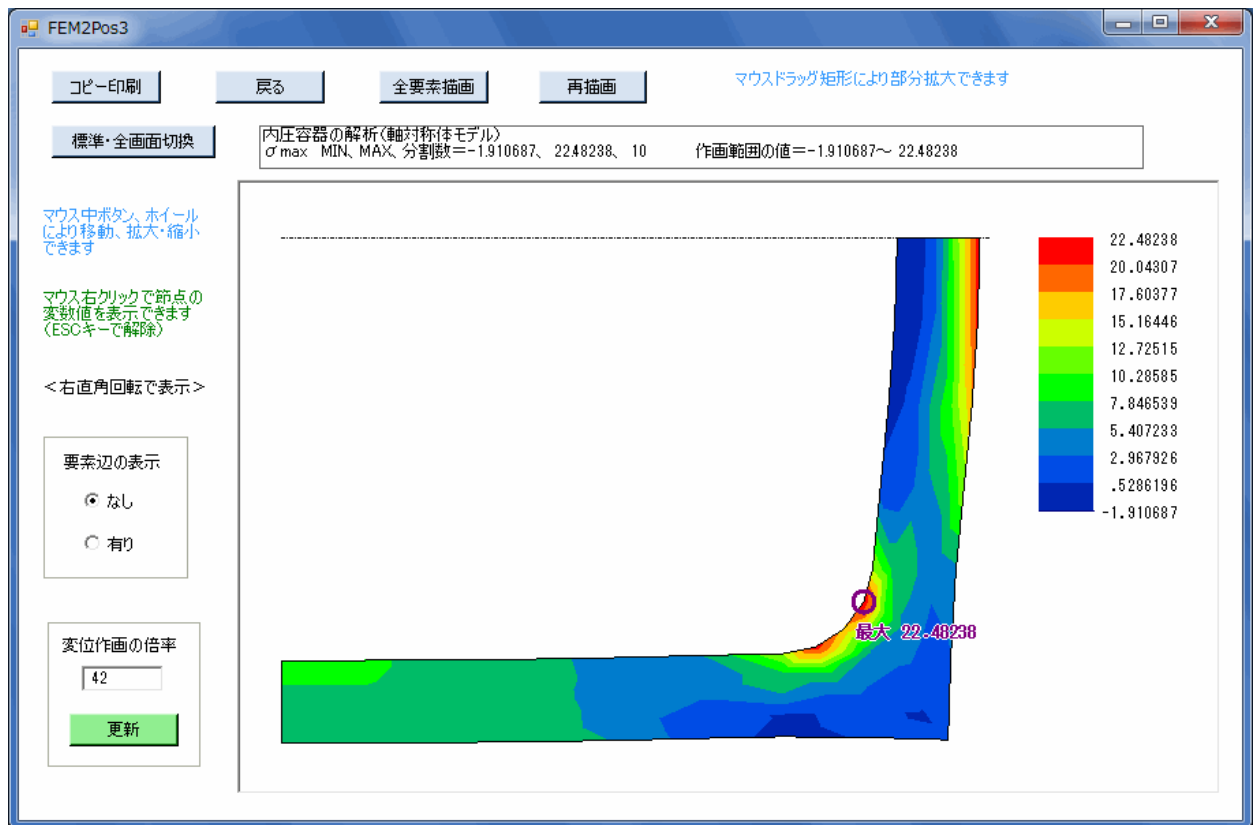


図11-4 内圧容器の  $\sigma_{\max}$  の等高線図

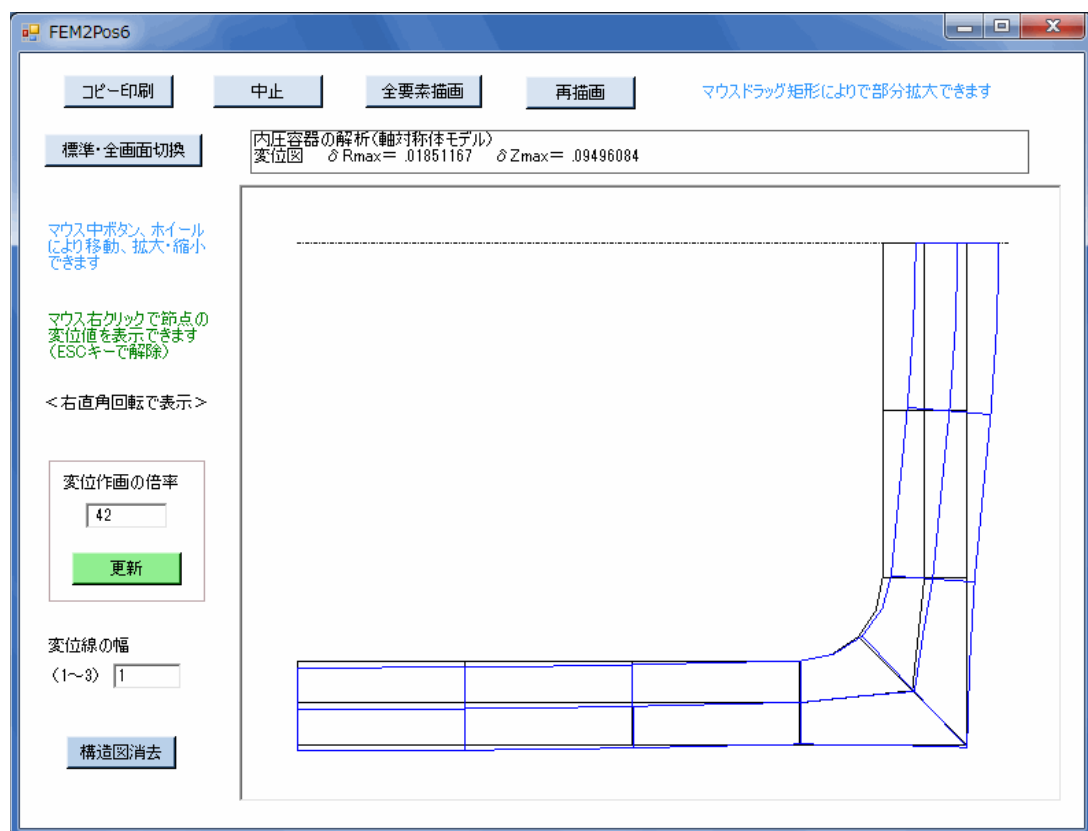


図11-5 内圧容器の変位図



## 第12章 大変形問題の計算例

### 12.1 構造モデル

図12-1にモデル図を示します。同図のように、長柱で上端の半分に荷重（節点荷重）が作用します。

