
* 「3次元電磁界解析K」の紹介 * [著者] 黒田 英夫

<プログラム開発環境>

OS : Windows 11NET Framework 4.8が必要

言語 : Visual Basic 2022 (Visual Studio 2022 Community)

<プログラムと本書の著作権>

フリーソフトで、著作権を開放します

有限要素法による汎用的な3次元電磁界解析ソフトを提供します。解析種類には、静電界、静磁界（電流なし）、静磁界（電流有り）、準定常電磁界（渦電流）の4つがあります。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、大規模構造に対応できる高速ソルバー*を組み込んでいます。ただし、同ソルバーで非収束の場合のバックアップとして、バンドマトリックス法ソルバーも選択できるようにしています。また、準定常電磁界（渦電流）の大規模構造ではバンドマトリックス法ソルバーでメモリー不足に対応できます。

注) * 対称行列ではICCG(Incomplete Cholesky Conjugate Gradient)法、
非対称行列ではBiCGStab(2) (BiConjugate Gradient Stabilized (2))法。

[備考] 本書の解析事例の計算時間は、下記仕様のパソコンによります。

CPU : 3GHz (64bit、4コア) RAM : 16GB

<目次>	ページ
第1章 有限要素法 -----	2
第2章 プログラムの機能・構成 -----	18
第3章 構造データの作り方 -----	22
第4章 「解析データ」処理プログラム -----	29
第5章 「計算」プログラム -----	62
第6章 「後処理」プログラム -----	74
第7章 静磁界（電流なし）の計算例 -----	87
第8章 静磁界（電流有り）の計算例 -----	94
第9章 準定常電磁界（渦電流）の計算例 -----	101
[補足] 中心穴なし軸回転体の注意事項 -----	110
[参考文献] -----	111

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。

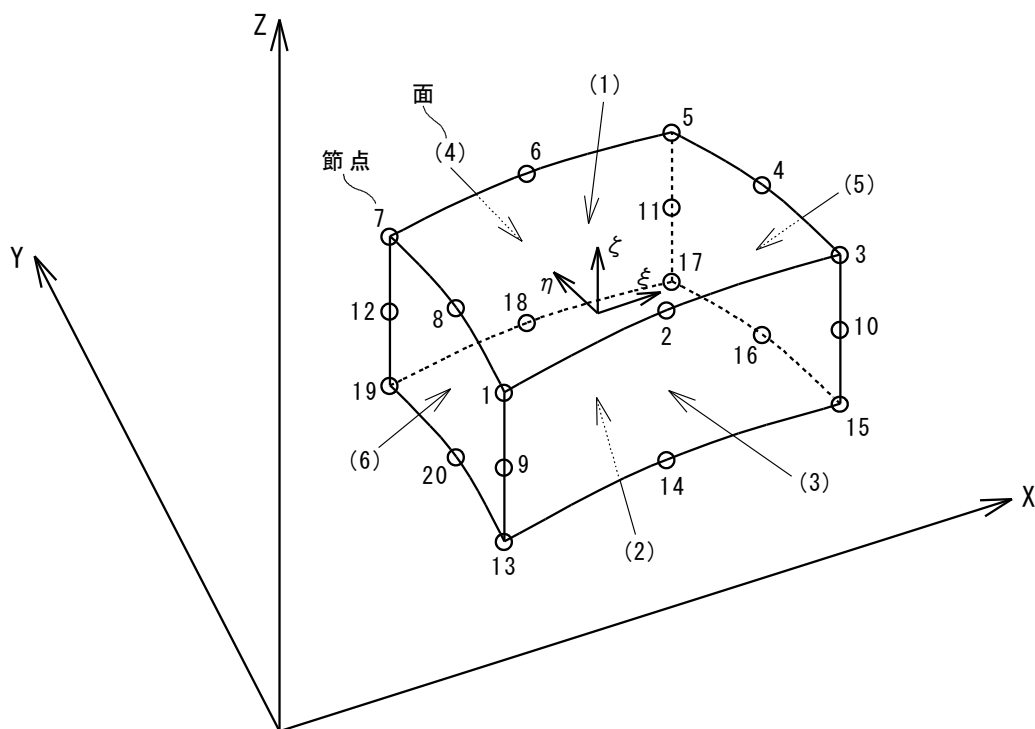


図1-1 六面体2次要素

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 ξ η ζ 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。

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 ξ η ζ 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。^{C4)}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(ξ , η , ζ)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

ξ, η, ζ : 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 (ξ, η, ζ) 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

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

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

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 ξ, η, ζ)	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、流束境界（静電界の電束密度境界等）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ないます。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。⁽⁴⁾ 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 電磁界解析の基本方程式

マクスウェルの電磁方程式は次の4つの方程式から成ります。

$$\text{rot } H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1-10)$$

$$\text{rot } E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1-11)$$

$$\text{div } B = 0 \quad (1-12)$$

$$\text{div } D = \rho \quad (1-13)$$

ただし、H：磁界の強さ、 J：電流密度、 D：電束密度

E：電界の強さ、 B：磁束密度、 t：時間

ρ ：電荷密度

H, J, D, E, Bは各座標軸方向成分を持つベクトル。

$$\text{rot} H = i \left(\frac{\partial H_z}{\partial Y} - \frac{\partial H_y}{\partial Z} \right) + j \left(\frac{\partial H_x}{\partial Z} - \frac{\partial H_z}{\partial X} \right) + k \left(\frac{\partial H_y}{\partial X} - \frac{\partial H_x}{\partial Y} \right) \quad (1-14)$$

ここで、 i, j, k : X, Y, Z 軸方向の単位ベクトル

H の各添え字は各座標軸方向成分を表わす。

rot 演算については他も同様。

$$\text{div} B = \frac{\partial B_x}{\partial X} + \frac{\partial B_y}{\partial Y} + \frac{\partial B_z}{\partial Z} \quad (1-15)$$

div 演算については他も同様。

なお、(1-10) 式の右辺第 2 項 $\frac{\partial D}{\partial t}$ は変位電流を表わし、低周波領域では無視できるので、本書ソフトでは省いています。

次に材料物性との関係を示す構成方程式は以下の 3 つです。

$$D = \varepsilon E \quad (1-16)$$

$$B = \mu H \quad (1-17)$$

$$J = \sigma E \quad (1-18)$$

ただし、 ε : 誘電率

μ : 透磁率

σ : 導電率 (1/抵抗率)

1.4 静電界の有限要素法解析

静電界の解析では、(1-11) 式で右辺を 0 とおいた式と (1-13) 式を用います。それらを以下に示します。

$$\text{rot} E = 0 \quad (1-19)$$

$$\text{div} D = \rho \quad (1-20)$$

ただし、 E : 電界の強さ、 D : 電束密度

ρ : 電荷密度

ここで、スカラーポテンシャル (電位) ϕ を次式で定義します。そして、スカラーポテンシャル (電位) ϕ が求める変数となります。

$$E = -\text{grad} \phi \quad (1-21)$$

$$\text{ここで、grad} \phi = i \frac{\partial \phi}{\partial X} + j \frac{\partial \phi}{\partial Y} + k \frac{\partial \phi}{\partial Z} \quad (1-22)$$

$$\therefore E_x = -\frac{\partial \phi}{\partial X} \quad E_y = -\frac{\partial \phi}{\partial Y} \quad E_z = -\frac{\partial \phi}{\partial Z} \quad (1-23)$$

i, j, k : X, Y, Z 軸方向の単位ベクトル

grad 演算については他も同様。

$\text{rot}(\text{grad} \phi)$ は恒等的に 0 となるので、(1-19) 式は自動的に成立する。

他方、(1-16) 式を (1-20) 式に代入すると、

$$\text{div} D = \text{div}(\varepsilon E) = \rho \quad (1-24)$$

(1-23) 式を(1-24) 式に代入して整理すると、次のポアソン方程式が得られます。

$$\varepsilon \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Z^2} \right) + \rho = 0 \quad (1-25)$$

(1-25) 式を有限要素法で定式化すると、要素の方程式は次式で表わされます。

$$[K_e] \{\phi_e\} = \{F_e\} \quad (1-26)$$

ただし、 $[K_e]$ ：要素の電界マトリックス

$\{\phi_e\}$ ：要素節点のポテンシャル（電位）ベクトル

$\{F_e\}$ ：右辺ベクトル。境界条件で決まる。

$$[K_e] = \int \varepsilon \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial X} \frac{\partial [N]}{\partial X} + \frac{\partial [N]^T}{\partial Y} \frac{\partial [N]}{\partial Y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial Z} \frac{\partial [N]}{\partial Z} \right) dV \quad (1-27)$$

$$\{F_e\} = \int \rho [N]^T dV - \int q [N]^T dA \quad (1-28)$$

ただし、 $[N]$ ：形状関数の行ベクトル

右上付き文字Tは転置を意味する（以下同じ）。

dV ：積分体積、 dA ：境界積分面積

(1-28) 式の右辺第2項は後述の電束密度境界の場合に適用します。

節点電荷の場合は、(1-28) 式によらず直接 $\{F_e\}$ に加算します。

全要素について(1-26) 式を合わせると、全体の方程式は次の形となります。

$$[K] \{\phi\} = \{F\} \quad (1-29)$$

ただし、 $[K]$ ：全体の電界マトリックス

$\{\phi\}$ ：全節点のポテンシャル（電位）ベクトル

$\{F\}$ ：全体の右辺ベクトル

上記の(1-29) 式を解くことにより、節点電位 $\{\phi\}$ が求まります。方程式は、大規模 FEM に対応できるICCG法(Incomplete Cholesky Conjugate Gradient) 法により解きます。ただし、ICCG法で収束しない場合は、バンドマトリックス法のソルバーを利用します。

[境界条件]

①電位 ϕ

②電束密度 q （単位面積当り）・・・流出方向が正

$$q = -\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial n} \quad (1-30)$$

ただし、 n ：境界の法線ベクトル

[電荷条件]

①電荷密度 ρ ・・・要素の物性値とする

②節点電荷P

<節点電荷が受けるクーロン力>

節点電荷Pが電界から受けるクーロン力は次式により計算します。

$$F_{cx} = P \cdot E_x \quad (1-31)$$

$$F_{cy} = P \cdot E_y \quad (1-32)$$

$$F_{cz} = P \cdot E_z \quad (1-33)$$

ただし、 F_{cx} 、 F_{cy} 、 F_{cz} : X, Y, Z方向のクーロン力

<電荷部が受けるクーロン力>

電荷密度 ρ のある材料部が電界から受けるクーロン力は次式により計算します。

$$F_{csx} = \int \rho [N]^T E_x dV \quad (1-34)$$

$$F_{csy} = \int \rho [N]^T E_y dV \quad (1-35)$$

$$F_{csz} = \int \rho [N]^T E_z dV \quad (1-36)$$

ただし、 F_{csx} 、 F_{csy} 、 F_{csz} : X, Y, Z方向のクーロン力

1.5 静磁界（電流なし）の有限要素法解析

電流のない静磁界の解析では、(1-10)式で右辺を0とおいた式と(1-12)式を用います。それらを以下に示します。

$$\text{rot } H = 0 \quad (1-41)$$

$$\text{div } B = 0 \quad (1-42)$$

ここで、磁気スカラーポテンシャル（磁位*） ϕ_m を次式で定義します。そして、磁気スカラーポテンシャル（磁位） ϕ_m が求める変数となります。

注*）電位に対応するものとして磁位と称することにします。

$$H = -\text{grad } \phi_m \quad (1-43)$$

$$\therefore H_x = -\frac{\partial \phi_m}{\partial X} \quad H_y = -\frac{\partial \phi_m}{\partial Y} \quad H_z = -\frac{\partial \phi_m}{\partial Z} \quad (1-44)$$

$\text{rot}(\text{grad } \phi_m)$ は恒等的に0となるので、(1-41)式は自動的に成立する。

他方、(1-17)式を(1-42)式に代入すると、

$$\text{div } B = \text{div}(\mu H) = 0 \quad (1-45)$$

(1-44)式を(1-45)式に代入して整理すると、次のラプラス方程式が得られます。

$$\mu \left(\frac{\partial^2 \phi_m}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi_m}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \phi_m}{\partial Z^2} \right) = 0 \quad (1-46)$$

(1-46)式を有限要素法で定式化すると、要素の方程式は次式で表わされます。

$$[K_e]\{\phi_{me}\} = \{F_e\} \quad (1-47)$$

ただし、 $[K_e]$ ：要素の磁界マトリックス

$\{\phi_{me}\}$ ：要素節点のポテンシャル・ベクトル

$\{F_e\}$ ：右辺ベクトル。境界条件で決まる。

$$[K_e] = \int \mu \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial X} \frac{\partial [N]}{\partial X} + \frac{\partial [N]^T}{\partial Y} \frac{\partial [N]}{\partial Y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial Z} \frac{\partial [N]}{\partial Z} \right) dV \quad (1-48)$$

$$\{F_e\} = - \int q [N]^T dA \quad (1-49)$$

ただし、 $[N]$ ：形状関数の行ベクトル

dV ：積分体積、 dA ：境界積分面積

(1-49) 式の右辺は後述の磁束密度境界の場合に適用します。

以降の定式化は1.4節と同様なので省略します。

[境界条件]

①磁位 ϕ_m

②磁束密度 q (単位面積当り) ・ ・ ・ 流出方向が正

$$q = -\mu \frac{\partial \phi_m}{\partial n} \quad (1-50)$$

ただし、 n ：境界の法線ベクトル

<磁性体が受ける磁気力>

磁性体が磁界から受ける磁気力は次式により計算します。これは本来、強磁性体が磁化することにより発生するものですが、強磁性体でなくても計算可能です。

$$F_m = \int T_n dA \quad (1-51)$$

ただし、 F_m ：磁気力のベクトル

T ：応力テンソルで、要素 T_{ij} は次式で表わされます。

$$T_{ij} = \frac{1}{\mu_0} \left(B_i B_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} B^2 \right) \quad (1-52)$$

ただし、 i, j ： X, Y, Z の組合せ

μ_0 ：環境（真空、空気）の透磁率

B ：磁束密度

δ_{ij} ：クロネッカーのデルタ

n ：境界面の法線ベクトル

dA ：境界面の面積で、積分範囲は磁性体が環境に囲まれた領域

1.6 静磁界（電流有り）の有限要素法解析

「電流有り」とは、負荷電流または永久磁石の磁化設定に対応するものです（両者があっても可）。電流の有る静磁界の解析では、(1-10)式で右辺の時間微分を除いた式と(1-13)式を用います。それらを以下に示します。

$$\text{rot } H = J \quad (1-61)$$

$$\text{div } B = 0 \quad (1-62)$$

ここで、ベクトルポテンシャル A を次式で定義します。

$$\begin{aligned} B &= \text{rot } A \\ &= i \left(\frac{\partial A_z}{\partial Y} - \frac{\partial A_y}{\partial Z} \right) + j \left(\frac{\partial A_x}{\partial Z} - \frac{\partial A_z}{\partial X} \right) + k \left(\frac{\partial A_y}{\partial X} - \frac{\partial A_x}{\partial Y} \right) \end{aligned} \quad (1-63)$$

ただし、 i, j, k : X, Y, Z 軸方向の単位ベクトル

$\text{div}(\text{rot } A)$ は恒等的に 0 になるので、(1-62) 式は自動的に成立します。

(1-61) 式について、(1-17) 式により H を B で表わし、(1-63) 式を代入すると、次のように変形されます。

$$\begin{aligned} \text{rot } H &= \text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot } A \right) \\ &= \frac{1}{\mu} \text{grad}(\text{div } A) - \frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J \end{aligned} \quad (1-64)$$

ここで、クーロンゲージ $\text{div } A = 0$ を用いると

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A + J = 0 \quad (1-65)$$

すなわち、

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial Z^2} \right) + J_x = 0 \quad (1-66)$$

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A_y}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial Z^2} \right) + J_y = 0 \quad (1-67)$$

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial Z^2} \right) + J_z = 0 \quad (1-68)$$

(1-66) 式～(1-68) 式を有限要素法で定式化すると、要素の方程式は次式で表わされます。

$$[K_e] \{A_e\} = \{F_e\} \quad (1-69)$$

$$\text{ここで、} [K_e] = \begin{bmatrix} [K_1] & 0 & 0 \\ 0 & [K_1] & 0 \\ 0 & 0 & [K_1] \end{bmatrix} \quad (1-70)$$

$$\{A_e\} = \begin{Bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{Bmatrix} \quad (1-71)$$

$$\{F_e\} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} \quad (1-72)$$

$$[K_1] = \int \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial X} \frac{\partial [N]}{\partial X} + \frac{\partial [N]^T}{\partial Y} \frac{\partial [N]}{\partial Y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial Z} \frac{\partial [N]}{\partial Z} \right) dV \quad (1-73)$$

$$F_x = \int J_x [N]^T dV \quad (1-74)$$

$$F_y = \int J_y [N]^T dV \quad (1-75)$$

$$F_z = \int J_z [N]^T dV \quad (1-76)$$

ただし、 $[N]$ ：形状関数の行ベクトル

dV ：積分体積

以降の定式化は1.4節と同様なので省略します。

[境界条件]

①固定ポテンシャル A_x, A_y, A_z

②流束 q （単位面積当り）・・・流出方向が正、 $q=0$ のみとする

$$q = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial n} \quad (1-77)$$

ただし、 n ：境界の法線ベクトル

[電流条件]

◇電流密度 J_x, J_y, J_z または要素対面方向（単位面積当り）
要素の物性値とする。

[磁化条件（永久磁石に対応）]

磁化 M_x, M_y, M_z または要素対面方向（単位体積当り）・・・要素の物性値とする

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (1-78)$$

ただし、 μ_0 ：真空の透磁率

$$\therefore H = \frac{1}{\mu_0} B - M \quad (1-79)$$

磁化条件を電流に置き換えて計算します。(1-78) 式を(1-61) 式に代入すると、

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu_0} B - M \right) = J \quad (1-80)$$

(1-63) 式を(1-80) 式の左辺に代入して整理すると次式が得られます。

$$\text{rot} \frac{1}{\mu_0} \text{rot} A = J + \text{rot} M = J + J_M \quad (1-81)$$

ただし、 J_M ：等価磁化電流密度

$$J_M = \text{rot} M \quad (1-82)$$

すなわち、

$$-\frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial Z^2} \right) = J_x + J_{Mx} \quad (1-83)$$

$$-\frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial^2 A_y}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial Z^2} \right) = J_y + J_{My} \quad (1-84)$$

$$-\frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial Z^2} \right) = J_z + J_{Mz} \quad (1-85)$$

$$J_{Mx} = \left(\frac{\partial M_z}{\partial Y} - \frac{\partial M_y}{\partial Z} \right) \quad (1-86)$$

$$J_{My} = \left(\frac{\partial M_x}{\partial Z} - \frac{\partial M_z}{\partial X} \right) \quad (1-87)$$

$$J_{Mz} = \left(\frac{\partial M_y}{\partial X} - \frac{\partial M_x}{\partial Y} \right) \quad (1-88)$$

(1-86) 式～(1-88) 式を有限要素法で積分すると、

$$\begin{aligned} \int [N]^T J_{Mx} dV &= \int [N]^T \left(\frac{\partial M_z}{\partial Y} - \frac{\partial M_y}{\partial Z} \right) dV \\ &= - \int \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial Y} M_z - \frac{\partial [N]^T}{\partial Z} M_y \right) dV \end{aligned} \quad (1-89)$$

$$\int [N]^T J_{My} dV = - \int \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial Z} M_x - \frac{\partial [N]^T}{\partial X} M_z \right) dV \quad (1-90)$$

$$\int [N]^T J_{Mz} dV = - \int \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial X} M_y - \frac{\partial [N]^T}{\partial Y} M_x \right) dV \quad (1-91)$$

ただし、部分積分公式を適用し、磁化の向きは領域境界では垂直という条件を適用しています。

<電流部が受けるローレンツ力>

電流部が磁界から受けるローレンツ力は次式により計算します。

$$F = \int J \times B dV \quad (1-92)$$

ただし、 F ：ローレンツ力のベクトル

J ：電流密度のベクトル

B ：磁束密度のベクトル

<磁性体受ける磁気力>

「静磁界（電流なし）」と全く同じです。

1.7 準定常電磁界（渦電流）の有限要素法解析

準定常電磁界とは、変位電流を無視できる場合を意味します。そして、時間依存性は正弦波とし、渦電流問題を扱います。

準定常電磁界の解析では、(1-10)式で右辺の時間微分を除いた式、(1-11)式、(1-12)式を用います。それらを以下に示します。

$$\text{rot } H = J \quad (1-101)$$

$$\text{rot } E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1-102)$$

$$\text{div } B = 0 \quad (1-103)$$

また、(1-17)式によりHをBで表わして(1-81)式に代入すると、

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} B \right) = J \quad (1-104)$$

ここで、(1-102)式と(1-103)式を満たすように、次式により電気スカラーポテンシャル ϕ と磁気ベクトルポテンシャルAを導入します。

$$E = -\text{grad } \phi - \frac{\partial A}{\partial t} \quad (1-105)$$

$$B = \text{rot } A \quad (1-106)$$

(1-18)式と(1-105)式を用いると、

$$\begin{aligned} J &= J_0 + \sigma E \\ &= J_0 + \sigma \left(-\text{grad } \phi - \frac{\partial A}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (1-107)$$

ただし、 J_0 ：負荷電流密度

σ ：導電率（1/抵抗率）

右辺の2つの項は次の区分けにより、どちらか1項を使用する。

〔負荷電流部〕第1項のみ。導電率 σ を0とする。

〔渦電流部〕第2項のみ。負荷電流は0とする。

注) (1-107)式は(1-18)式に J_0 が加わっていますが、これは(1-18)式と負荷電流密度 J_0 を1つの式で表わす便法です。

(1-106)式、(1-107)式を(1-104)式に代入すると、

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot } A \right) = J_0 + \sigma \left(-\text{grad } \phi - \frac{\partial A}{\partial t} \right) \quad (1-108)$$

(1-107)式の右辺第2項（渦電流）のdivを0とおいて、

$$\text{div} \left\{ \sigma \left(\text{grad } \phi + \frac{\partial A}{\partial t} \right) \right\} = 0 \quad (1-109)$$

(1-108)式にクーロンゲージ $\text{div } A = 0$ を適用すると、次のように変形されます。

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = -J_0 + \sigma \left(\text{grad } \phi + \frac{\partial A}{\partial t} \right) \quad (1-110)$$

$$\therefore \frac{1}{\mu} \nabla^2 A - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \text{grad} \phi + J_0 = 0 \quad (1-111)$$

ここで、正弦波の角速度を ω とし、各変数に時間項 $e^{j\omega t}$ がかかるとすると(1-111)式は次のようになります。

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A - j \omega \sigma A - \sigma \text{grad} \phi + J_0 = 0 \quad (1-112)$$

同様にして、(1-109)式は次のようになります。

$$j \omega \sigma \text{div} A + \sigma \text{div}(\text{grad} \phi) = 0 \quad (1-113)$$

ここで、各変数を次のように表わします。

$$A = (A_a + j A_b) e^{j\omega t} \quad (1-114)$$

$$\phi = (\phi_a + j \phi_b) e^{j\omega t} \quad (1-115)$$

$$J_0 = J_a e^{j\omega t} \quad (1-116)$$

注) J_0 だけ非時間項を実数にするのは、 J_0 を基準に取るためです。

(1-114)式～(1-116)式を(1-112)式に代入すると、

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 (A_a + j A_b) - j \omega \sigma (A_a + j A_b) - \sigma \text{grad}(\phi_a + j \phi_b) + J_a = 0 \quad (1-117)$$

$$\therefore \frac{1}{\mu} \nabla^2 A_a + \omega \sigma A_b - \sigma \text{grad} \phi_a + J_a + j \left(\frac{1}{\mu} \nabla^2 A_b - \omega \sigma A_a - \sigma \text{grad} \phi_b \right) = 0 \quad (1-118)$$

従って、上式で実数部と虚数部をそれぞれ0とおくと、

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A_a + \omega \sigma A_b - \sigma \text{grad} \phi_a + J_a = 0 \quad (1-119)$$

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A_b - \omega \sigma A_a - \sigma \text{grad} \phi_b = 0 \quad (1-120)$$

同様に、(1-114)式～(1-116)式を(1-113)式に代入すると、

$$j \omega \sigma \text{div} (A_a + j A_b) + \sigma \text{div} \{ \text{grad}(\phi_a + j \phi_b) \} = 0 \quad (1-122)$$

$$\therefore -\omega \sigma \text{div} A_b + \sigma \text{div}(\text{grad} \phi_a) + j \{ \omega \sigma \text{div} A_a + \sigma \text{div}(\text{grad} \phi_b) \} = 0 \quad (1-122)$$

上式で実数部と虚数部をそれぞれ0とおくと、

$$-\omega \sigma \text{div} A_b + \sigma \text{div}(\text{grad} \phi_a) = 0 \quad (1-123)$$

$$\omega \sigma \text{div} A_a + \sigma \text{div}(\text{grad} \phi_b) = 0 \quad (1-124)$$

(1-123)式、(1-124)式は、各式の第2項を変形して、次のように表わされます。

$$-\omega \sigma \text{div} A_b + \sigma \nabla^2 \phi_a = 0 \quad (1-125)$$

$$\omega \sigma \text{div} A_a + \sigma \nabla^2 \phi_b = 0 \quad (1-126)$$

従って、(1-119)式、(1-120)式、(1-125)式、(1-126)式を連立させて、 A_a 、 A_b 、 ϕ_a 、 ϕ_b について解きます。ただし、 A_a 、 A_b はベクトルポテンシャルのためX,Y,Z方向成分を有します。すなわち、1節点につき8変数となります。

(1-119)式、(1-120)式、(1-125)式、(1-126)式をFEM方程式で表わすと次のようになります。

$$[K_e] \{A_e\} = \{F_e\} \quad (1-127)$$

$$\text{ここで、} [K_e] = \begin{bmatrix} [K_1] & -[K_2] & 0 & 0 & 0 & 0 & [L_x] & 0 \\ [K_2] & [K_1] & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & [L_x] \\ 0 & 0 & [K_1] & -[K_2] & 0 & 0 & [L_y] & 0 \\ 0 & 0 & [K_2] & [K_1] & 0 & 0 & 0 & [L_y] \\ 0 & 0 & 0 & 0 & [K_1] & -[K_2] & [L_z] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & [K_2] & [K_1] & 0 & [L_z] \\ 0 & [K_x] & 0 & [K_y] & 0 & [K_z] & [L_1] & 0 \\ -[K_x] & 0 & -[K_y] & 0 & -[K_z] & 0 & 0 & [L_1] \end{bmatrix} \quad (1-128)$$

$$\{A_e\} = \begin{pmatrix} A_{ax} \\ A_{bx} \\ A_{ay} \\ A_{by} \\ A_{az} \\ A_{bz} \\ \phi_a \\ \phi_b \end{pmatrix} \quad (1-129)$$

$$\{F_e\} = \begin{pmatrix} F_x \\ 0 \\ F_y \\ 0 \\ F_z \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1-130)$$

$$[K_1] = \int \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial X} \frac{\partial [N]}{\partial X} + \frac{\partial [N]^T}{\partial Y} \frac{\partial [N]}{\partial Y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial Z} \frac{\partial [N]}{\partial Z} \right) dV \quad (1-131)$$

$$[K_2] = \int \omega \sigma [N]^T [N] dV \quad (1-132)$$

$$[K_x] = \int \omega \sigma [N]^T \frac{\partial [N]}{\partial X} dV \quad (1-133)$$

$$[K_y] = \int \omega \sigma [N]^T \frac{\partial [N]}{\partial Y} dV \quad (1-134)$$

$$[K_z] = \int \omega \sigma [N]^T \frac{\partial [N]}{\partial Z} dV \quad (1-135)$$

$$[L_x] = \int \sigma [N]^T \frac{\partial [N]}{\partial X} dV \quad (1-136)$$

$$[L_y] = \int \sigma [N]^T \frac{\partial [N]}{\partial Y} dV \quad (1-137)$$

$$[L_z] = \int \sigma [N]^T \frac{\partial [N]}{\partial Z} dV \quad (1-138)$$

$$[L_i] = \int \sigma \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial X} \frac{\partial [N]}{\partial X} + \frac{\partial [N]^T}{\partial Y} \frac{\partial [N]}{\partial Y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial Z} \frac{\partial [N]}{\partial Z} \right) dV \quad (1-139)$$

$$F_x = \int J_{ax} [N]^T dV \quad (1-140)$$

$$F_y = \int J_{ay} [N]^T dV \quad (1-141)$$

$$F_z = \int J_{az} [N]^T dV \quad (1-142)$$

ただし、 $[N]$ ：形状関数の行ベクトル

dV ：積分体積

(1-140)式～(1-142)式では、境界において次式が成立するものとして、境界積分項は省略してあります。

$$q = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial n} = 0 \quad (1-143)$$

(1-128)式のように要素マトリックスが非対称となり、全体マトリックスも非対称のフルバンドマトリックスになります。方程式は、大規模FEMに対応できるBiCGStab(2)

(BiConjugate Gradient Stabilized (2))法により解きます。ただし、BiCGStab(2)法で収束しない場合は、バンドマトリックス法のソルバーを利用します。

[渦電流の計算方法]

渦電流密度 J_E は次式で表わされます。

$$\begin{aligned} J_E &= \sigma E \\ &= \sigma \left(-\text{grad} \phi - \frac{\partial A}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (1-144)$$

$$\begin{aligned} \therefore J_E &= -\sigma \text{grad} \phi - j \omega \sigma A \\ &= -\sigma \text{grad}(\phi_a + j \phi_b) - j \omega \sigma (A_a + j A_b) \\ &= -\sigma \text{grad} \phi_a + \omega \sigma A_b - j (\sigma \text{grad} \phi_b + \omega \sigma A_a) \end{aligned} \quad (1-145)$$

$$\therefore J_E = J_{Ea} + j J_{Eb} \quad (1-146)$$

$$\text{ここで、} J_{Ea} = -\sigma \text{grad} \phi_a + \omega \sigma A_b \quad (1-147)$$

$$J_{Eb} = -\sigma \text{grad} \phi_b - \omega \sigma A_a \quad (1-148)$$

また、渦電力 W_E は、(1-126)式を利用して、次のように算出します。まず、微小体積の渦電力 ΔW_E は、

$$\Delta W_E = \rho \frac{\Delta X}{\Delta Y \Delta Z} (J_E \Delta Y \Delta Z)^2$$

$$\begin{aligned}
&= \rho J_E^2 \Delta X \Delta Y \Delta Z = \rho J_E^2 \Delta V \\
&= \frac{1}{\sigma} J_E^2 \Delta V \quad (1-149)
\end{aligned}$$

ただし、 ρ :抵抗率 ($=1/\sigma$)。抵抗値は、 $\rho \times$ 長さ/断面積で求まる。

$$W_E = \int \frac{1}{\sigma} J_E^2 dV \quad (1-150)$$

そして、同一材料の要素について(1-150)式を合計することにより、材料別の渦電力を算出できます。(1-150)式より、

$$\begin{aligned}
|W_E| &= \int \frac{1}{\sigma} |J_E|^2 dV \\
&= \int \frac{1}{\sigma} (J_{Ea}^2 + J_{Eb}^2) dV \quad (1-151)
\end{aligned}$$

[インピーダンスの計算方法]

負荷電流を与える材料について計算します。ただし、プログラム内で自動計算させるため、負荷電流方向の設定区分は要素対面指定のみとします。

誘起電圧はストークスの定理を利用して、次式のように表わされます。

$$\begin{aligned}
V_I &= - \int \frac{\partial B}{\partial t} dA_s = - \int \frac{\partial \text{rot } A}{\partial t} dA_s = - \int \frac{\partial A}{\partial t} dL \\
&= -j \omega \int A dL = -j \omega \int A L_e dA_c / A_T \quad (1-152)
\end{aligned}$$

ただし、 dA_s : 電流回路に鎖交する積分面積
 dL : 電流方向の微小長さ
 L_e : 電流方向の要素長さ
 dA_c : 電流方向の要素断面積
 A_T : 該当材料の電流方向断面積

また、負荷電流は次式で表わされます。

$$I_I = \int J_0 dA_c \quad (1-153)$$

従って、インピーダンスは次式で計算できます。

$$Z_I = \frac{V_I}{I_I} = \frac{-j \omega \frac{1}{A_T} \int A L_e dA_c}{\int J_0 dA_c} \quad (1-154)$$

(1-154)式において、(1-114)式によるAの非時間項を用いると、分子の $-j A$ は次のように変形されます。

$$\begin{aligned}
-j A &= -j (A_a + j A_b) \\
&= A_b - j A_a \quad (1-155)
\end{aligned}$$

なお、(1-154)式の計算結果は複素数の絶対値を出力します。

第2章 プログラムの機能・構成

[VBプロジェクト名] E l e M a g 3 D

表2-1に本ソフトの解析機能を示します。同表のように、1) 静電界～4) 準定常電磁界までの4種類の解析種類が可能です。2) の静磁界（電流なし）の解析を設けてあるのは、永久磁石のように電流のない磁界の場合に磁界の条件入力を容易にするためです。また、3) の静磁界（電流有り）の解析では、永久磁石の磁化設定にも対応しています。

表2-1 「E l e M a g 3 D」 解析機能

解析種類	内容	出力項目
1) 静電界	静的な電界を解析するもの	①電位 ②電束密度 ③節点電荷が受けるクーロン力 ④電荷部が受けるクーロン力
2) 静磁界 （電流なし）	電流がない場合で、静的な磁界を解析するもの	①磁位 ②磁束密度 ③磁性体が受ける磁気力（物性区分数1以上）
3) 静磁界 （電流有り）	電流がある場合で、静的な磁界を解析するもの。永久磁石の磁化設定にも対応。	①磁気ベクトルポテンシャル ②磁束密度 ③電流部が受けるローレンツ力 ③磁性体が受ける磁気力（物性区分数1以上）
4) 準定常電磁界 （渦電流）	変位電流がなく、正弦波電流が作用する場合で、準定常の電磁界を解析するもの（いわゆる渦電流問題を解析）	①電位、磁気ベクトルポテンシャル ②磁束密度 ③渦電流密度

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。

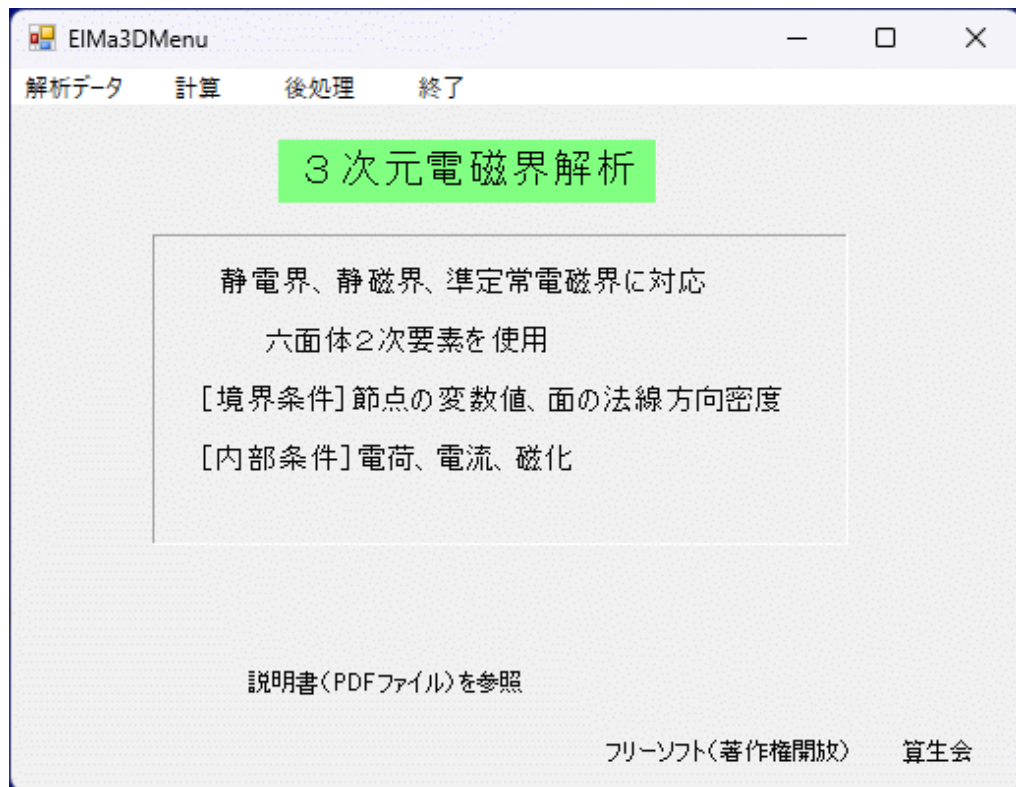


図2-1 「E I e M a g 3 D」ソフトのメニュー画面

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EIMa3DMenu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。

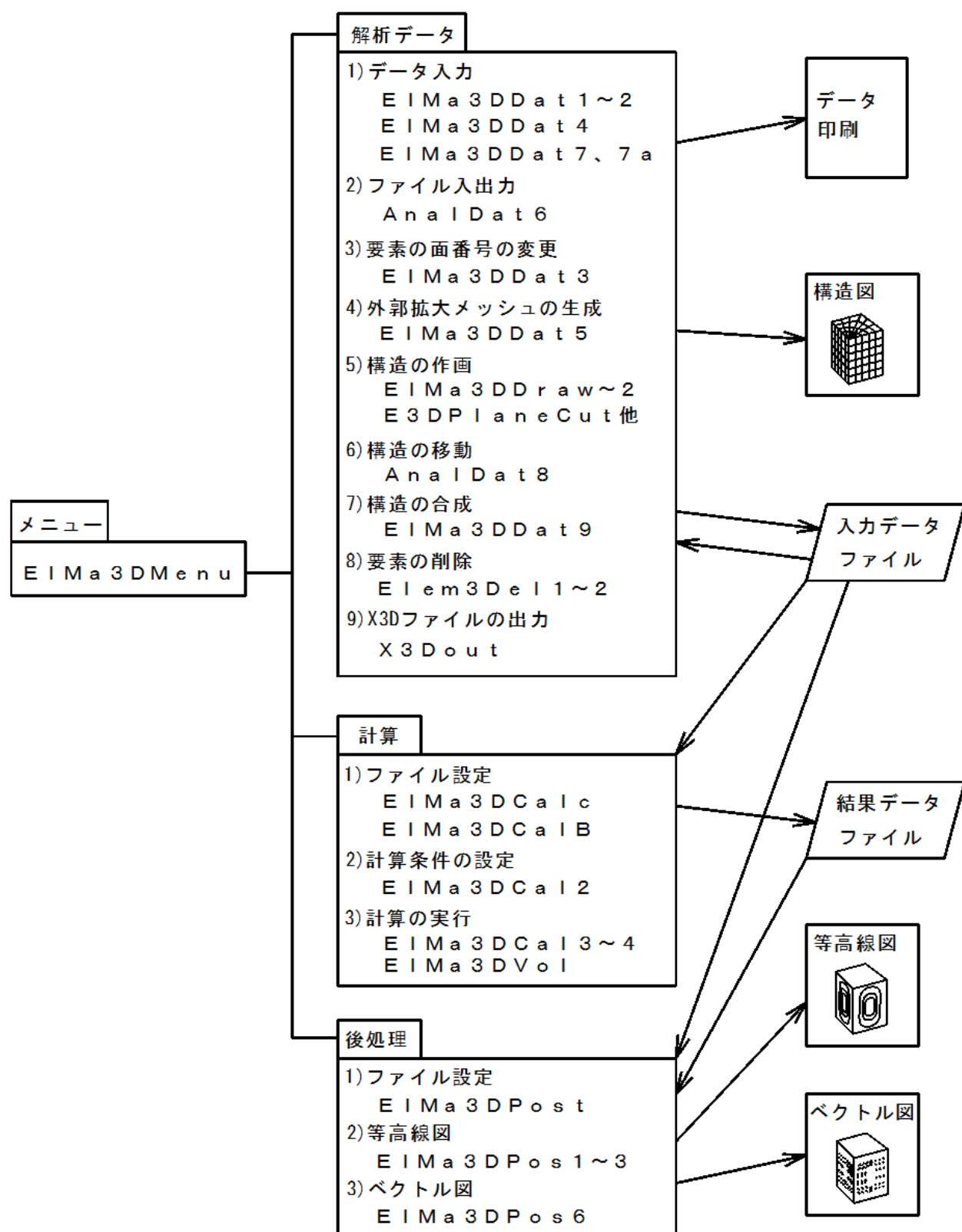


図2-2 「EImag3D」ソフトのプログラム構成

表2-2に本ソフトのファイルリストを示しま。同表で、〔解析データ〕のEIma3DDat1、2、4、7、7aは、各種データを画面入力するためのものです。特に、EIma3DDat2、4では1つのフォームモジュールで、複数種類のデータをグリッド切替えにより入力できるようにしています。

表2-2 「E l e M a g 3 D」ソフトのファイルリスト

[全般]

ファイル名	内容
E l M a 3 D C o m . v b	共通変数の宣言とサブルーチンの定義
E l M a 3 D M e n u . v b	メニューの提示・選択

[解析データ]

ファイル名	内容
E l M a 3 D D a t 1 . v b	データ仕様の入力
E l M a 3 D D a t 2 . v b	各データの入力
E l M a 3 D D a t 3 . v b	要素の面番号の変更
E l M a 3 D D a t 4 . v b	材料データの入力
E l M a 3 D D a t 5 . v b	外郭拡大メッシュの生成
E l M a 3 D D a t 7 . v b	境界一括設定の変数値の入力
E l M a 3 D D a t 7 a . v b	境界面の一括設定
A n a l D a t 6 . v b	データファイルの入出力
A n a l D a t 8 . v b	構造の移動
E l M a 3 D D a t 9 . v b	構造の合成
E l M a 3 D D r a w . v b	構造の作画
E l M a 3 D D r a w 1 . v b	構造図でデータ入力項目の選択
E l M a 3 D D r a w 2 . v b	構造図でデータの入力
E 3 D P l a n e C u t . v b	3次元構造の面切断の設定（各3次元図に共通）
M o u s e S h i f t . v b	マウス回転操作の説明（各3次元図に共通）
E l e m 3 D e l 1 . v b	要素の削除数の入力と削除の実行
E l e m 3 D e l 2 . v b	要素削除の要素指定
X 3 D o u t . v b	X3Dファイルの出力

[計算]

ファイル名	内容
E l M a 3 D C a l c . v b	計算に使用するファイルの設定
E l M a 3 D C a l 2 . v b	計算条件の設定
E l M a 3 D C a l 3 . v b	解析計算の実行（反復法）
E l M a 3 D C a l 4 . v b	解析計算の実行（バンドマトリックス法）
E l M a 3 D C a l B . v b	解析計算のバッチ処理
E l M a 3 D V o l . v b	体積計算のファイル設定と実行

[後処理]

E l M a 3 D P o s t . v b	後処理に使用するファイルの設定
E l M a 3 D P o s 1 . v b	等高線図作画の変数の指定
E l M a 3 D P o s 2 . v b	等高線図の仕様設定
E l M a 3 D P o s 3 . v b	等高線図の作画実行
E l M a 3 D P o s 6 . v b	ベクトル図の作画実行

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、自動メッシュだけでは不十分の場合に、人手でデータ修正する必要があります。構造データについてよく理解しておかねばなりません。

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 ξ η 面における積分点位置を図3-1に示します。 ξ と面や η と面でも同様です。面での積分点数は、1軸当り積分点数の2乗の9点です。

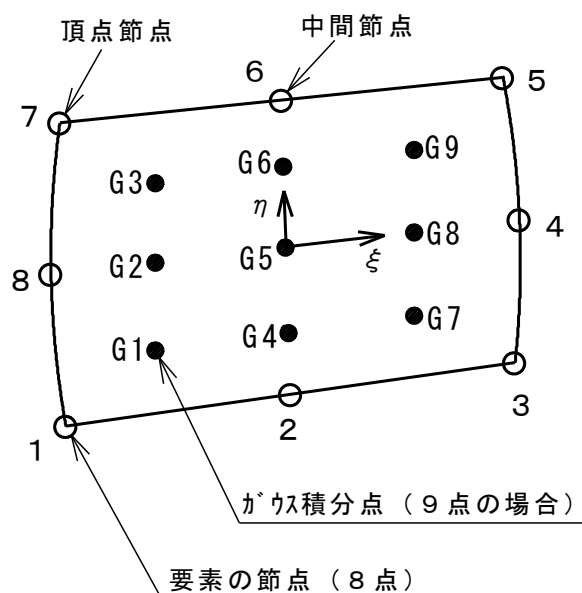


図3-1 要素の1面の積分点位置（ ξ η 座標面）

以降では、図3-2に示す静電界テスト構造を例に取ります。静磁界あるいは準定常電磁界の構造でも、境界条件や負荷条件が異なる以外は同様です。図3-2のモデルは、2つの材料から構成されており、中央の2つの直方体面に電位1Vと2Vが作用し、外周の電位は0Vです。

1) 先ず構造を略図に描きます。

- ①電磁界解析においては、内部問題と外部問題があります。内部問題とは、対象構造が外郭を有する場合で、その内部の解析を行なうものです。他方の外部問題とは、外部が無限に広がっている場合で、本来は外部に境界はありませんが、有限要素法の解析では十分に広がった外側に仮定の境界を設定しなければなりません。
- ②略図は図3-2のような斜視図がわかりやすいです。また、略図には座標軸も明記します。
- ③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。図3-2の場合も、対称形状なので、半分だけの構造モデルを使用します。

◇一対称部分だけを用いる場合、後処理の等高線図等ですぐに対称面を見れるというメリットもあります。ただし、対称の分割面において、対称条件を設定する必要があります。3次元解析では対称分割面の要素の数が多いので、対称条件の設定に手間がかかり、構造全体をモデル化する場合との得失はユーザー自身で判断してください。

◇表3-1に各解析種類での対称条件設定方法を示します。特に、静磁界（電流有り）と準定常電磁界（渦電流）はわかりにくいので注意してください。

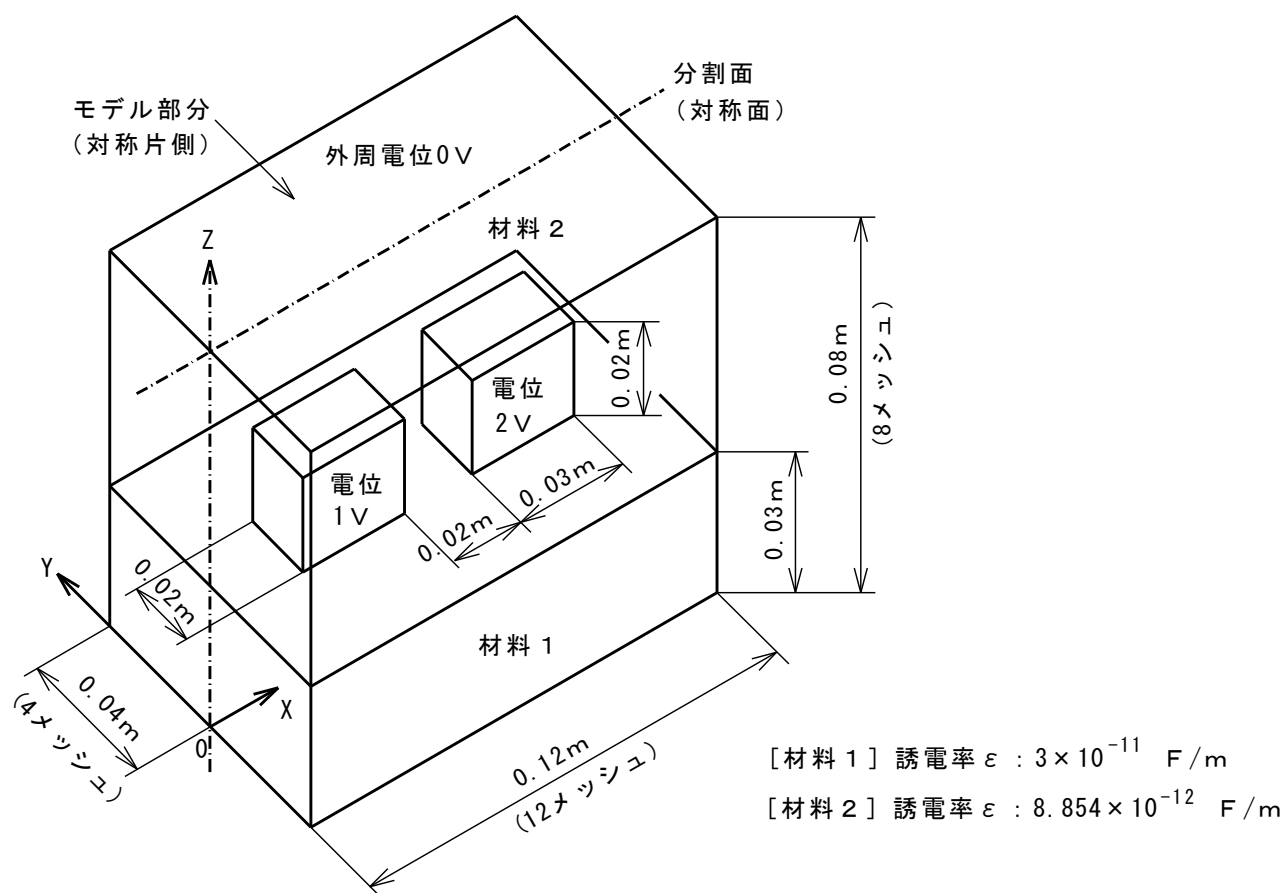


図3-2 静電界テスト構造

表3-1 対称条件の設定方法

解析種類	対称条件の設定方法
1) 静電界	対称面の電位を非固定にする（または、電束密度を0固定*にする）。
2) 静磁界（電流なし）	対称面の磁位を非固定にする（または、磁束密度を0固定*にする）。
3) 静磁界（電流有り）	対称面に直角の磁束密度が0となるように、磁気ベクトルポテンシャルAの関係成分を0固定にする。 例）Y軸に直角の対称面の場合 A_x と A_z を0固定、 A_y を非固定にする。
4) 準定常電磁界（渦電流）	対称面に直角の磁束密度が0となるように、磁気ベクトルポテンシャルAの関係成分を0固定にする。さらに、電位を非固定にする。 例）X軸に直角の対称面の場合 A_y と A_z を0固定、 A_x と電位を非固定にする。