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。

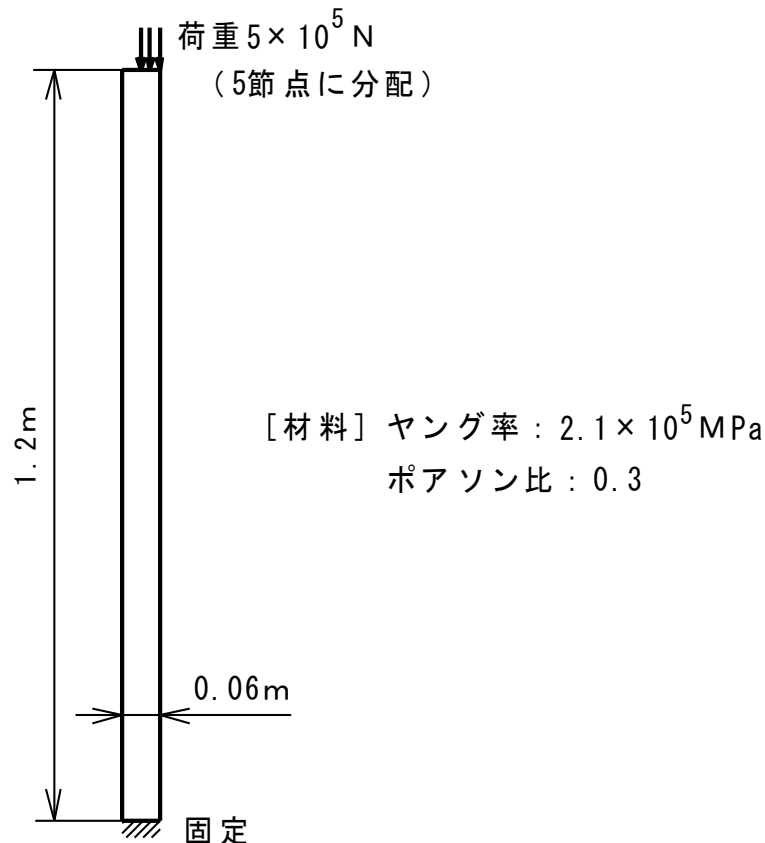


図12-1 長柱の構造モデル図

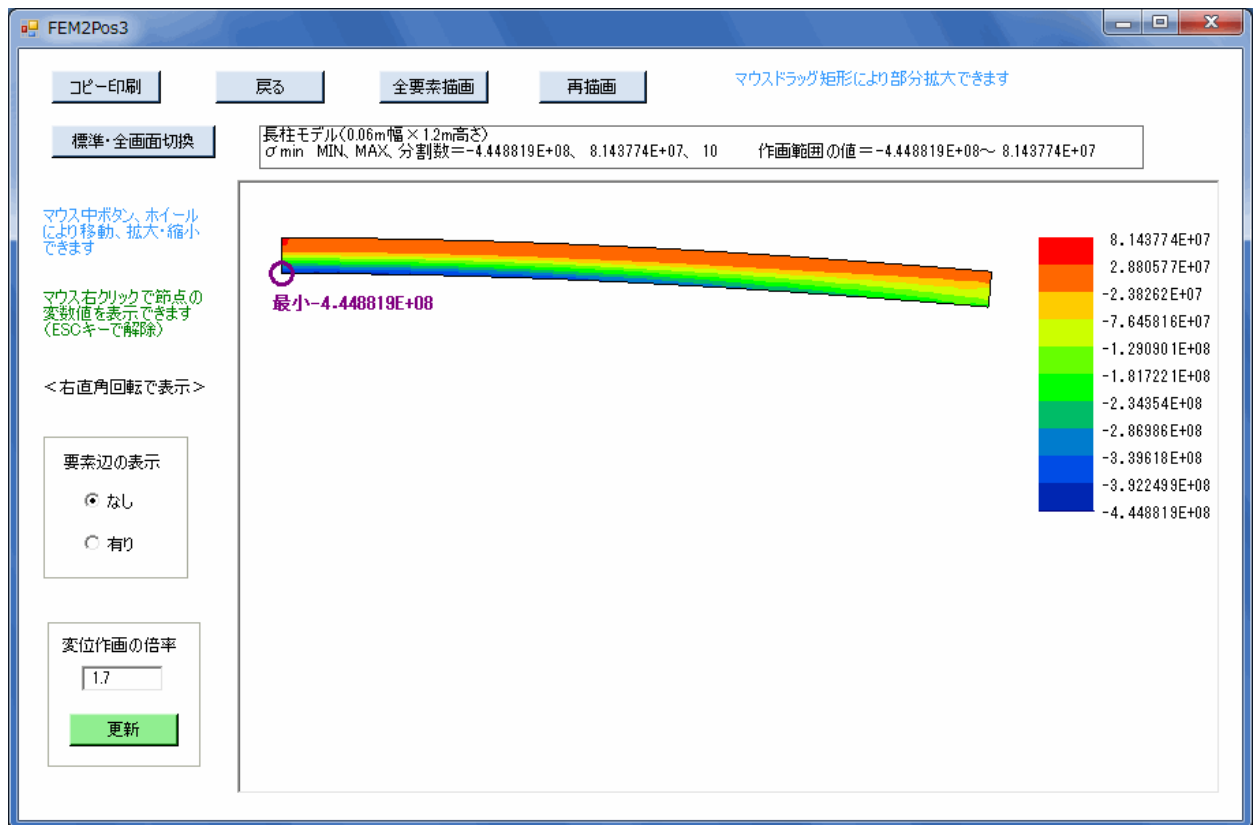
### 12.2 計算結果（大変形方式）

図12-2に $\sigma_{\min}$ （圧縮側最大）の等高線図、および図12-3に変位図を示します。なお、計算時間は0秒台です。

注）本モデルは要素数120、節点数429です。

### 12.3 小変形方式との比較

上記の同一モデルについて、小変形方式の計算結果との比較を図12-4、12-5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。



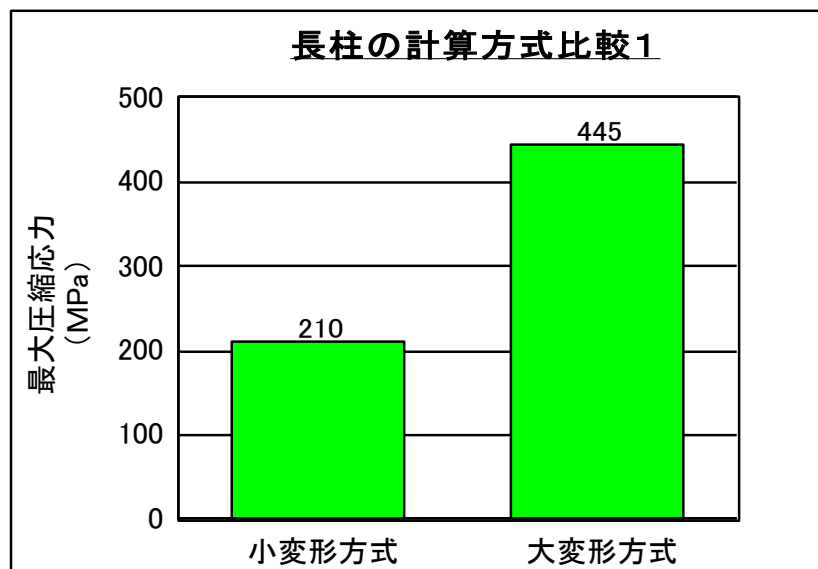


図12-4 長柱の圧縮応力の比較

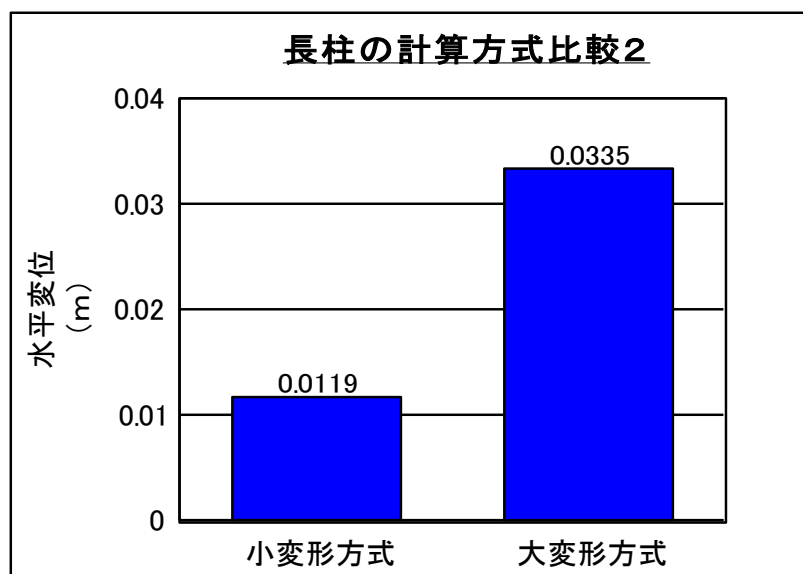


図12-5 長柱の変位の比較

[参考文献]

<A>Visual Basic言語

- A1) 「Visual Basic for Windows プログラミング・パーツ」、河西 朝雄、  
(株) ナツメ社、1994
- A2) 「Visual Basic リファレンス・ブック」、相沢 文雄、  
(株) ナツメ社、1994
- A3) 「Microsoft Visual Basic プログラミング ガイド」、  
マイクロソフト (株)、1997
- A4) 「Visual Basic 応用プログラミング」、林 晴比古、  
ソフトバンク (株)、1997
- 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) 「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
- A7) 「実力アップ Visual Basic.NET 基礎編」、川口 輝久、  
(株) 技術評論社、2003
- 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) 「Visual Basicによる工学計算プログラム」、黒田 英夫、  
CQ出版社、2001

<C>有限要素法・差分法・工学一般

- C1) 「材料力学 (下巻)」、鶴戸口 英善 他、  
裳華房、日本機械学会、1966
- C2) 「マトリックス有限要素法」、O.C.Zienkiewicz 他、吉識 雅夫 監訳、  
(株) 培風館、1970
- C3) 「有限要素プログラミング」、E.Hinton 他、川井 忠彦 監訳、  
丸善 (株)、1981
- C4) 「マイコンによる有限要素解析」、戸川 隼人、  
(株) 培風館、1982
- C5) 「流れと熱伝導の有限要素法入門」、矢川 元基、  
(株) 培風館、1983
- C6) 「有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析」、矢川 元基 他、  
(株) サイエンス社、1987
- C7) 「The Finite Element Method (Linear Static and Dynamic Finite Element  
Analysis)」、Thomas J.R.Hughes、Dover Publications、2000

- C8) 機械工学便覧A5「材料力学」、日本機械学会編、  
日本機械学会、2001
- C9) 「The Finite Element Method in Electromagnetics」、Jianming Jin  
John Wiley & Sons、2002
- C10) 「弾塑性力学の基礎」、吉田 総仁、  
共立出版（株）、2005