注）＊ 静電界と静磁界（電流なし）の解析では、対称面の流束（電束密度、磁束密度）は何も設定しなければ0となります（解析上の処理なし）。本ソフトで、境界設定区分を自動にした場合、何も条件指定のない境界では変数が0固定になるので、対称面での0固定を避けるために流束を0固定にしても構いません。

2) 自動メッシュの場合は、「FEM立体データ」ソフトにより3次元構造の要素メッシュ生成を行ないます。

- ①構造を六面体形要素に分割します。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。
- ③図3-2のテスト構造の場合、構造中央の電位負荷部が直方体の空洞（要素なし）となるので、図3-3に示すような手順で自動メッシュ生成すると手間が少なくて済みます。図3-3について補足説明します。

◇同図のように、(a) 負荷電位部と (b) 他の部分に分け、「FEM立体データ」ソフトにより断面のメッシュ生成を行ないます。(a) 負荷電位部の穴については、断面メッシュで要素を削除しても、3次元構造モデルを作成した後で要素削除を行なっても、いずれでも構いません。操作上は、あらかじめ断面メッシュで穴を明けておいた方が簡単です。

◇さらに、「FEM立体データ」ソフトにおいて、それぞれの部分の断面メッシュデータで2つの材料番号を各要素に設定します。材料番号は、3次元構造モデルにおいても設定できますが、断面メッシュの段階で設定した方が操作が簡単です。そして、(a) 負荷電位部と (b) 他の部分について柱状体の部分構造を生成します。その後、構造の合成を行なって全体構造モデルを生成します。

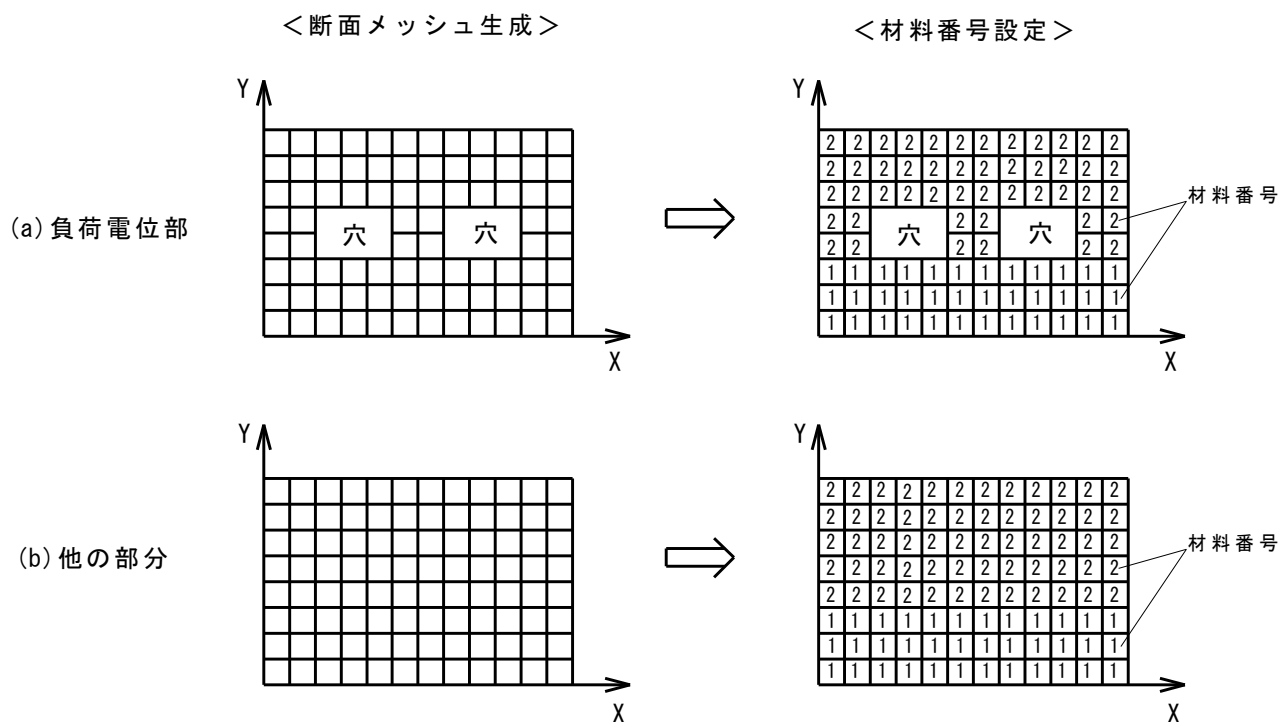


図3-3 テスト構造の断面自動メッシュと材料番号設定

3) 自動メッシュでない場合、各要素の節点を設けます。

各六面体要素について、各頂点および各辺の中点に節点を設けます。すなわち、1要素につき20点の節点を取ります。

注) 構造略図には、節点位置に○印等の記号を付けるとわかりやすいです。

4) 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。

5) 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行列のバンドマトリックス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）方向に付番するのがコツです。

なお、本ソフトで標準のICCG法ソルバーやBiCGStab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、上記の節点番号の付番について特に注意しなくて構いません。

6) 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。

7) 材料物性データを用意します。

表3-2に各解析種類の材料物性項目を示します。また、下部に補足説明します。

表3-2 材料物性項目

解析種類	誘電率 ϵ	透磁率 μ	導電率 σ	電荷密度 ρ	電流密度 J	磁化 M
1) 静電界	◎	—	—	○	—	—
2) 静磁界 (電流なし)	—	◎	—	—	—	—
3) 静磁界 (電流有り)	—	◎	—	—	○	○
4) 準定常電磁界 (渦電流)	—	◎	◎ (負荷電流部 は0に設定)	—	◎	—

注) ◎印：必須、 ○印：使用可、 ×印：なし

電荷密度 ρ ：単位体積当りの値、 電流密度 J ：単位面積当りの値

磁化 M ：単位体積当りの値

①透磁率 μ

透磁率 μ は、(1-17) 式による磁束密度 B と磁界の強さ H との比例係数ですが、静磁界解析では B を区分けして μ を変化できるようにしています。図3-4に透磁率 μ の変化区分の説明図を示します。同図のように各区分では、 μ と B (絶対値) が直線関係とし、各区分端の物性値 (B_i, μ_i) を与えます。なお、 μ が変化せず一定の場合は、区分数を0とし、最左端の値 (B_0, μ_0) のみを与えます。ただし、区分数0の場合、 B_0 は任意の値で差し支えありません。なお、「静磁界 (電流なし)」と「静磁界 (電流有り)」では、区分数1以上の場合に磁気力を出力します。

②電流密度 J

電流密度は次の2通りの設定方法があります。ただし、準定常電磁界ではb) による要素対面の電流密度でなければなりません (1つの負荷電流部は1材料に統一)。

a) X, Y, Z 方向の電流密度 J_x, J_y, J_z

b) 要素の面番号を指定し、面に流入する電流密度 J (1個)

◇電流は対面方向に流れる。

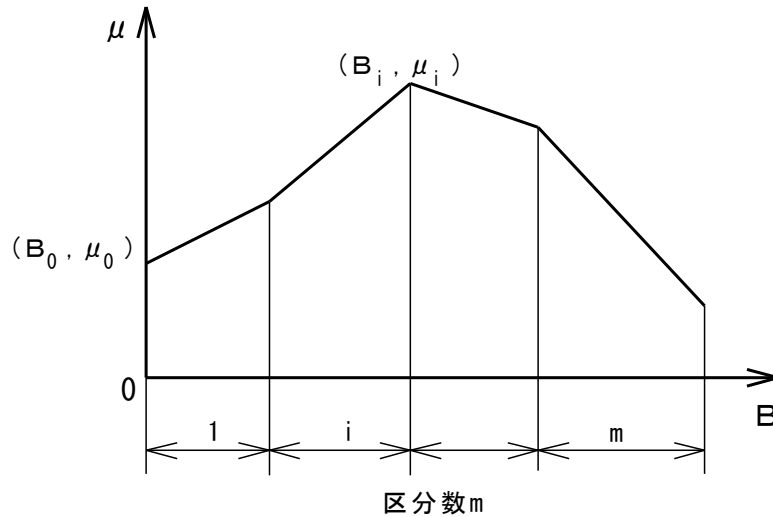


図3-4 透磁率 μ の変化区分（静磁界のみ）

③磁化M

次の2通りの設定方法があります。

- a) X, Y, Z方向の磁化 M_x, M_y, M_z
- b) 要素の面番号を指定し、同面から対面方向の磁化M（1個）

また、(1-78)式で定義されますので、磁化Mの単位は磁界の強さHと同じ単位になります。

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (1-78) \text{再掲}$$

8) 境界条件と負荷条件を決めます。

表3-3に各解析種類の境界条件と節点負荷条件の項目を示します。なお、ほとんどの負荷条件は、材料の密度として与えます（表3-2参照）。また、対称面の境界条件は、表3-1を参照してください。

表3-3 境界条件と節点負荷条件の項目

解析種類	境界節点・面の値	境界面の流束値	節点負荷項目
1) 静電界	電位 ϕ	電束密度 $q \left(= -\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial n} \right)$	電荷
2) 静磁界 (電流なし)	磁位 ϕ_m	磁束密度 $q \left(= -\varepsilon \frac{\partial \phi_m}{\partial n} \right)$	なし
3) 静磁界 (電流有り)	磁気ポテンシャル A_x, A_y, A_z	なし (0のみ)	なし
4) 準定常電磁界 (渦電流)	磁気ポテンシャル A_x, A_y, A_z と 電位 ϕ	なし (0のみ)	なし

注) 4) の準定常電磁界の場合、負荷電流部の電位は自動的に0固定となる。

表3-3について、補足説明します。

①境界条件の節点値は、節点毎でも要素の面毎でも設定できます。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設定する場合は、境界面を選択する方が、データ入力が容易です。

②境界節点値0の自動設定機能

本ソフトでは、境界設定区分で自動か非自動を選択できます。自動を選択すると、外郭や内部穴の境界の節点について、節点・面固定境界や流束固定境界を除き、自動的に節点値が0となります。従って、境界節点値が0の場合は、境界条件として入力しなくても構いません。ただし、流束固定境界の節点で、節点値を0に固定する場合は忘れずに入力指定する必要があります。また、自動的に0固定されてまずい場合は、非固定に指定しておきます。

③境界面の流束

何も指定しなければ流束値が0となるので、流束値0はデータ入力不要です。

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3-4にS I 単位系を示しておきます。

表3-4 S I 単位系

データ項目	単位
長さ	m
電位	V
電界の強さ	V / m
電束密度	C / m ²
磁界の強さ	A / m
磁束密度	T
電荷	C
電荷密度	C / m ³
力	N

データ項目	単位
誘電率	F / m
透磁率	H / m
導電率	1 / Ω m
電流	A
電流密度	A / m ²
抵抗	Ω
磁位	A
磁気ベクトルポテンシャル	T m
磁化	A / m

注) $A = C / s$ 、 $F = C / V$ 、 $H = W b / A$ 、 $T = W b / m^2 = N s / C m$

A (アンペア)、C (クーロン)、F (ファラド)、H (ヘンリー)、Ω (オーム)

T (テスラ)、V (ボルト)、W b (ウェーバー)、N (ニュートン)、s (秒)

10) 要素の追加変更 (人手作業の場合)

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、要素番号と節点番号は欠番なしに増加させます。

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、14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。

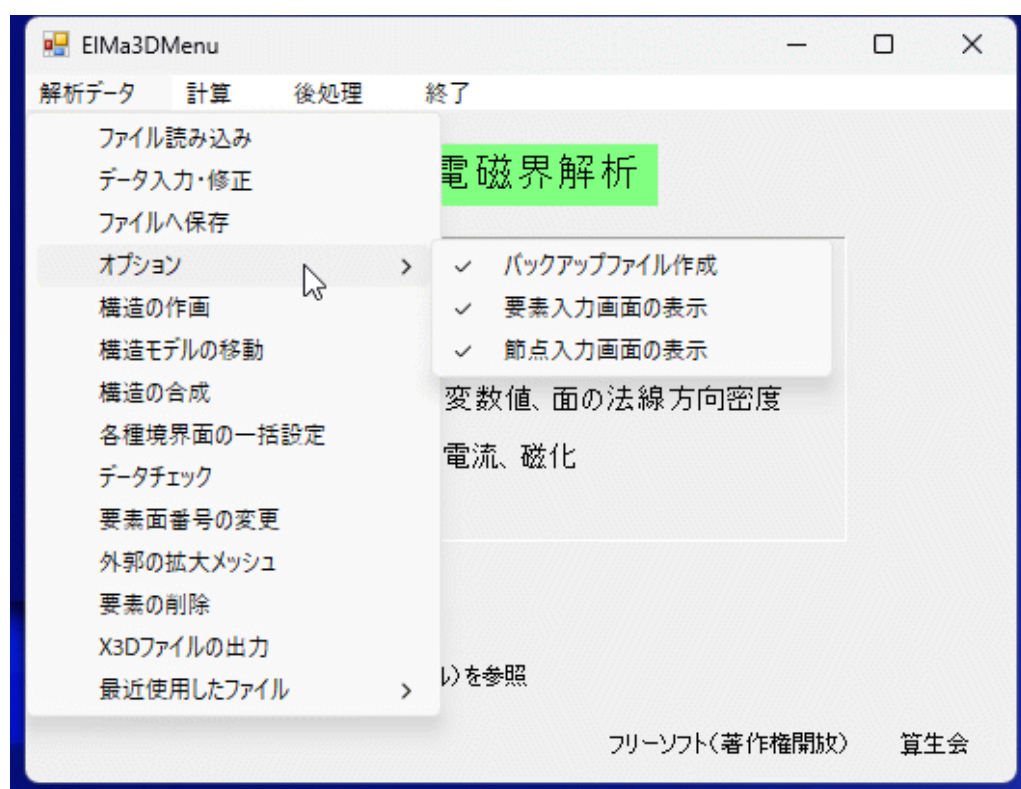


図4-1 「解析データ」サブメニュー画面

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、各解析種類毎のデータ仕様入力画面となります。図4-2～4-5に各解析種類のデータ仕様入力画面を示します。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解析の種類は、静電界、静磁界（電流なし）、静磁界（電流有り）、準定常電磁界（渦電流）のいずれかのボタンを選択して指定します。
 - ◇解析種類を変更した後、次の画面に移った時点で、構造メッシュのデータ以外は、前のデータがクリアされるので注意してください。
- ③境界の設定区分は、自動または非自動を選択します。
 - ◇自動を選択すると、解析計算時に、境界条件（含面）入力のない節点で変数値が0固定となります。従って、境界の変数値の0固定が多い場合に、境界固定の入力を低減できます。
 - ◇非自動を選択すると、境界固定の入力だけの変数固定設定となります。この非自動の選択により、構造の対称境界が多い場合に、境界非固定の入力を低減できます。
 - ◇自動か非自動かは、上記のように対象構造により有利な方を選択します。
- ④節点数～材料データ数、および電位固定・非固定の節点数～電荷負荷の節点数は、各構造モデルに応じた数を入力します。
 - ◇上記の③項のように、境界の設定区分で自動を選択すると、境界条件（含面）指定が全くない境界節点は、計算時に自動的に節点値が0に固定されます。
 - その際、変数値を0固定しない節点は、流束（電束等）固定境界の面に含まれるか、境界固定・非固定の節点または面として非固定指定を行なうかが必要です。
 - ◇境界の固定・非固定は、節点毎でも要素面毎でも設定できます。節点毎に実施する場合は、設定する節点の数を固定・非固定の節点数として入力します。要素の1つの面で全節点を同一設定する場合は、面の8節点を個別に設定しなくても、面全体でまとめて設定でき、その方が後の入力操作が楽です。その際は、設定する面の個数を固定・非固定の面の数として入力します。
 - ◇流束（電束等）固定境界については、流束が0の面は入力不要です。
 - ◇準定常電磁界の場合、負荷電流部の電位は自動的に0固定となります。
- 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4-3の静磁界（電流なし）のデータ仕様入力画面は、図4-2と同様です。

図4-4の静磁界（電流有り）のデータ仕様入力画面では、境界固定・非固定の変数が磁気ベクトルポテンシャルAになります。

図4-5の示す準定常電磁界（渦電流）のデータ仕様入力画面では、境界固定・非固定の変数は同じく磁気ベクトルポテンシャルAです。同画面では正弦波周波数(Hz)も入力し、これは必須です。

EIMa3DDat1

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

電位固定・非固定の節点数

電位固定・非固定の面の数

境界の設定区分が自動の場合は、境界条件
(含面)入力のない節点で0固定となります。

電束固定境界の面の数(数値0は不要)

電荷負荷の節点数

解析の種類

- ☒ 静電界
- ☐ 静磁界(電流なし)
- ☐ 静磁界(電流有り)
- ☐ 準定常電磁界(渦電流)

境界の設定区分

- ☒ 自動
- ☐ 非自動

図4-2 データ仕様入力画面（静電界）

EIMa3DDat1

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

磁位固定・非固定の節点数

磁位固定・非固定の面の数

境界の設定区分が自動の場合は、境界条件
(含面)入力のない節点で0固定となります。

磁束固定境界の面の数(数値0は不要)

解析の種類

- ☐ 静電界
- ☒ 静磁界(電流なし)
- ☐ 静磁界(電流有り)
- ☐ 準定常電磁界(渦電流)

境界の設定区分

- ☒ 自動
- ☐ 非自動

図4-3 データ仕様入力画面（静磁界、電流なし）

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

A固定・非固定の節点数

A固定・非固定の面の数

境界の設定区分が自動の場合は、境界条件
(含面)入力のない節点で0固定となります。

解析の種類

- ☐ 静電界
- ☐ 静磁界(電流なし)
- ☒ 静磁界(電流有り)
- ☐ 準定常電磁界(渦電流)

境界の設定区分

- ☒ 自動
- ☐ 非自動

図4-4 データ仕様入力画面（静磁界、電流有り）

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

変数固定・非固定の節点数

変数固定・非固定の面の数

境界の設定区分が自動の場合は、境界条件
(含面)入力のない節点で0固定となります。

解析の種類

- ☐ 静電界
- ☐ 静磁界(電流なし)
- ☐ 静磁界(電流有り)
- ☒ 準定常電磁界(渦電流)

境界の設定区分

- ☒ 自動
- ☐ 非自動

正弦波周波数(Hz)

図4-5 データ仕様入力画面（準定常電磁界）

4.4 要素データ入力画面（オプションで省略可能）

図4-6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）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連続した要素番号について材料番号を一括変更する場合は、「材料番号一括設定」ボタンをクリックしてまとめて実施できます。

- ④「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。
- ⑤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。



図4-6 要素データ入力画面

4.5 節点データ入力画面（オプションで省略可能）

図4-7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X, Y, Z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。

4.6 材料データ入力画面（静電界、準定常電磁界）

図4-8に材料データ入力画面（静電界）を示します。準定常電磁界の場合は、データ項目が異なるだけです。なお、静磁界の場合は、本画面がなく、次項の材料物性区分数の入力画面となります。

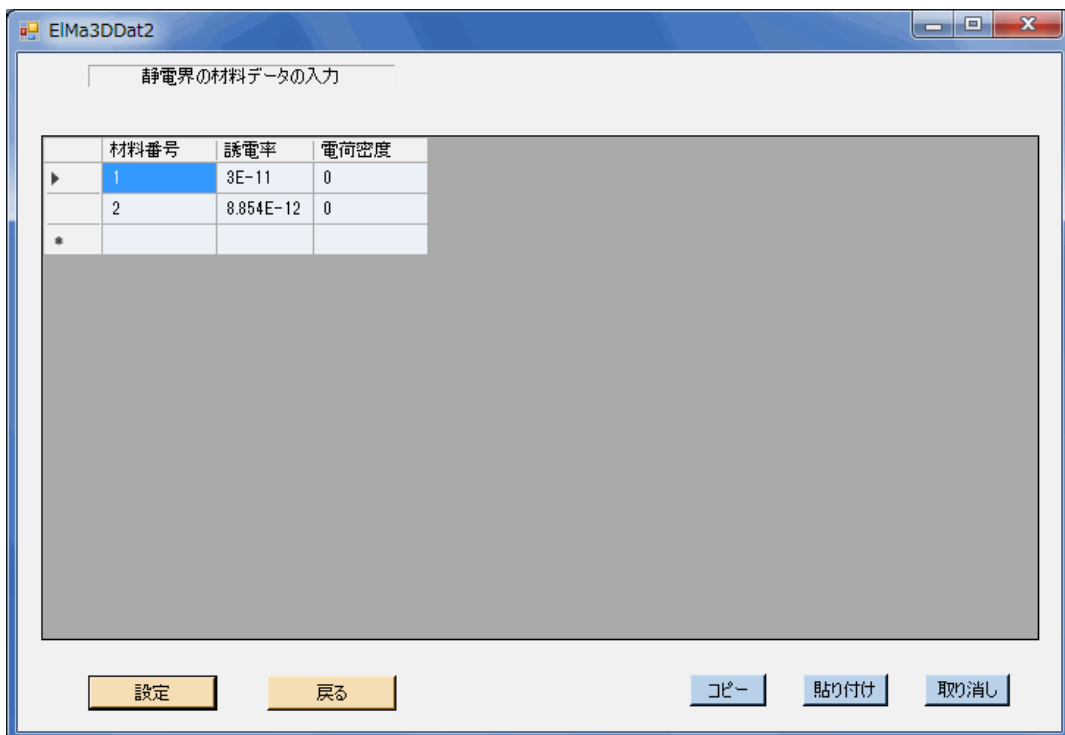
- ①各材料毎に物性データを入力します。
- ②すべての材料データを入力し終ったなら、「設定」ボタンをクリックして次の画面に

移ります。



節点番号	X座標	Y座標	Z座標
1	0	0	0
2	0	0	.005
3	0	0	.01
4	0	0	.015
5	0	0	.02
6	0	0	.025
7	0	0	.03
8	0	0	.035
9	0	0	.04
10	0	0	.045
11	0	0	.05
12	0	0	.055
13	0	0	.06
14	0	0	.065
15	0	0	.07
16	0	0	.075

図4-7 節点データ入力画面



材料番号	誘電率	電荷密度
1	3E-11	0
2	8.854E-12	0
3		

図4-8 材料データ入力画面（静電界）

4.7 材料物性区分数の入力画面（静磁界）

図4-9に材料物性区分数の入力画面を示します。なお、静電界および準定常電磁界では本画面はありません。

①各材料ごとに物性区分数を入力します。

◇物性区分数は、磁束密度 B による透磁率 μ の変化区分数です。そして、各区分において、それらの関係は直線変化となります。

・透磁率 μ の値を一定とする場合は、材料区分数を0とします。

◇物性区分数が1以上の場合に、磁性体が受ける磁気力が計算出力されます。

・透磁率 μ が一定の場合でも、材料区分数を1にして同じ値を設定すれば、磁気力を出力できます。

②物性区分数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。

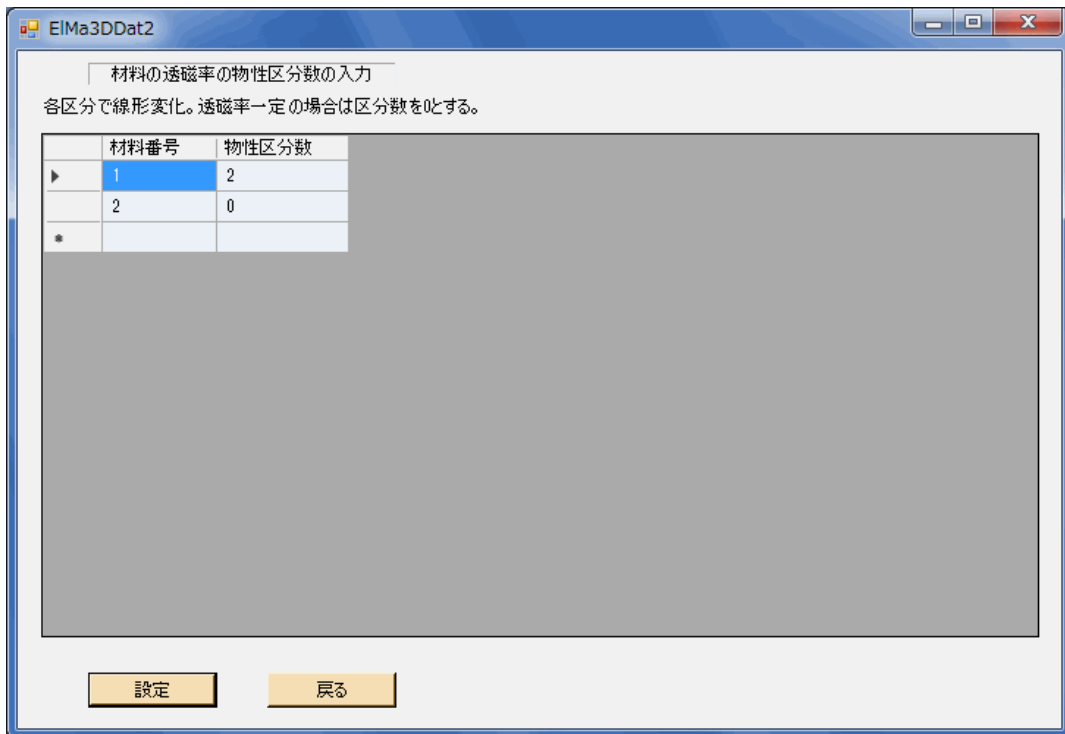


図4-9 材料物性区分数の入力画面（静磁界）

4.8 材料の電流密度・磁化区分の入力画面（静磁界（電流有り）、準定常電磁界）

図4-10に材料の電流密度・磁化区分の入力画面を示します。ただし、準定常電磁界では磁化が省略されます。なお、静電界および静磁界（電流なし）では本画面はありません。

①各材料毎に定義区分として、電流密度 J の場合は0か1、または磁化 M の場合は2か3を入力します。ただし、準定常電磁界では、電流密度を設定する材料の定義区分は1でなければなりません（インピーダンス等の計算のため）。

◇電流密度 J をXYZ座標軸方向に与える場合は区分を0、要素の対面方向に与える場合は区分を1とします。

◇磁化 M をXYZ座標軸方向に与える場合は区分を2、要素の対面方向に与える場合は区分を3とします。

◇四面体要素の場合は、対面方向を指定できません。

②定義区分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。

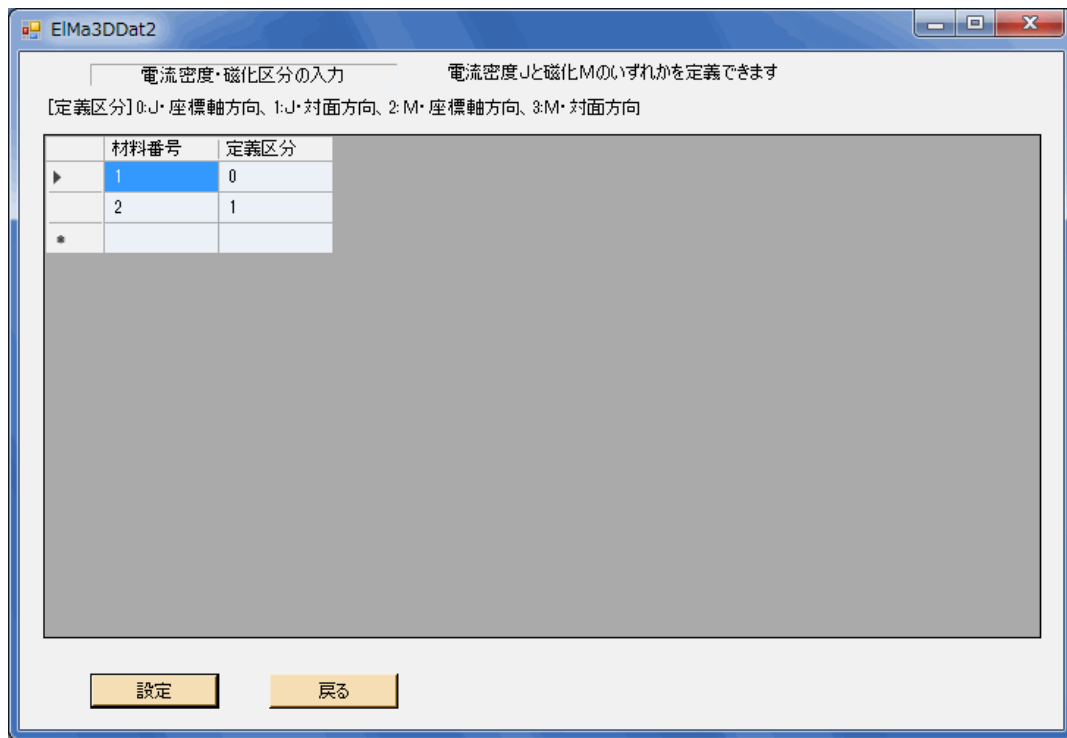


図4-10 材料の電流密度・磁化区分の入力画面（静磁界（電流有り）、準定常電磁界）

4.9 境界固定・非固定節点データ入力画面

本入力は、境界固定・非固定の節点数が1以上の場合にのみ実施します。図4-11に静電界の境界固定・非固定節点データ入力画面を示します。解析の種類により、データ項目の個数や名称が異なります。

- ①境界固定・非固定の節点数の分だけ固定番号が表示されているので、それぞれ節点番号、各変数の拘束区分と変数値を入力します。
 - ◇拘束区分は、非固定の場合は0、固定の場合は1を入力します。
 - ◇拘束区分が1（固定）の場合に変数値が有効になります。
 - 拘束区分が0（非固定）の場合には変数値は無視されます。
- 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つの固定番号のデータを他の固定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すべての境界固定・非固定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。

ElMa3DDat2

電位固定・非固定の節点の入力 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:非固定、1:固定

	固定番号	節点番号	電位拘束	電位値
▶	1	137	1	1
	2	138	1	1
	3	139	1	1
	4	154	1	1
	5	168	1	1
	6	385	1	1
	7	386	1	1
	8	396	1	1
	9	593	1	1
	10	594	1	1
	11	595	1	1
	12	610	1	1
	13	625	1	1
	14	140	1	1
	15	141	1	1
	16	155	1	1

設定 戻る 一括コピー コピー 貼り付け 取り消し

図4-11 境界固定・非固定節点データ入力画面（静電界）

4.10 境界固定・非固定面データ入力画面

本入力は、境界固定・非固定の面の数が1以上の場合にのみ実施します。図4-12、図4-13に静電界と静磁界（電流有り）の境界固定・非固定面データ入力画面を示します。解析の種類により、データ項目の個数や名称が異なります。

- ①境界固定・非固定の面の数の分だけ固定番号が表示されているので、それぞれ要素番号、面番号、各変数の拘束区分と変数値を入力します。

◇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。

◇拘束区分は、非固定の場合は0、固定の場合は1を入力します。

◇拘束区分が1（固定）の場合に変数値が有効になります。

拘束区分が0（非固定）の場合には変数値は無視されます。

- 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つの固定番号のデータを他の固定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すべての境界固定・非固定面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。

ElMa3DDat2

電位固定・非固定の面の入力 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:非固定、1:固定

固定番号	要素番号	面番号	電位拘束	電位値
1	1	1	0	0
2	2	1	0	0
3	3	1	0	0
4	4	1	0	0
5	5	1	0	0
6	6	1	0	0
7	7	1	0	0
8	8	1	0	0
9	9	1	0	0
10	10	1	0	0
11	11	1	0	0
12	12	1	0	0
13	13	1	0	0
14	14	1	0	0
15	15	1	0	0
16	16	1	0	0

設定 戻る 一括コピー コピー 貼り付け 取り消し

図4-12 境界固定・非固定面データ入力画面（静電界）

ElMa3DDat2

A固定・非固定の面の入力 要素番号に-1を入力すると、その行を削除・前詰めします。

A: 磁気ベクトルポテンシャル 【拘束区分】0:非固定、1:固定

固定番号	要素番号	面番号	Ax拘束	Ax値	Ay拘束	Ay値	Az拘束	Az値
1	1	3	1	0	0	0	1	0
2	2	3	1	0	0	0	1	0
3	3	3	1	0	0	0	1	0
4	4	3	1	0	0	0	1	0
5	5	3	1	0	0	0	1	0
6	6	3	1	0	0	0	1	0
7	61	3	1	0	0	0	1	0
8	62	3	1	0	0	0	1	0
9	63	3	1	0	0	0	1	0
10	64	3	1	0	0	0	1	0
11	101	3	1	0	0	0	1	0
12	102	3	1	0	0	0	1	0
13	103	3	1	0	0	0	1	0
14	104	3	1	0	0	0	1	0
15	105	3	1	0	0	0	1	0
16	106	3	1	0	0	0	1	0

設定 戻る 一括コピー コピー 貼り付け 取り消し

図4-13 境界固定・非固定面データ入力画面（静磁界（電流有り））

4.11 流束固定データ入力画面

本入力、流束固定境界の面の数が1以上の場合にのみ実施します。図4-14に流束固定データ入力画面（静磁界（電流なし））を示します。なお、ここでは一般的に流束と称しますが、静電界では電束というように呼び方が異なります。また、静磁界（電流有り）と準定常電磁界では本画面はありません。

①流束固定境界の面の数だけ番号が表示されているので、それぞれ要素番号、面番号と流束値を入力します。

◇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。

◇流束値は、面に単位面積当りの密度で、要素から流出する向きを正とします。

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つの番号組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、要素番号はコピーされません。

④すべての流束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。

番号	要素番号	面番号	磁束密度 q
1	32	5	.001
2	34	5	.001
3	36	5	.001
4	38	5	.001
5	39	6	-.001
6	40	6	-.001
7	41	6	-.001
8	42	6	-.001
9	108	5	.001
10	110	5	.001
11	112	5	.001
12	114	5	.001
13	115	6	-.001
14	116	6	-.001
15	117	6	-.001
16	118	6	-.001

図4-14 流束固定データ入力画面（静磁界（電流なし））

4.12 節点負荷データ入力画面（静電界のみ）

本入力は、負荷の節点数が1以上の場合にのみ実施します。図4-15に静電界の節点負荷データ入力画面を示します（負荷は電荷）。

①負荷の節点数だけ番号が表示されているので、それぞれ節点番号と負荷を入力します。

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。

③すべての節点負荷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。

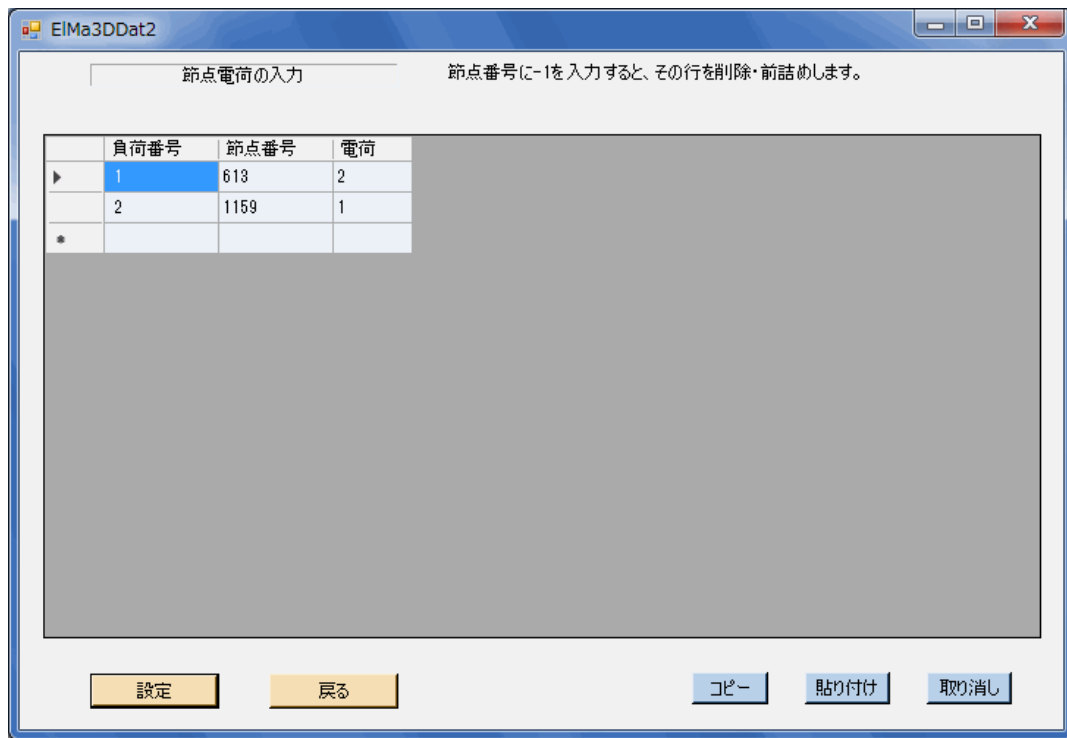


図4-15 節点負荷データ入力画面（静電界）

4.13 透磁率データ入力画面（静磁界）

図4-16に材料の透磁率データ入力画面を示します。本画面は静磁界の場合だけです。

①各区分端番号毎に、磁束密度と透磁率を入力します。

◇区分端番号は0から始まります。物性区分数が0の場合は、区分端番号0にだけ磁束密度と透磁率を入力します。その場合、透磁率は一定で、磁束密度は任意の値で構いません。

◇各区分における磁束密度と透磁率の関係は、区分両端の点を結ぶ直線関係となります。なお、物性区分数が1以上の場合、最大区分番号端の磁束密度は算出される値よりも十分大きくしておきます。

②透磁率データを入力し終わったら、「設定」ボタンをクリックします。材料の数が複数の場合は、順次、次の材料番号のデータ入力画面となります。すべての材料番号について終了すると次の画面に移ります。

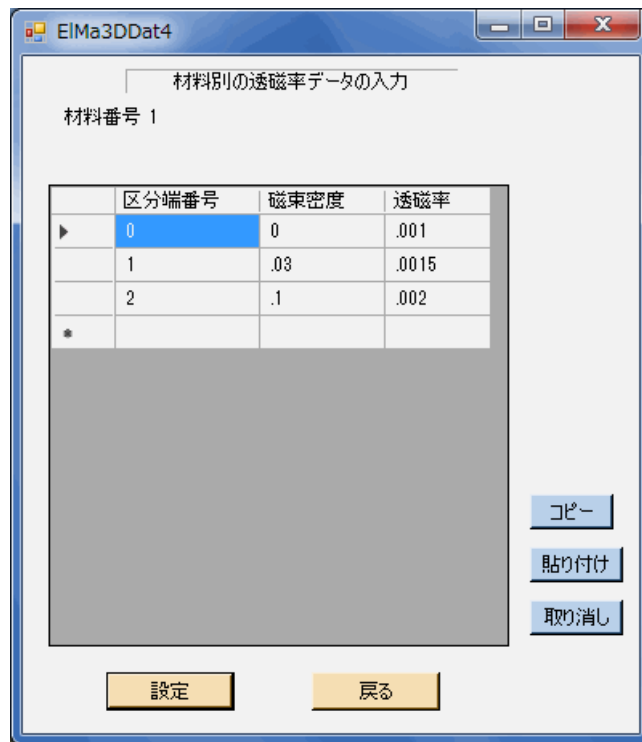


図4-16 透磁率データ入力画面（静磁界）

4.14 電流密度・磁化データ入力画面（静磁界（電流有り）、準定常電磁界）

図4-17、図4-18に材料の電流密度データ入力画面を示します。また、磁化の場合は、電流密度が磁化に置き換わります。ただし、準定常電磁界では電流密度だけです。図4-17は電流密度の定義区分がXYZ方向の場合、図4-18は要素対面方向の場合です。なお、静電界と静磁界（電流なし）では本画面はありません。

①図4-17では、XYZ方向の電流密度を入力します。

②図4-18では、電流の流入する面番号と電流密度を入力します。

◇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。

◇磁化の場合は、入力した面番号から対面への向きが正の磁化方向となります。

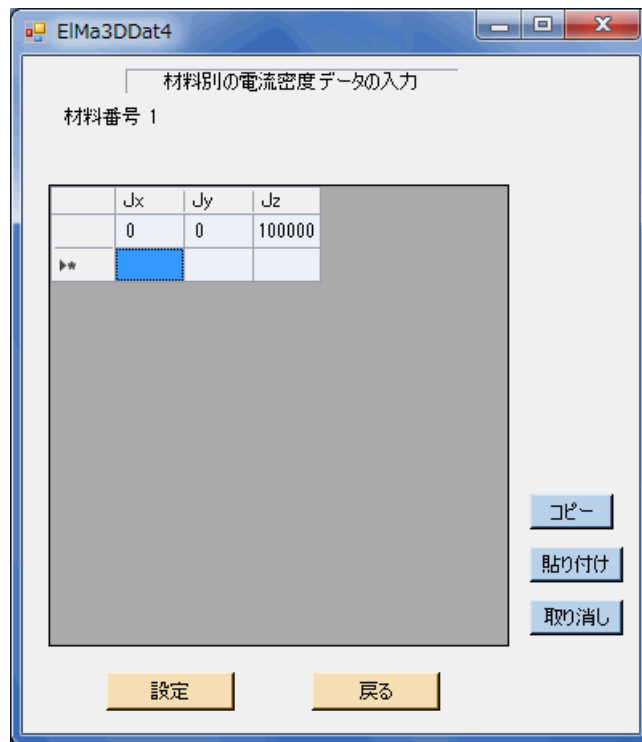
[準定常電磁界の場合]

入力する電流密度（正弦波交流、単位面積当り）は通常は実効値を使用しますが、最大値でも構いません。実効値を使用した場合は計算結果も実効値となり、最大値を使用した場合は結果も最大値となります。

③表データについては、「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。

④電流データを入力し終わったら、「設定」ボタンをクリックします。材料の数が複数の場合は、順次、次の材料番号のデータ入力画面となります。すべての材料番号について終了すると、図4-3、図4-4のデータ仕様入力画面に戻ります。



材料別の電流密度データの入力

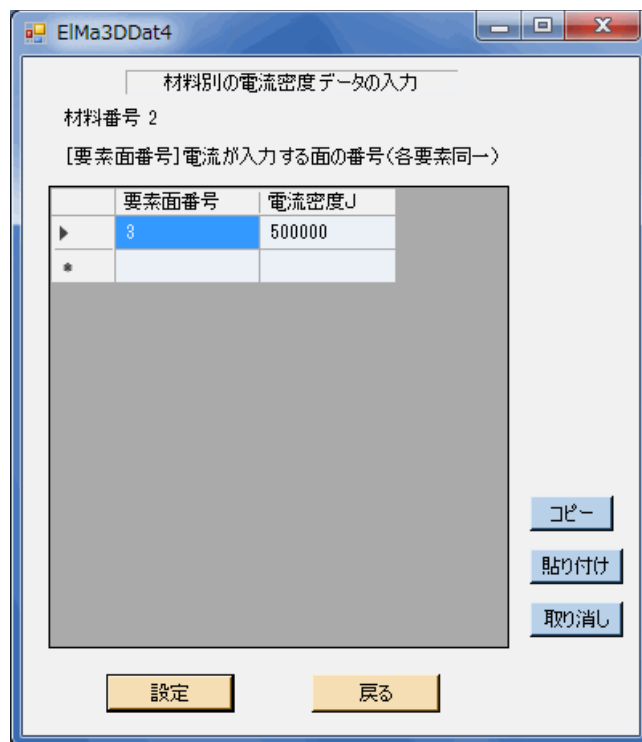
材料番号 1

	Jx	Jy	Jz
	0	0	100000
▶*			

コピー
貼り付け
取り消し

設定 戻る

図4-17 電流密度データ入力画面（XYZ軸方向区分の場合）



材料別の電流密度データの入力

材料番号 2

[要素面番号]電流が入力する面の番号(各要素同一)

	要素面番号	電流密度J
▶	3	500000
*		

コピー
貼り付け
取り消し

設定 戻る

図4-18 電流密度データ入力画面（要素対面方向区分の場合）

4.15 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4-19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。

```
プログラム名, EleMag3D
要素種類 (0:六面体、1:四面体), 0
静電界モデル
解析種類 (0:静電界), 0
境界の設定区分 (0:自動、1:非自動), 0
節点数, 2091
要素数, 372
材料データ数, 2
電位固定・非固定の節点数, 0
電位固定・非固定の面の数, 116
電束固定境界の面の数, 0
電荷の節点数, 0
ガウス積分点数, 3
1節点当りの変数の数, 1
材料データの成分数, 2

-----
要素データ (要素番号、材料番号、20節点番号)
1, 1, 1, 18, 27, 28, 29, 19, 3, 2, 312, 321
   322, 313, 425, 442, 451, 452, 453, 443, 427, 426
2, 1, 3, 19, 29, 30, 31, 20, 5, 4, 313, 322
   323, 314, 427, 443, 453, 454, 455, 444, 429, 428
3, 1, 5, 20, 31, 32, 33, 21, 7, 6, 314, 323
   324, 315, 429, 444, 455, 456, 457, 445, 431, 430
. . . . .
. . . . .
371, 2, 1615, 1626, 1641, 1642, 1643, 1627, 1617, 1616, 1751, 1760
   1761, 1752, 2061, 2072, 2087, 2088, 2089, 2073, 2063, 2062
372, 2, 1617, 1627, 1643, 1644, 1645, 1628, 1619, 1618, 1752, 1761
   1762, 1753, 2063, 2073, 2089, 2090, 2091, 2074, 2065, 2064

-----
節点データ (節点番号、X座標、Y座標、Z座標)
1, 0, 0, 0
2, 0, 0, .005
3, 0, 0, .01
4, 0, 0, .015
5, 0, 0, .02
6, 0, 0, .025
7, 0, 0, .03
8, 0, 0, .035
```

図4-19 (1/2) 入力データファイル例

9,	0,	0,	.04
10,	0,	0,	.045
.....			
.....			
2087,	.12,	.04,	.06
2088,	.12,	.04,	.065
2089,	.12,	.04,	.07
2090,	.12,	.04,	.075
2091,	.12,	.04,	.08

各材料の物性データ			
材料番号、誘電率、電荷密度			
1,	3E-11,	0	
2,	8.854E-12,	0	

< 電位固定・非固定の面 >			
No.、要素番号、面番号、電位拘束、電位値			
1,	1,	1,	0, 0
2,	2,	1,	0, 0
3,	3,	1,	0, 0
4,	4,	1,	0, 0
5,	5,	1,	0, 0
6,	6,	1,	0, 0
7,	7,	1,	0, 0
8,	8,	1,	0, 0
9,	9,	1,	0, 0
10,	10,	1,	0, 0
.....			
.....			
112,	145,	1,	1, 2
113,	152,	1,	1, 2
114,	153,	1,	1, 2
115,	160,	1,	1, 2
116,	161,	1,	1, 2

図4-19 (2/2) 入力データファイル例

4.16 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4-20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4-23参照)。
- 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4-21にマウスの操作方向と回転方向の関係を示します。同図のように、スクリーンの場所により、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4-21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4-22のようにマウスドラッグ範囲の矩形が表示され、コモンダイアログで「選択領域を拡大しますか？」と問うてきます。そこで、「はい」を選択すると、選択領域が拡大されて表示されます。
- ◇上記の選択領域に関しては、要素全体(全節点)が選択領域に入っている要素だけがすべて拡大の対象となります。
- ◇拡大操作を行なった後、元の全体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4-22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4-23に示します。

- 14) 「条件設定部の表示」は、「電位固定・非固定部分（緑色）」、「電束固定面・電荷節点（赤色）」の内、表示したい項目を重複選択できます。これらの項目名は、解析種類（静電界・静磁界等）により変わります。また、材料物性の項目は除外しています。

◇選択した項目がカラー表示されます。図4-24に、「磁位固定・非固定部分（緑色）」、「磁束固定面点（赤色）」の両項目とも表示した構造図（静磁界モデル）を示します。

◇構造内側の要素は、部分拡大で外郭に持ってこないカラー表示されません。

- 15) 任意の要素面を右クリックすると、図4-25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4-26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4-26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4-27のデータ入力画面に移ります。同図は境界固定・非固定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、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4-27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4-28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4-28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4-29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4-29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4-30のデータ入力画面に移ります。同図は流束固定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4-31で「設定」ボタンをクリックすると、データが一括設定されます。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。

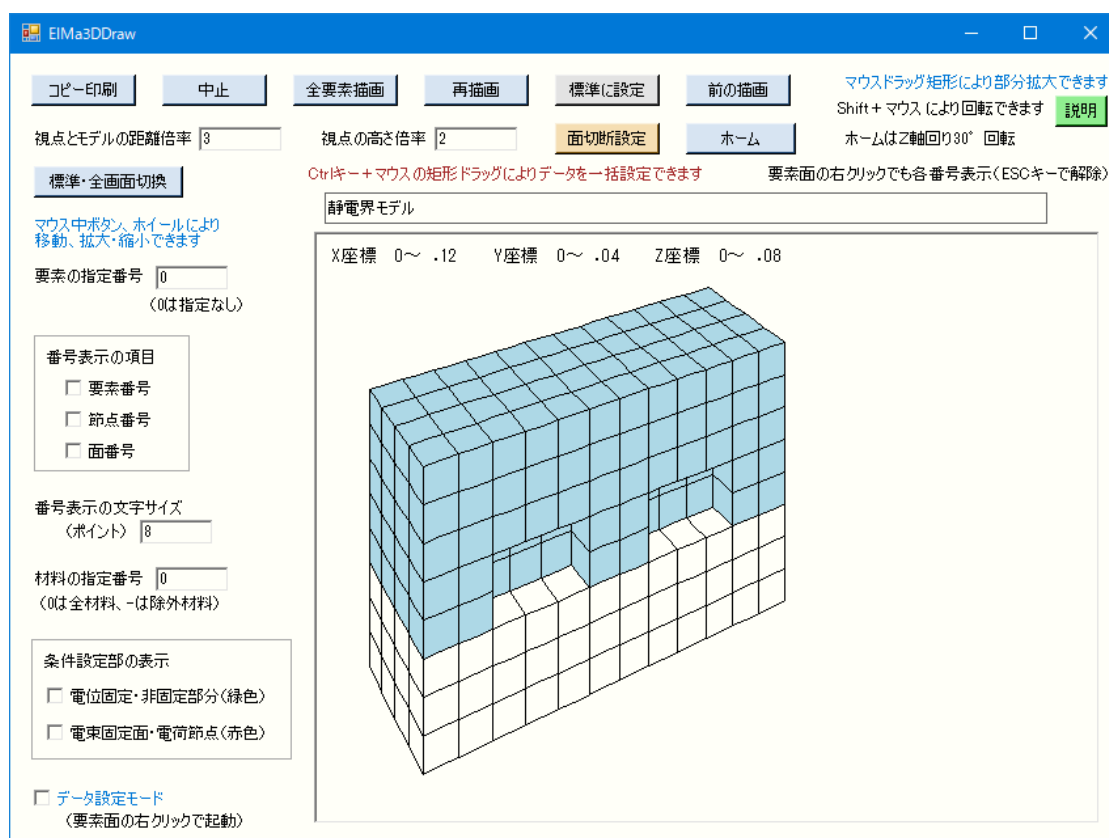


図4-20 構造作画の画面例

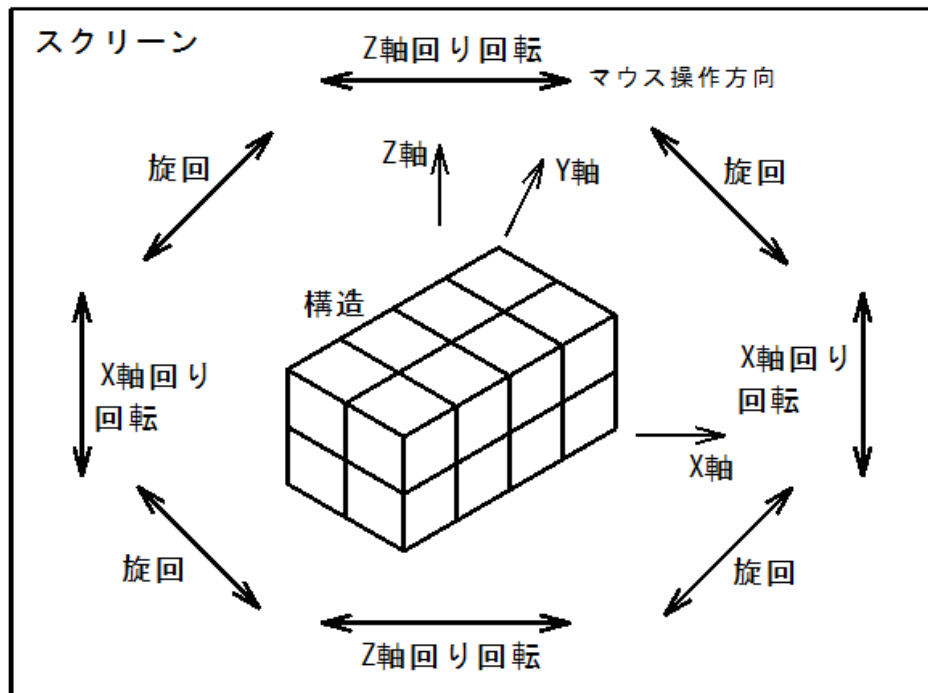


図4-21 マウスの移動方向と回転方向との関係 (Shiftキー併用)

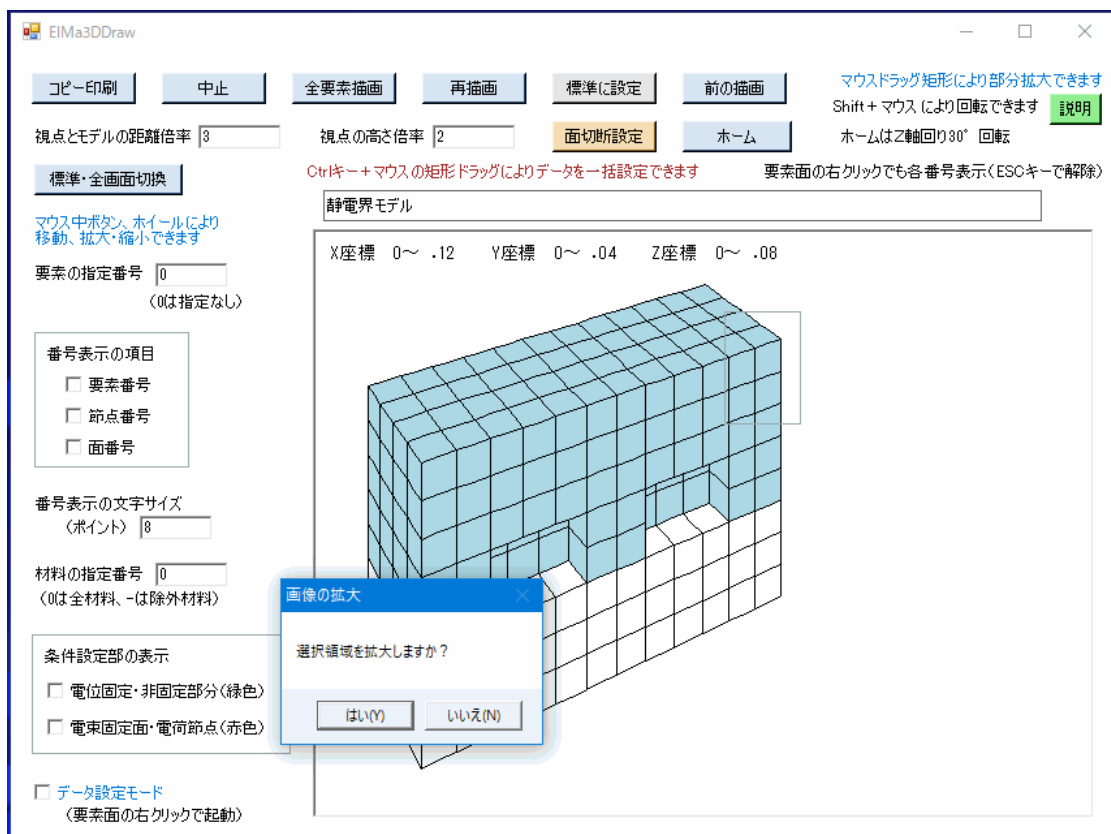


図4-22 構造作画における拡大領域選択例

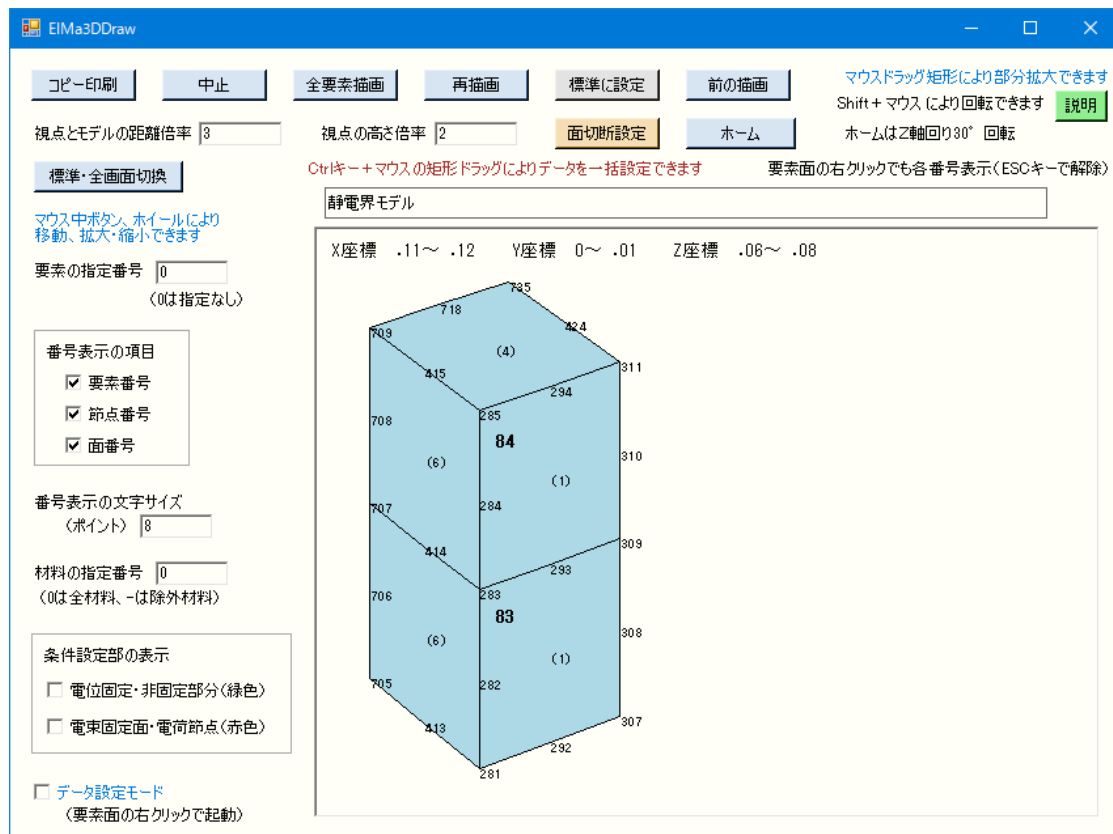


図4-23 構造作画の番号表示有りの部分拡大例

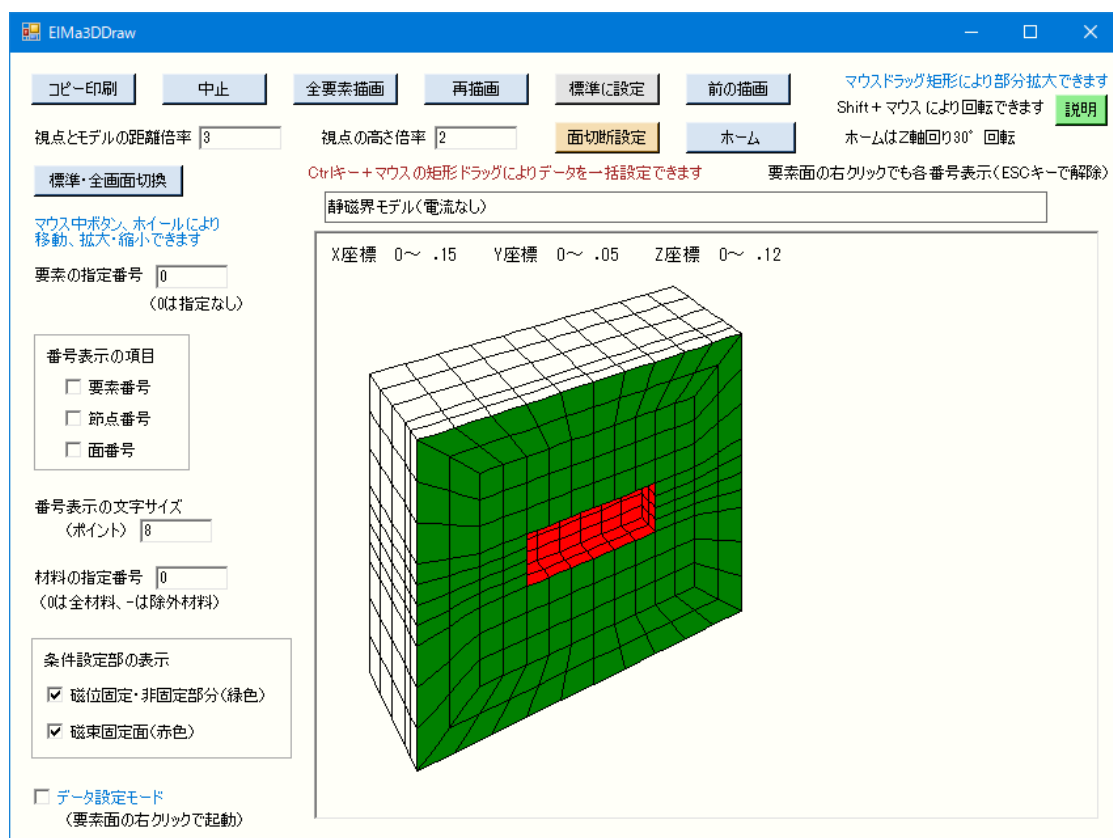


図4-24 構造作画の条件設定部表示有りの静磁界モデル画面例

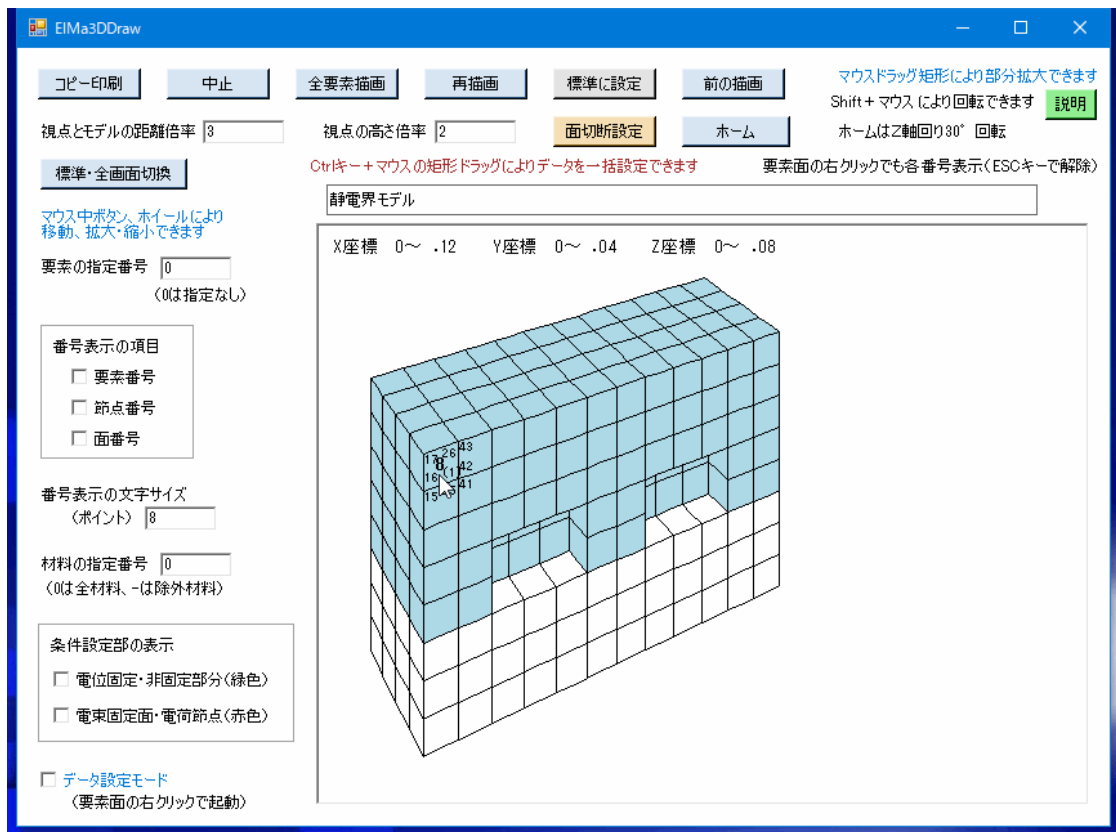


図4-25 構造作画における要素面の右クリック画面例

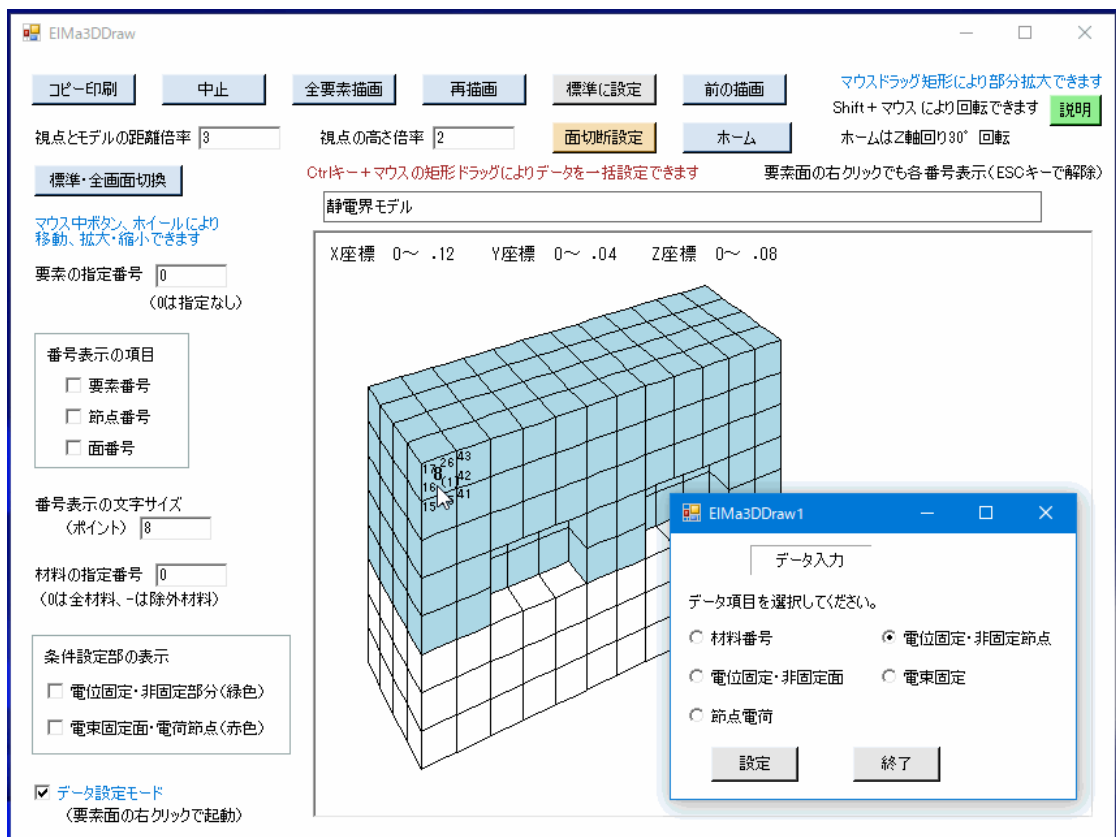


図4-26 構造作画のデータ設定モードにおけるデータ項目選択画面

ElMa3DDraw2

電位固定・非固定の面の入力

[拘束区分] 0:非固定、1:固定

	固定番号	要素番号	面番号	電位拘束	電位値
▶	8	8	1	0	0
	117	0	0	0	0
*					

要素番号に-1を入力すると、その行を削除・前詰めします。
最下行は追加設定用です（入力なしの場合は無視されます）。

設定 中止

図4-27 構造作画におけるデータ入力画面例（電位固定面の場合）

E3DPlaneCut

面切断の指定

いずれかの座標軸に垂直な面で切断します。

座標軸選択

☐ X

☒ Y

☐ Z

座標値

許容誤差(±)

選択部分

☒ 正側

☐ 負側

設定 中止

図4-28 面切断設定の画面

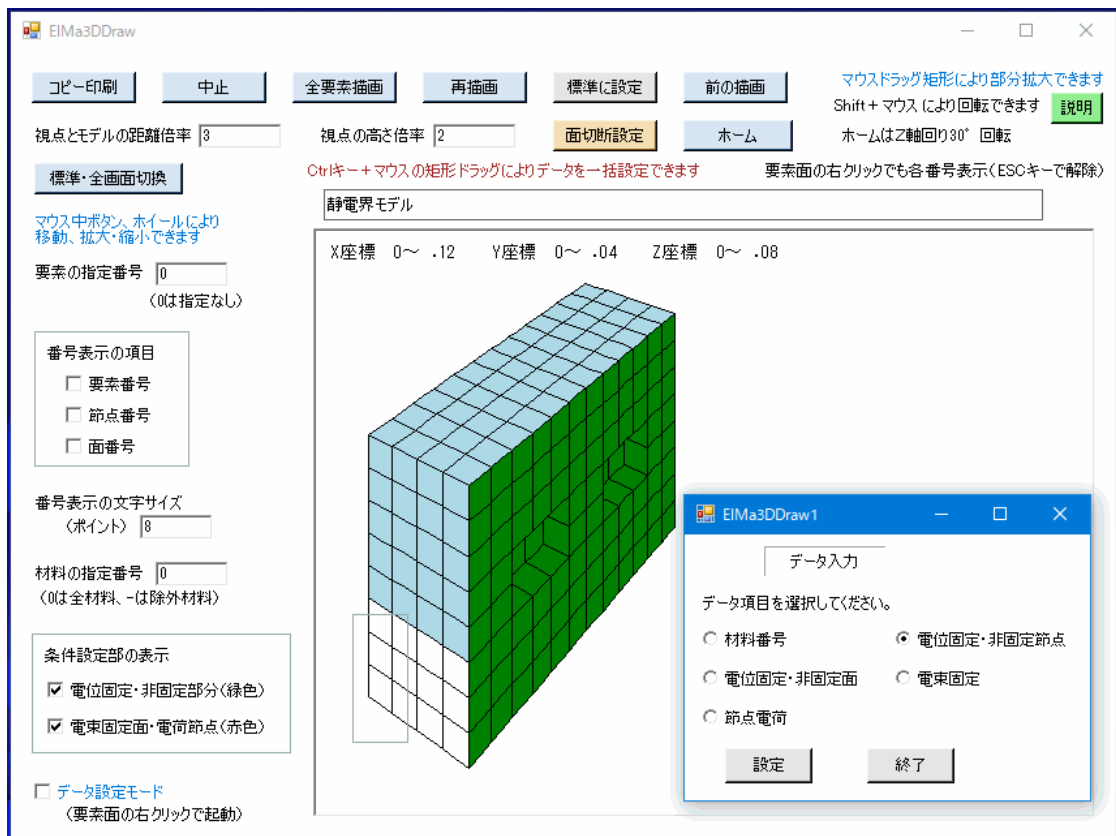


図4-29 構造作画の「Ctrlキー+マウス」ドラッグ矩形によるデータ項目選択画面

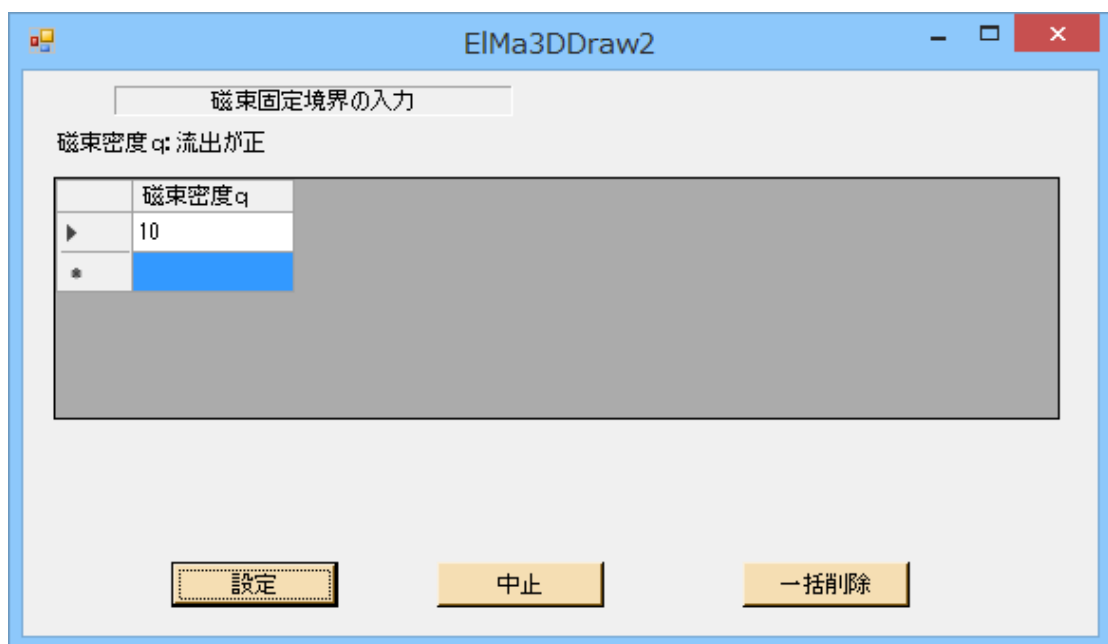


図4-30 構造作画における一括設定データ入力画面例（磁束固定の場合）

4.17 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4-31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4-31 構造モデルの移動量入力画面

4.18 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4-32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4-33参照）。

2) 図4-32の画面で「作画」ボタンをクリックすると、図4-33のように2つの構造図が作画された画面となります。本作画により、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4-33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4-34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。

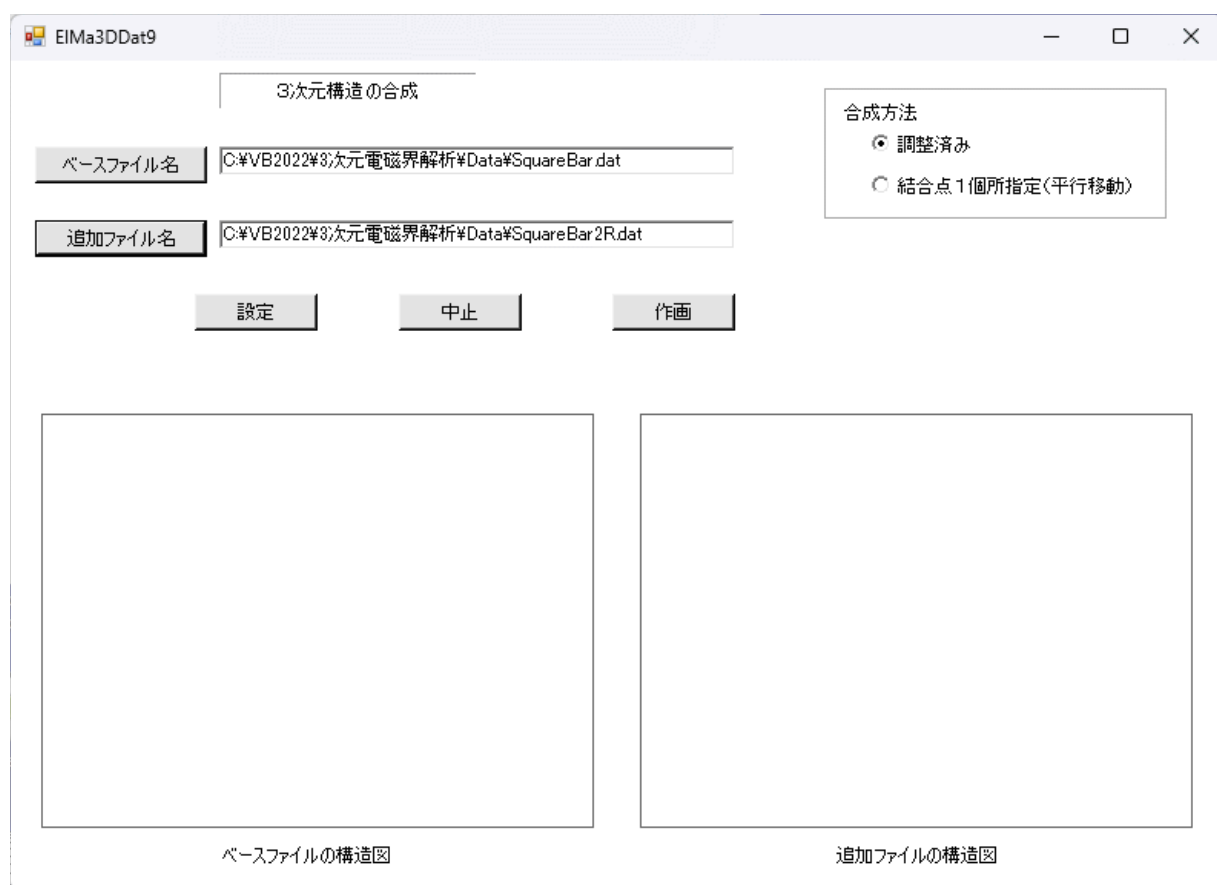


図4-32 合成ファイル設定画面（作画前）

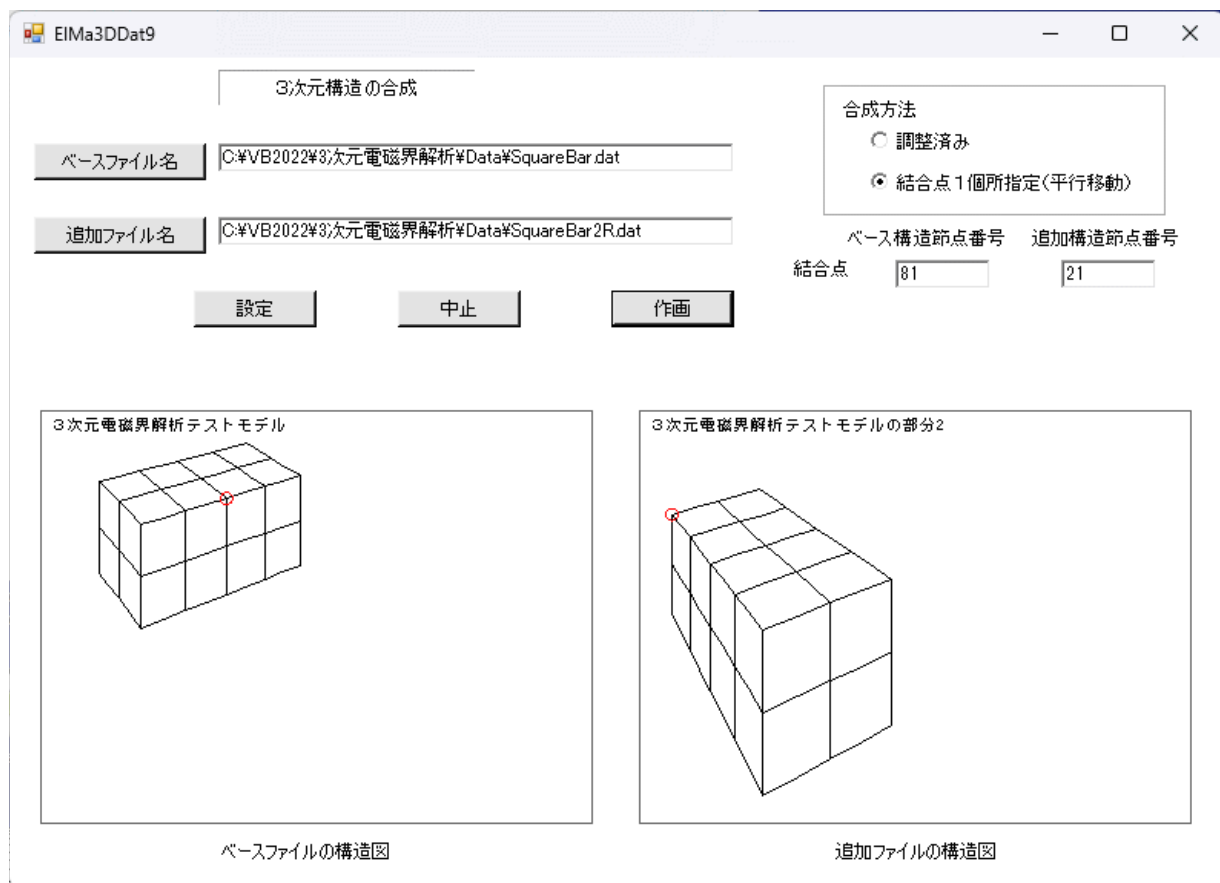


図4-33 合成ファイル設定画面（作画有り）

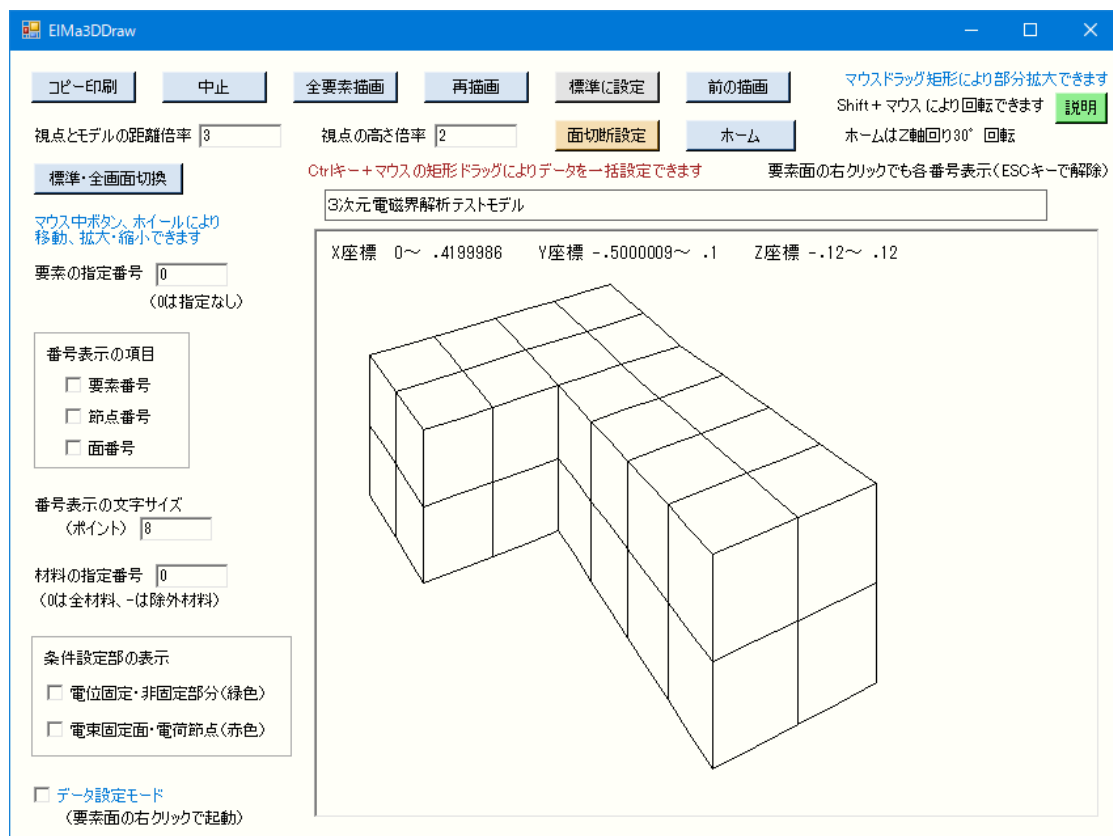


図4-34 合成されたモデルの構造図の画面例

4.19 各種境界面の一括設定

サブメニューの「各種境界面の一括設定」を選択すると、図4-35の一括設定の変数値入力画面となります。

①まず、境界種別として固定・非固定、流束境界のいずれかを選択します。

◇流束境界は、静電界か静磁界（電流なし）の場合のみです。

②次に、その境界の変数値を入力します。

◇解析種類に応じて変数値内容が異なります。これは、4.10、4.11節と同じです。

③本画面の「設定」ボタンをクリックすると、次の境界面一括設定画面に移ります。

図4-35 一括設定の変数値の入力画面

図4-36の境界面一括設定画面について説明します。ここで、境界面は要素の外部面が対象で、面の全節点が指定条件に当てはまるすべての外部面に対して上記指定種類の境界面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。

◇座標の下限と上限は、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。

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。

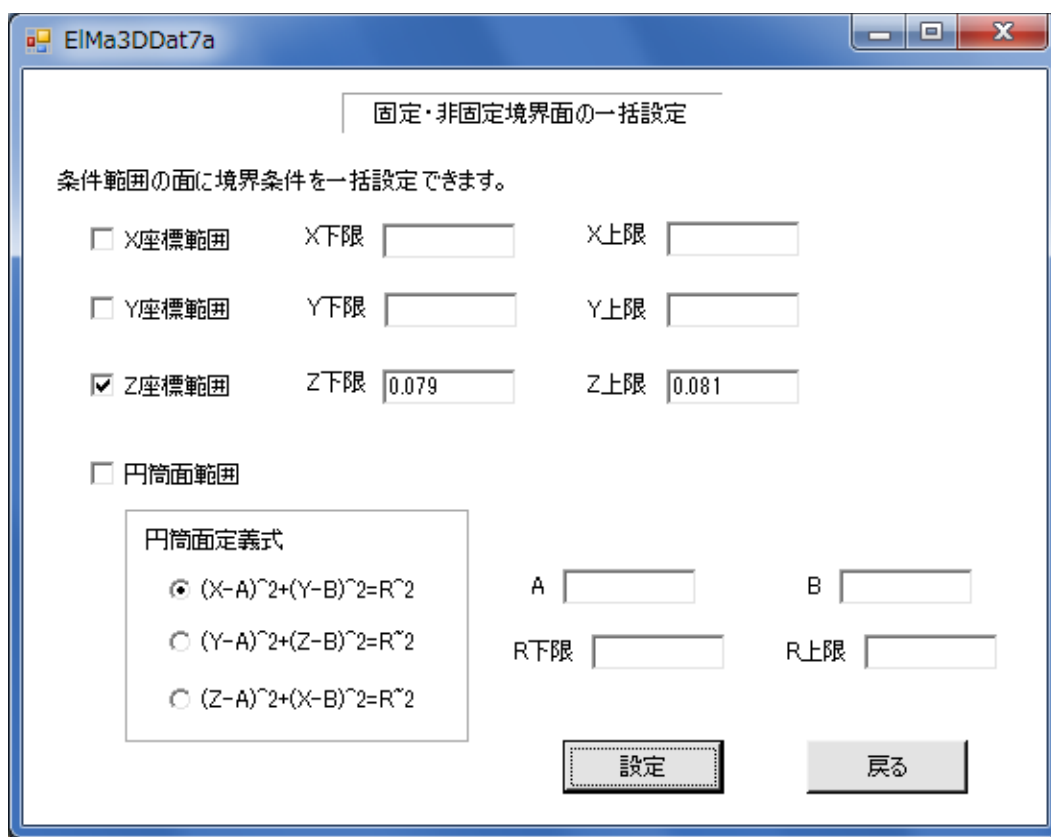


図4-36 境界面の一括設定画面

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、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 要素面番号の変更

サブメニュー「要素面番号の変更」により、要素の面番号を変更することができます。本サブメニューの目的は、材料の電流方向区分で要素対面方向を指定した場合に、同一材料の各要素で面番号を統一するためです。本サブメニューを選択すると、図4-37の要素面番号変更のデータ入力画面となります。

- ①まず、変更する要素番号の範囲（MIN～MAX）を入力します。
- ②次に、変更する面番号と新しい面番号を入力します。

◇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。

- ③本画面の「設定」ボタンをクリックすると、面番号の変更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、新しい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。

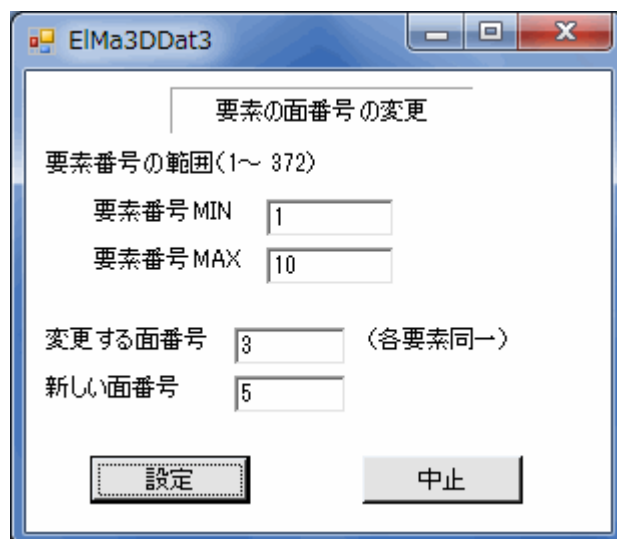


図4-37 要素面番号変更のデータ入力画面

4.22 外郭の拡大メッシュ

サブメニュー「外郭の拡大メッシュ」により、構造の外郭を拡大して要素メッシュを追加することができます。これは、外部問題において、作成済みの構造モデルの外部境界を広げたい場合に容易に対応できるようにするためです。ただし、次の条件が必要です。

〔拡大メッシュ適用の条件〕XYZ座標軸に平行な直方体構造

サブメニュー「外郭の拡大メッシュ」を選択すると、図4-38の外郭拡大メッシュのデータ入力画面となります。

①まず、拡大の長さ倍率と拡大のメッシュ数を入力します。

◇拡大の長さ倍率は、元の構造のX, Y, Z方向各長さに対する倍率で、各座標軸方向の両外側に均等に拡大します。ただし、構造外郭が対称面となっている場合は、その対称面側の拡大は実施しません。

◇拡大のメッシュ数は、各外側の拡大方向の要素メッシュ数を表わします。

②次にX, Y, Z各軸直角の外郭面について、対称面かどうかの指定を入力します。

◇対称面でない場合は0を入力し、対称面の場合はその座標軸に対して負側は-1、正側は1を入力します。

③最後に拡大部分の材料番号を入力します。

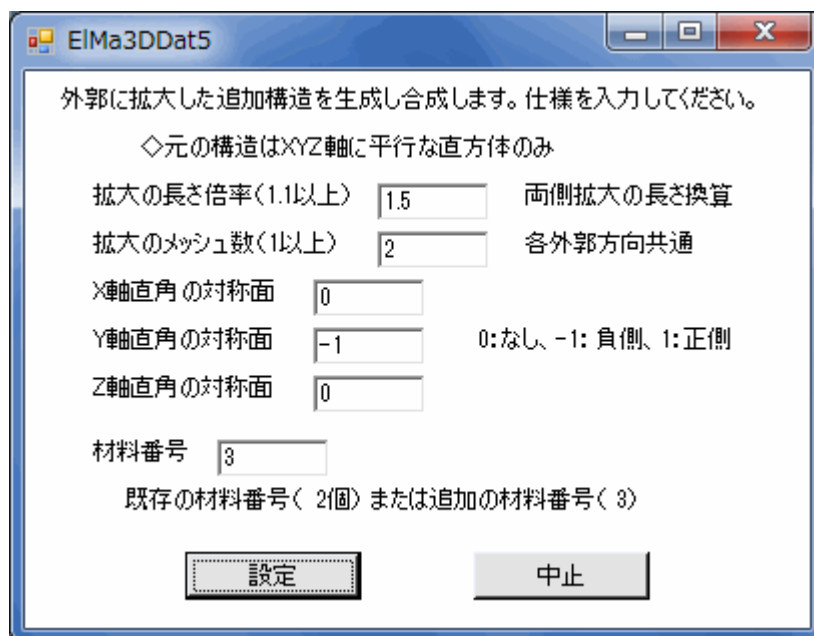
◇材料番号は、既存の材料番号か、1だけ追加の材料番号を使用します。

④本画面の「設定」ボタンをクリックすると、拡大メッシュの生成が実行されます。

拡大メッシュ生成が終了すると、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、新しい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4-39に外部拡大メッシュを実施した構造図を示します。同図では拡大メッシュの部分が緑色で表わされています。



EIMa3DDat5

外郭に拡大した追加構造を生成し合成します。仕様を入力してください。

◇元の構造はXYZ軸に平行な直方体のみ

拡大の長さ倍率(1.1以上) 両側拡大の長さ換算

拡大のメッシュ数(1以上) 各外郭方向共通

X軸直角の対称面

Y軸直角の対称面 0:なし、-1: 負側、1: 正側

Z軸直角の対称面

材料番号

既存の材料番号(2個)または追加の材料番号(3)

図4-38 外部拡大メッシュのデータ入力画面

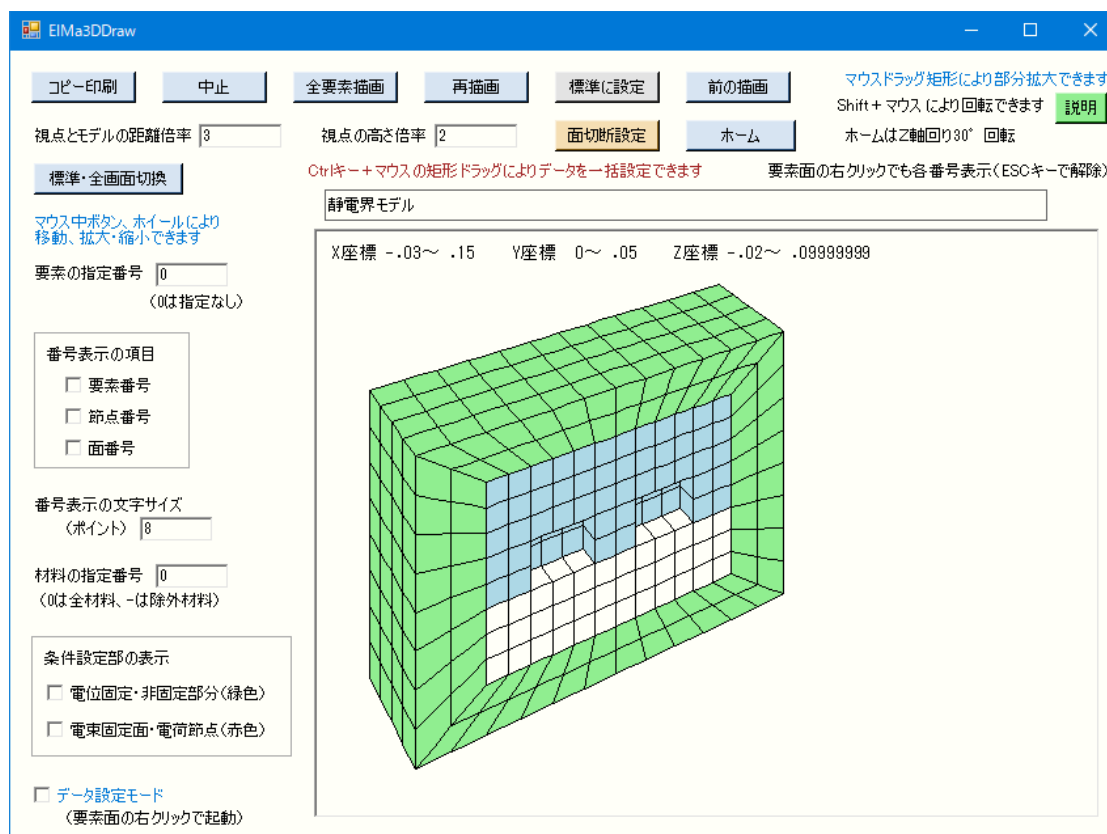


図4-39 外部拡大メッシュを実施した構造図

4.23 要素の削除

サブメニューの「要素の削除」を選択すると、図4-40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自動追従します。

図4-41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。

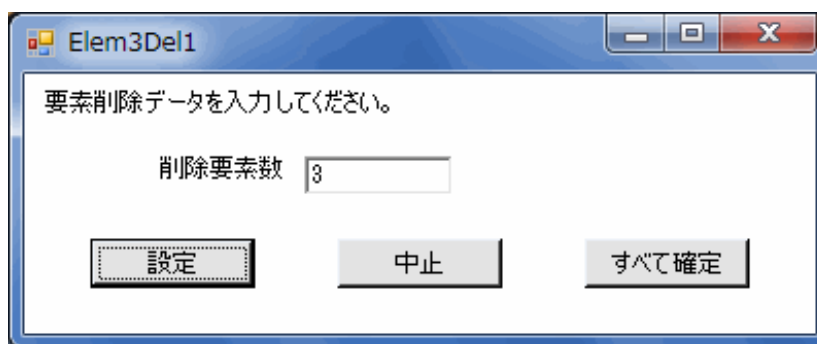


図4-40 削除要素数の入力画面

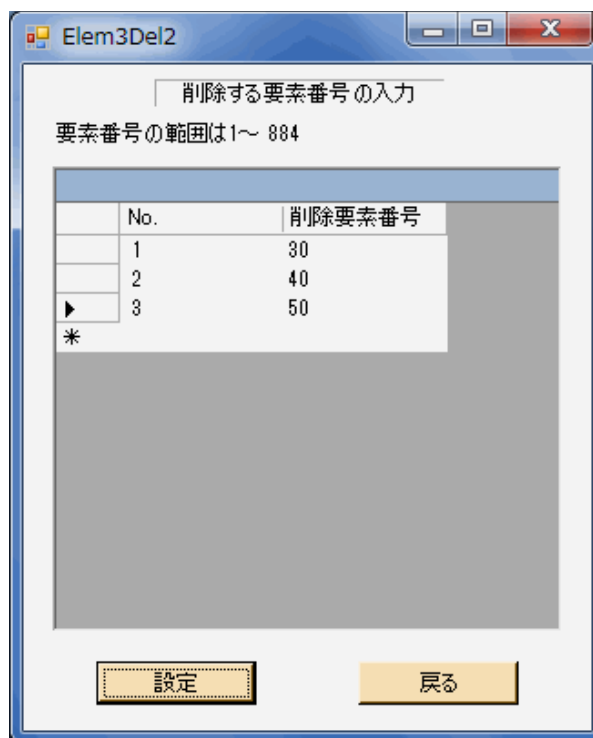


図4-41 削除要素番号の入力画面

4. 24 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4-42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（有限要素の面は三角形に再分割）。
- 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。

- ① Blender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。

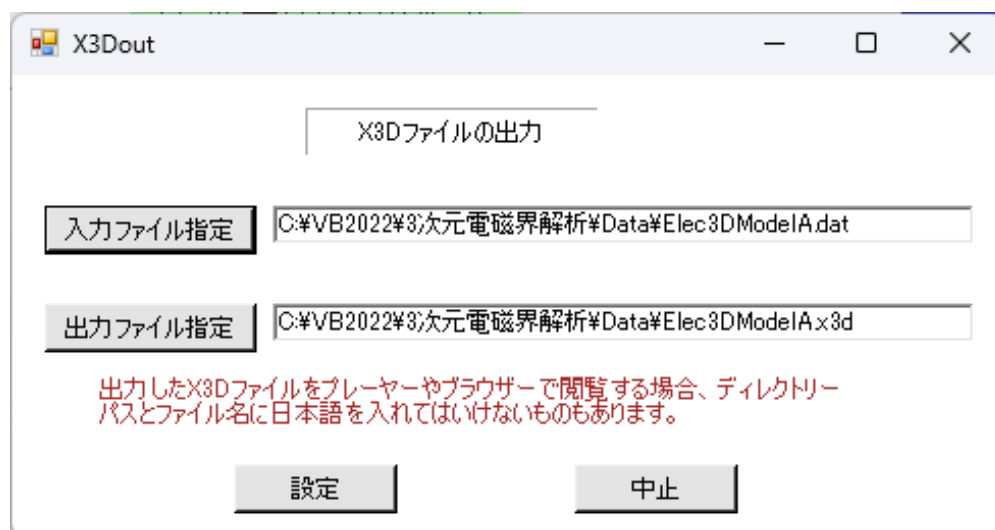


図4-42 X3Dファイル出力のファイル設定画面

4. 25 最近使用したファイルの選択

サブメニュー「最近使用したファイル」のポップアップで、ファイルリストから選択できます。

注) 新版ソフトでファイルが使用されないとリスト表示されません。

第5章 「計算」プログラム

5.1 サブメニュー画面

「メニュー」プログラムにおける「計算」のサブメニュー画面を図5-1に示します。同図に示すように、「解析計算の実行」、「体積計算の実行」、「解析計算のバッチ処理」の3つ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。「解析計算のバッチ処理」は5.7節で説明します。

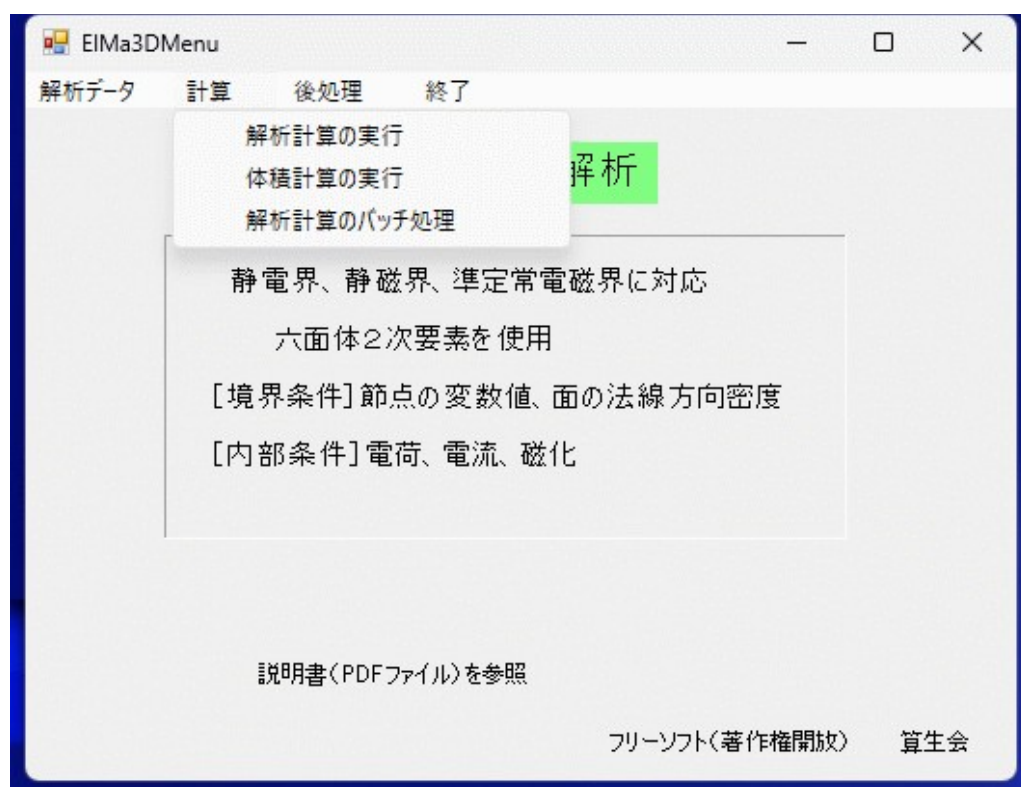


図5-1 「計算」サブメニュー画面

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。

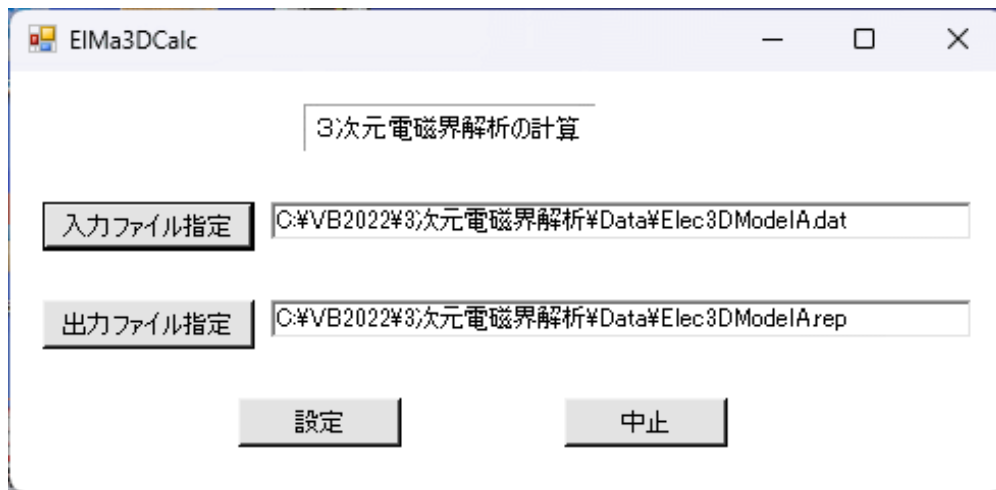


図5-2 「計算」 ファイル設定画面

5.3 計算条件入力画面

図5-3～5に計算条件入力画面を示します。図5-3では、静磁界で物性区分数1以上の場合の条件設定部分も表示されています。また、図5-4は静磁界の電流有りの場合です。

先ず、図5-3の計算条件入力画面について説明します。

- ①静磁界で物性区分数1以上の場合は、最大繰返し計算回数と収束基準誤差率を入力します。

◇デフォルトでは最大繰返し計算回数20、収束基準誤差率0.005になっています。
もし収束しない場合は、最大繰返し計算回数を何倍かに増やして再計算します。
ただし、材料物性（透磁率）の増減変化が激しい場合は収束しないことがあります。

- ②静磁界で環境材料番号を指定すると、磁性体が受ける磁気力を出力できます。

◇環境とは真空または空気を意味し、構造データに環境材料に相当する材料番号がなければなりません。また、1つの材料番号の磁性体が全周を環境材料で囲まれていることが前提です。もし環境材料が全周にない場合は、環境材料に接する部分だけが計算されます。

◇磁性体の材料区分数が1以上のもののみ、磁気力が計算されます。

- ③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」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、準定常電磁界（渦電流）の場合は、「バンドマトリックス法」で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。

表5-1 ソルバー種類選択の目安

ソルバーの種類		解析種別		構造の規模	
		静電界、静磁界(電流なし)、 静磁界(電流有り)	準定常電磁界 (渦電流)	大	中以下
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	×	○	□	△

- 注) ◎：推奨 ○：可 △：欠点有り ×：不可 □：メモリー(RAM)不足の対策
- 反復法 1) 静電界、静磁界(電流なし)、静磁界(電流有り)では対称行列用のCG(Conjugate Gradient)法で、前処理はIC(Incomplete Cholesky)法。
- 2) 準定常電磁界(渦電流)では非対称行列用のBiCGStab(2)(BiConjugate Gradient Stabilized (2))法で、前処理はILU(Incomplete LU Factorization)法。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 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。

④本画面で「設定」ボタンをクリックすると、計算が開始されます。

図5-3 計算条件入力画面（静磁界で物性区分数1以上の場合）

次に、図5-4の画面について、図5-3と異なる点を補足説明します。

- ①電流有りの解析種類で永久磁石の磁化を入れる場合は、環境材料番号を指定することが必須になります。

◇環境の意味は図5-3の説明を参照してください。

- ②本図では省略されていますが、物性区分数が1以上の場合は図5-3と同様に最大繰返し計算回数等の入力部が表示されます。

The screenshot shows a Windows-style dialog box titled "EIMa3DCal2". Inside the dialog, the text "計算条件を入力してください。" (Please input calculation conditions.) is displayed. Below this, there is a label "環境材料番号" (Environment material number) followed by a text input field containing the value "1". To the right of the input field is a note in parentheses: "(永久磁石の磁化があるため、指定が必須)" (Because of the magnetization of the permanent magnet, specification is required). Below the input field is a section titled "ソルバー選択" (Solver selection) containing three radio button options: "反復法(前処理なし)" (Selected), "反復法(前処理有り)" (With pre-processing), and "バンドマトリックス法" (Band matrix method). At the bottom of the dialog, there are two buttons: "設定" (Settings) and "戻る" (Back).

図5-4 計算条件入力画面（静磁界で電流有りの場合）

5.4 計算終了

図5-5に計算終了画面、図5-6に計算確認ダイアログ画面を示します。図5-5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5-6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。

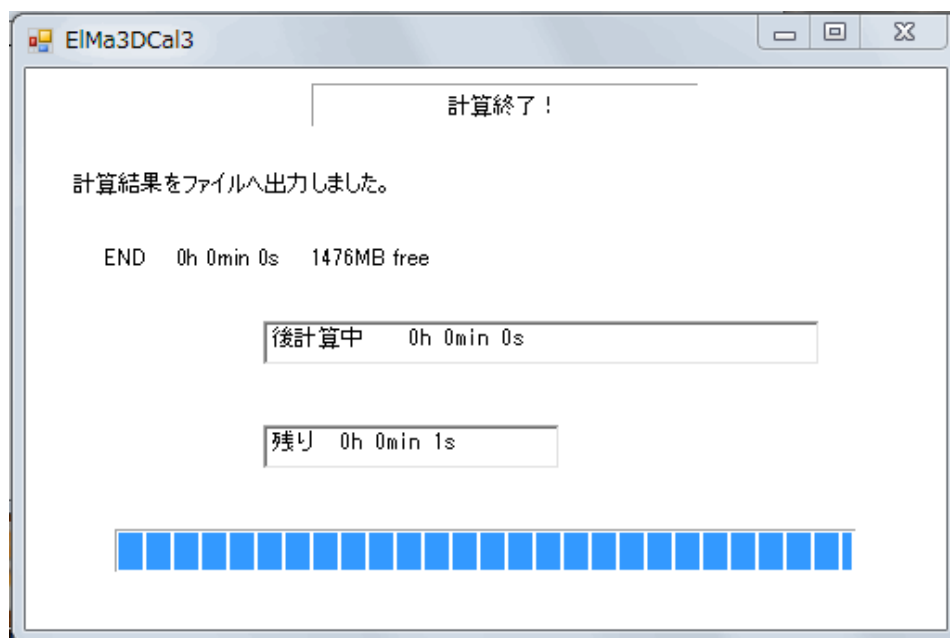


図5-5 計算終了画面

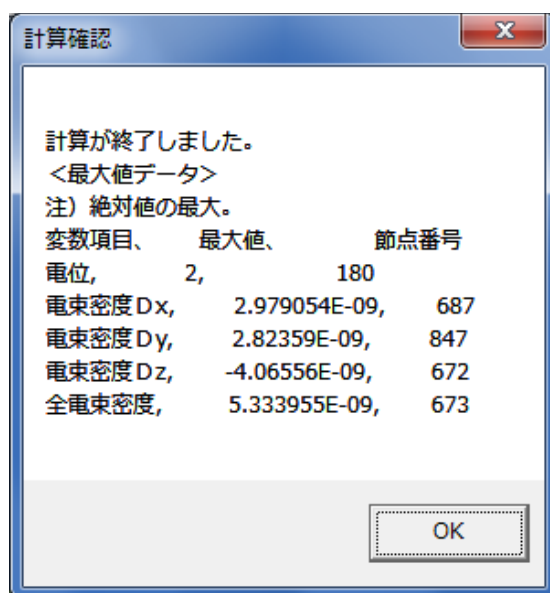


図5-6 計算確認ダイアログ画面（静電界の場合）

5.5 計算結果

上記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5-7に結果ファイルへの出力例（静電界）を示します。結果ファイルの出力は、各解析種類で異なるので、静電界以外は各解析種類の計算例を参照してください。

図5-7で○印を付した数字の部分について補足説明します。

- ①解析種類として静電界が示されています。
- ②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。
- ③計算マトリックスの変数個数、ハーフバンド幅、保存インデックス数（1個）が、それぞれ1282、369、27654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。

- ④全節点について、節点番号、電位、電束密度 D_x 、 D_y 、 D_z 、全電束密度が出力されています。
- ⑤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。
- ⑥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。

<< 3次元電磁界解析の計算結果 >>

静電界モデル

[入力データファイル] , C:\¥VB2022¥3次元電磁界解析¥Data¥Elec3DModelA. dat

[解析種類] 静電界

①

*** 計算結果 (反復法、前処理なし) ***

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)

③

1282, 369, 27654

** 節点の計算出力 **

<節点番号、電位、電束密度 Dx、電束密度 Dy、電束密度 Dz、全電束密度>

④

1, 0, 6.368652E-16, -1.019556E-16, 6.700919E-16, 9.300621E-16
2, 0, -1.290928E-10, -6.735912E-18, 9.535992E-17, 1.290928E-10
3, 0, -2.734307E-10, -1.144381E-16, 7.529019E-16, 2.734307E-10
4, 0, -4.136513E-10, -3.586716E-17, 1.343276E-16, 4.136513E-10
5, 0, -5.975301E-10, -3.802858E-16, 6.141143E-16, 5.975301E-10
6, 0, -7.187179E-10, -1.972048E-17, 5.771413E-17, 7.187179E-10
7, 0, -4.662154E-10, -1.713074E-16, 4.380389E-16, 4.662154E-10
8, 0, -2.838755E-10, 7.970346E-18, 3.135056E-17, 2.838755E-10
.....
1000, 0, 1.727336E-18, -2.584906E-17, 1.184043E-10, 1.184043E-10
1001, 0, 9.799732E-17, -6.427092E-16, -3.737748E-10, 3.737748E-10
1002, .05758252, -1.204745E-11, 1.39231E-10, -3.172128E-10, 3.466329E-10
1003, .1057377, -1.026237E-11, 2.76453E-10, -4.041527E-10, 4.897662E-10
1004, .1933361, -7.240226E-11, 4.894143E-10, -5.035191E-10, 7.059036E-10
1005, .2735774, -1.033728E-10, 7.418999E-10, -6.107934E-10, 9.665246E-10
1006, .3661838, -1.010045E-10, 7.176879E-10, -3.490593E-10, 8.044378E-10
1007, .3899306, -1.0725E-10, 5.753872E-10, -1.105318E-10, 5.956427E-10
1008, .51073, -4.229928E-11, 3.152151E-10, -1.426582E-10, 3.485701E-10
.....
2084, 0, -4.981706E-17, -4.660803E-17, -1.609915E-18, 6.823958E-17
2085, 0, -3.232781E-16, -3.374979E-16, -4.706996E-17, 4.697117E-16
2086, 0, -4.398773E-17, -4.283033E-17, -3.733597E-18, 6.150852E-17
2087, 0, -2.240954E-16, -2.369973E-16, -5.737423E-17, 3.31177E-16
2088, 0, -2.618243E-17, -2.549805E-17, -2.013204E-18, 3.660223E-17
2089, 0, -1.011815E-16, -1.028661E-16, -5.472082E-17, 1.543163E-16
2090, 0, -8.481568E-18, -7.579288E-18, -5.940268E-19, 1.139015E-17
2091, 0, -3.273137E-17, -4.352561E-17, -4.97035E-17, 7.373099E-17

<最大値データ>

⑤

注) 絶対値の最大。

変数項目、	最大値、	節点番号
電位,	2,	180
電束密度 Dx,	2.979054E-09,	687
電束密度 Dy,	2.82359E-09,	847
電束密度 Dz,	-4.06556E-09,	672
全電束密度,	5.333955E-09,	673
END	0h 0min 0s	5202MB free

⑥

図5-7 結果ファイルへの出力例 (静電界)

図5-8、5-9に材料が受ける力の出力例を示します。図5-8は静電界で節点電荷と電荷部が受けるクーロン力の出力例です。また、図5-9は静電界（電流有り）で、電流部が受けるローレンツ力、および磁性体が受ける磁気力の出力例です。

```

. . . . .
. . . . .
-----
* * 節点電荷が受けるクーロン力 * *
<電荷番号、節点番号、Fcx、Fcy、Fcz、Fcall（絶対値）>
    1,   431,  -9.315881E-06,  -9.993121E-07,   8.471003E-07,   9.407541E-
06
    2,   1341,   3.158512E-06,  -3.064078E-07,  -1.557745E-07,   3.177161E-
06
-----
* * 電荷部が受けるクーロン力 * *
<材料番号、Fcvx、Fcvy、Fcvz、Fcval（絶対値）>
    2,   1.067388,   .8723926,  -1.234743,   1.850669
    3,   .4252089,   .2784543,   .6408363,   .8179306
. . . . .
. . . . .

```

図5-8 節点電荷と電荷部が受けるクーロン力の出力例（静電界）

```

. . . . .
. . . . .
-----
* * 電流部が受けるローレンツ力 * *
<材料番号、Fx、Fy、Fz、Fall（絶対値）>
    2,  -21004.49,  -32775.23,   65550.36,   76238.14
-----
* * 磁性体が受ける磁気力 * *
<材料番号、Fmx、Fmy、Fmz、Fmall（絶対値）>
    3,   7.338954E-09,   4.409086E-10,  -2.654617E-05,   2.654618E-05
. . . . .
. . . . .

```

図5-9 電流部が受けるローレンツ力と磁性体が受ける磁気力の出力例
（静磁界、電流有り）

5.6 体積計算

サブメニュー「体積計算」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。

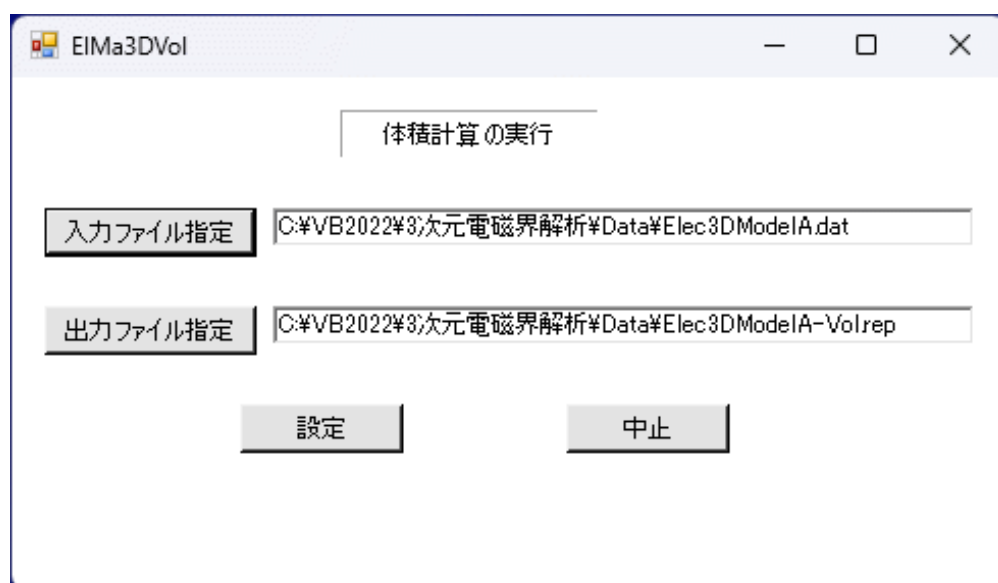


図5-10 体積計算の実行画面

図5-11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。

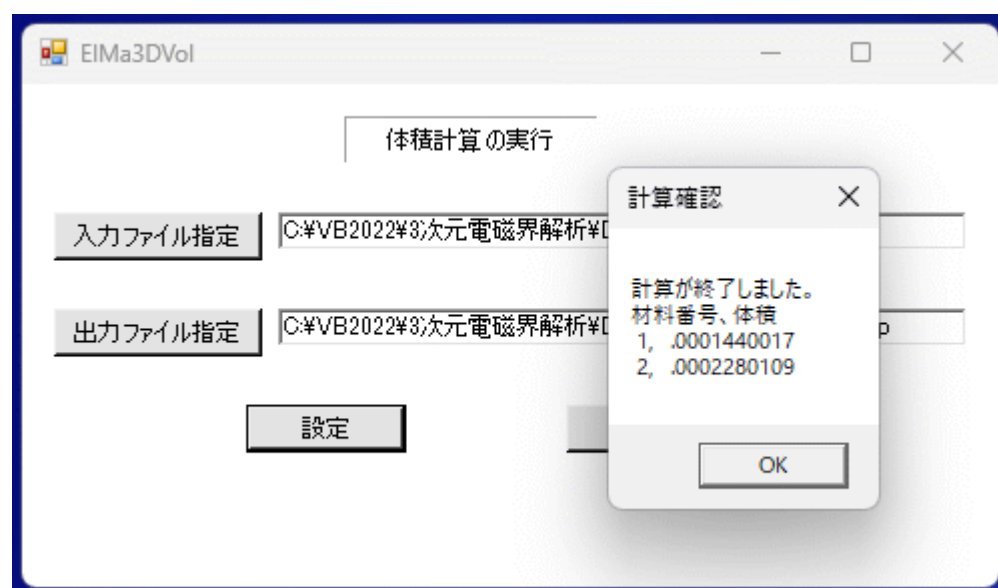


図5-11 体積計算の終了画面

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5-12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、体積が出力されています。
- ②材料数が2以上の場合のみ、合計が出力されます。

```

<<体積の計算結果>>
静電界モデル
[入力データファイル] , C:\¥VB2022¥3次元電磁界解析¥Data¥Elec3DModelA. dat
-----
材料番号、体積                                     ①
1,      .0001440017
2,      .0002280109
合計,    .0003720126                               ②
END

```

図5-12 体積計算の結果ファイルへの出力例（材料数が2の場合）

また、図5-13に材料数が1の場合の計算結果例を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重心の座標が出力されています。

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>>
静磁界モデル（電流なし）
[入力データファイル] , C:\¥VB2022¥3次元電磁界解析¥Data¥Mag3D1ModelA. dat
-----
材料番号、体積
1,      .0008880039
重心のX座標、Y座標、Z座標                               ①
.05000011,      .02527056,      .04000039
END

```

図5-13 体積計算の結果ファイルへの出力例（材料数が1の場合）

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、電磁界解析EleMag3D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。その先頭行には、図4-19のようにプログラム名の「EleMag3D」が入っていないといけません。もしプログラム名のない旧形式のものは、「データ」メニューの「ファイルへ保存」で保存し直してください。

◇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。

◇電磁界解析EleMag3D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5-14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5-15の終了画面になります。

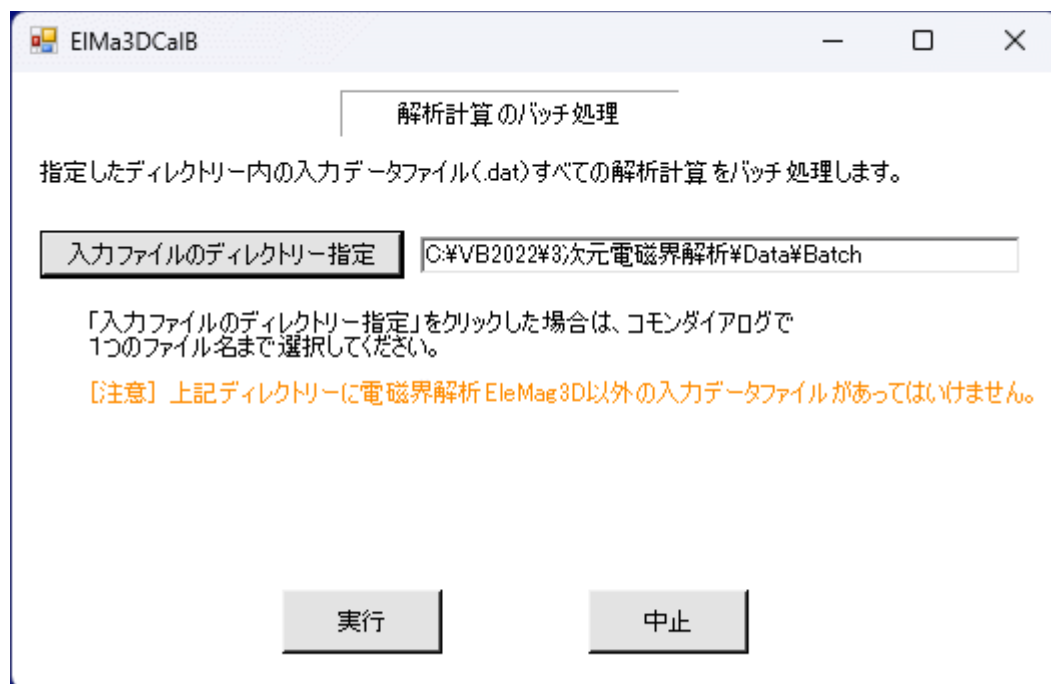


図5-14 バッチ処理の実行画面

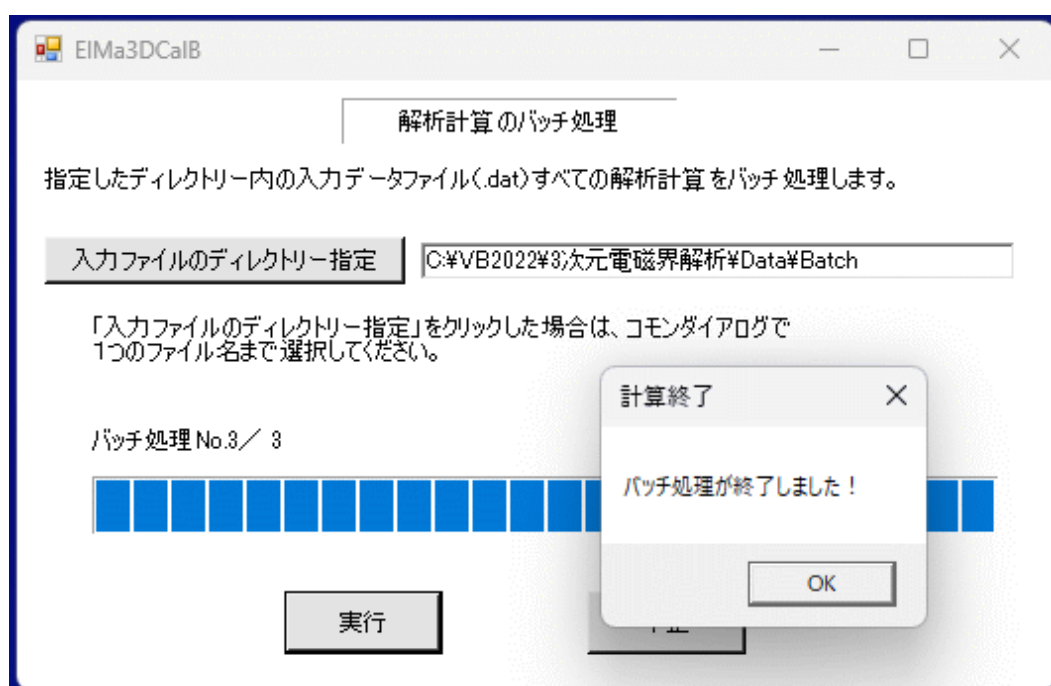


図5-15 バッチ処理の終了画面

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個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、「ベクトル図の作画（静解析）」は準定常電磁界解析（渦電流）には適用できません。

「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。

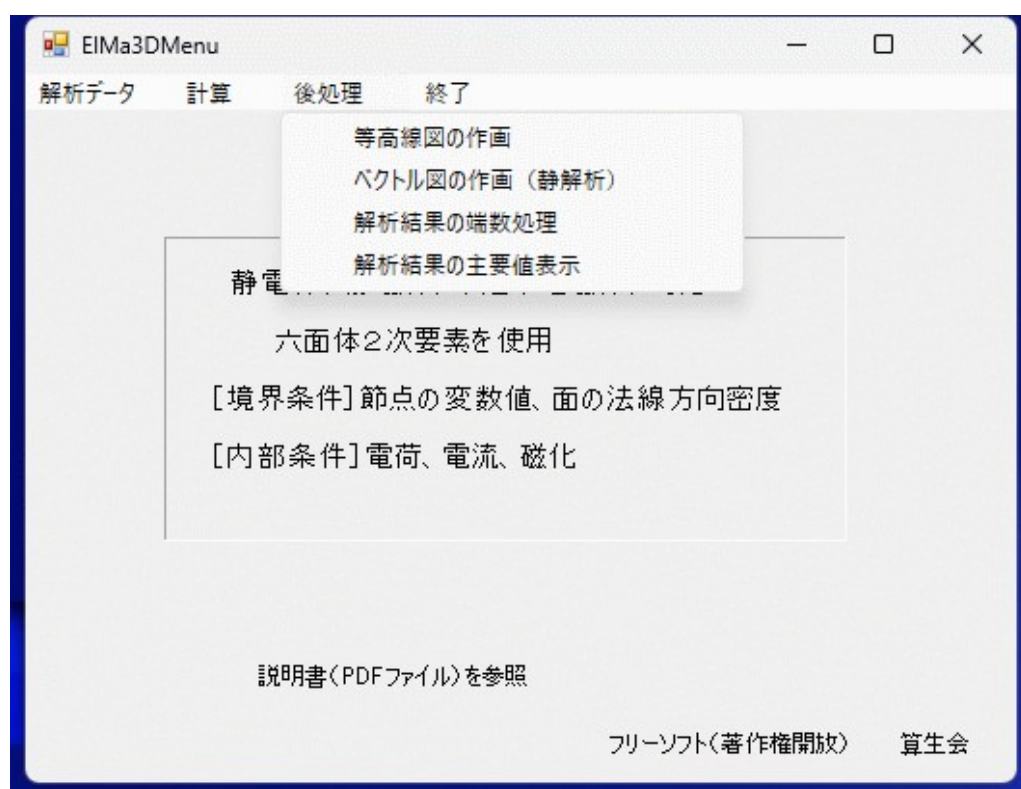


図6-1 「後処理」サブメニュー画面

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、各サブメニューにより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、ベクトル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。

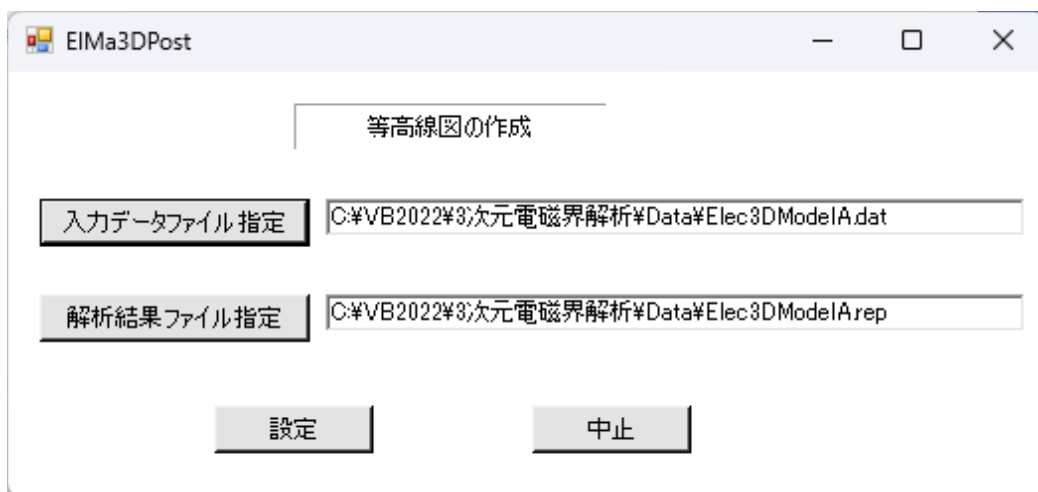


図6-2 使用ファイル設定画面

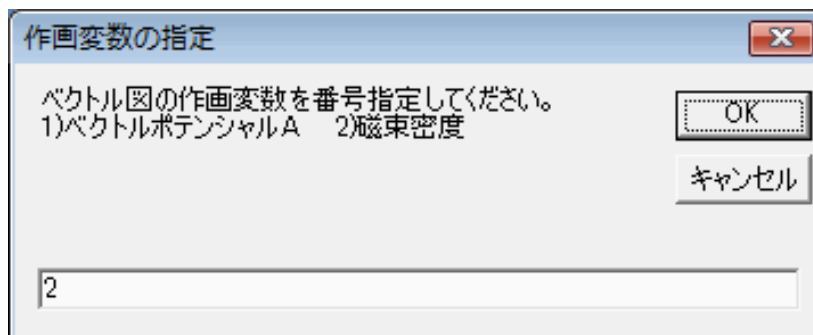


図6-3 ベクトル図の対象変数選択のコモンダイアログ
(静磁界（電流有り）)

6.3 等高線の指定画面

図6-4～7に解析種類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6-8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。

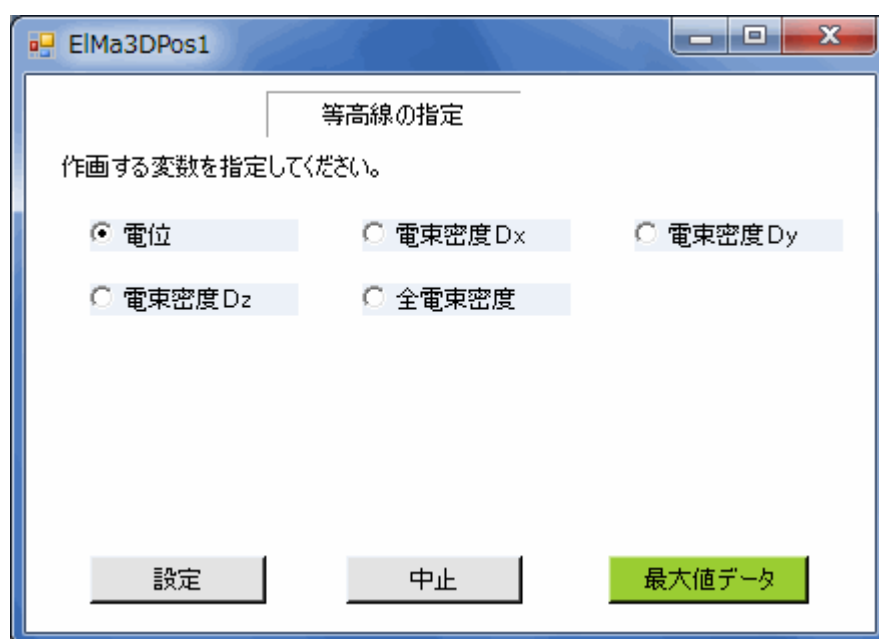


図6-4 等高線指定画面（静電界）

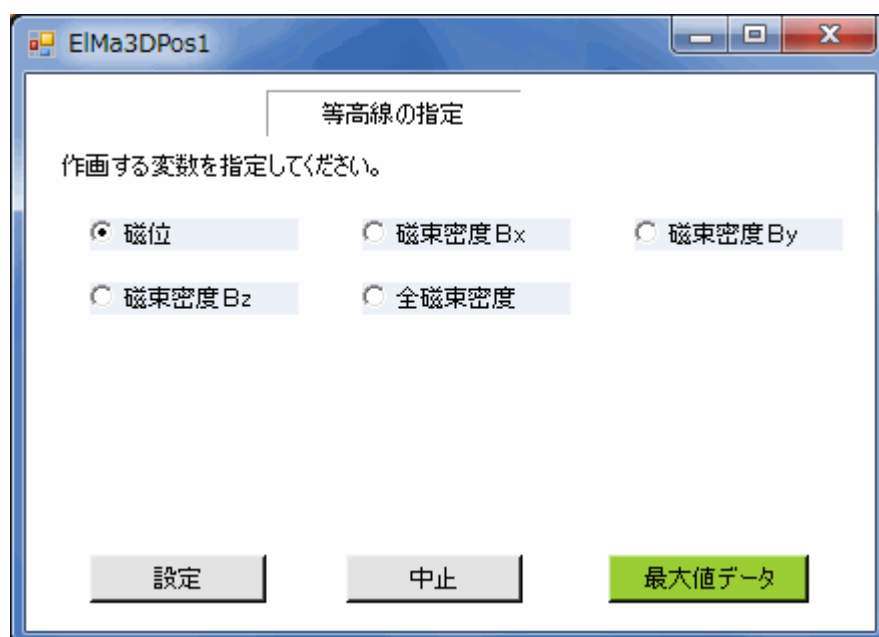


図6-5 等高線指定画面（静磁界（電流なし））

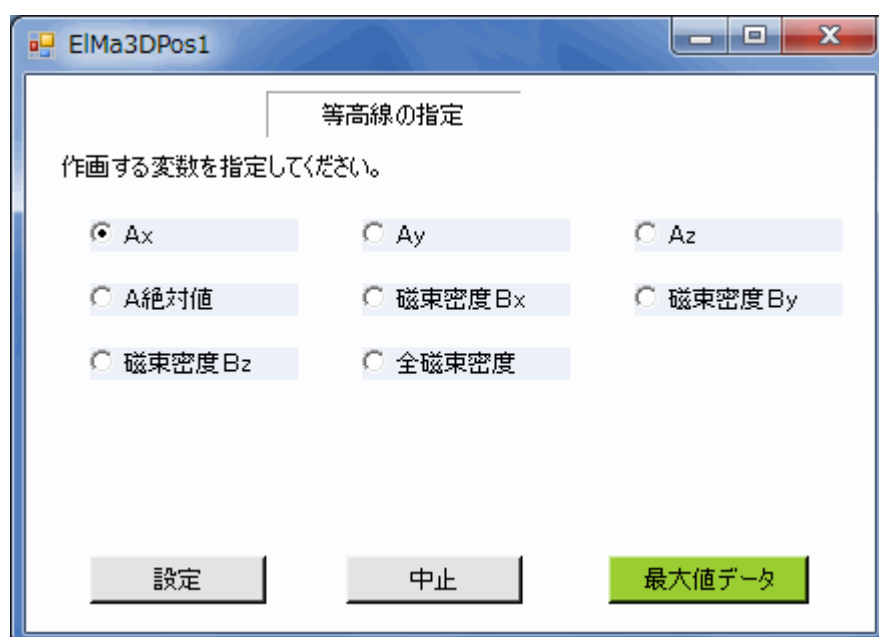


図6-6 等高線指定画面（静磁界（電流有り））

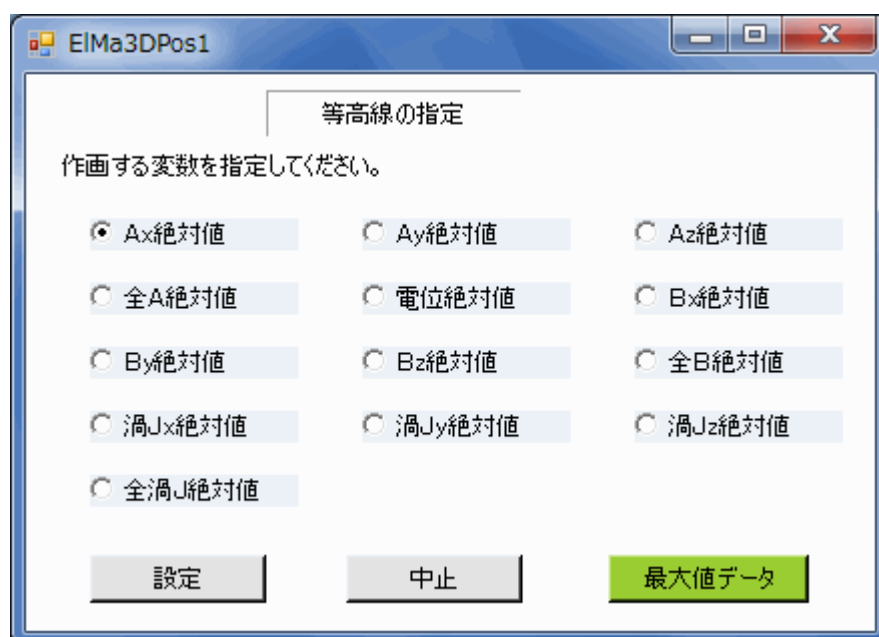


図6-7 等高線指定画面（準定常電磁界）

最大値データ		
注) 絶対値の最大。		
変数項目、	最大値、	節点番号
電位,	2,	180
電束密度 Dx,	2.979054E-09,	687
電束密度 Dy,	2.82359E-09,	847
電束密度 Dz,	-4.06556E-09,	672
全電束密度,	5.333955E-09,	673

図6-8 最大値データの表示例（静電界）

6.4 等高線図の仕様設定画面

図6-9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。
- 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。

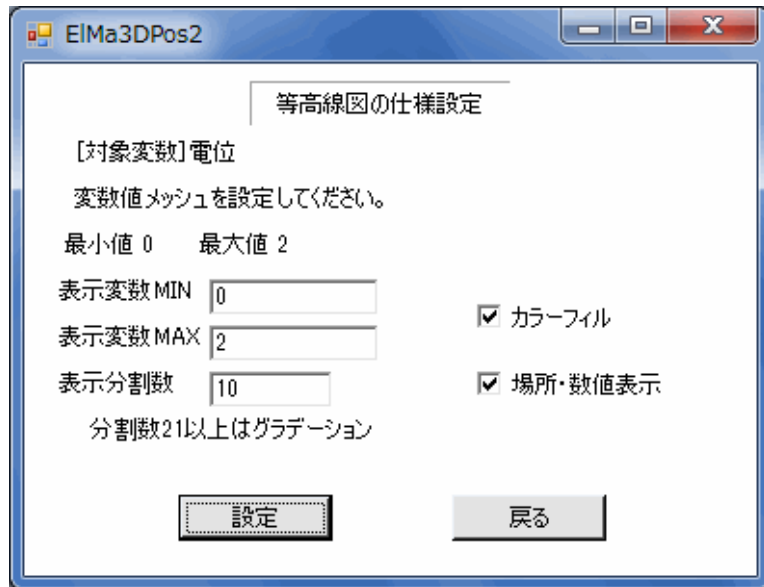


図6-9 等高線の仕様設定画面

6.5 等高線の作画画面

図6-10、図6-11に等高線の作画画面を示します。図6-10は通常の等高線で、図6-11はグラデーションかつ共通辺の表示有りの等高線図です。

- ①画面には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。

◇図6-11のグラデーションの場合は、4等分の5つの変数値が示されます。

- ②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6-12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。

- ③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、後述の「部分拡大モード」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。

- ④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。

- ⑤「標準・全画面切替」ボタンをクリックすると、標準画面と全画面を切り換えること

ができます。また、画面Formの右下コーナー等をマウ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、等高線図の一部分を拡大できます。操作方法是4.16節の構造図と同じです。

⑧繰り返して描画を実施した場合、「前の描画」ボタンをクリックすると1つずつ前の描画にさかのぼることができます。

◇さかのぼれる描画の数は最大8つです。

◇回転操作があっても無視され、初期の回転位置で描画されます。

⑨「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。操作方法是構造図の作画と同じです。

⑩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。

⑪本画面を終了するには、「戻る」ボタンをクリックして、仕様設定画面に戻ります。

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

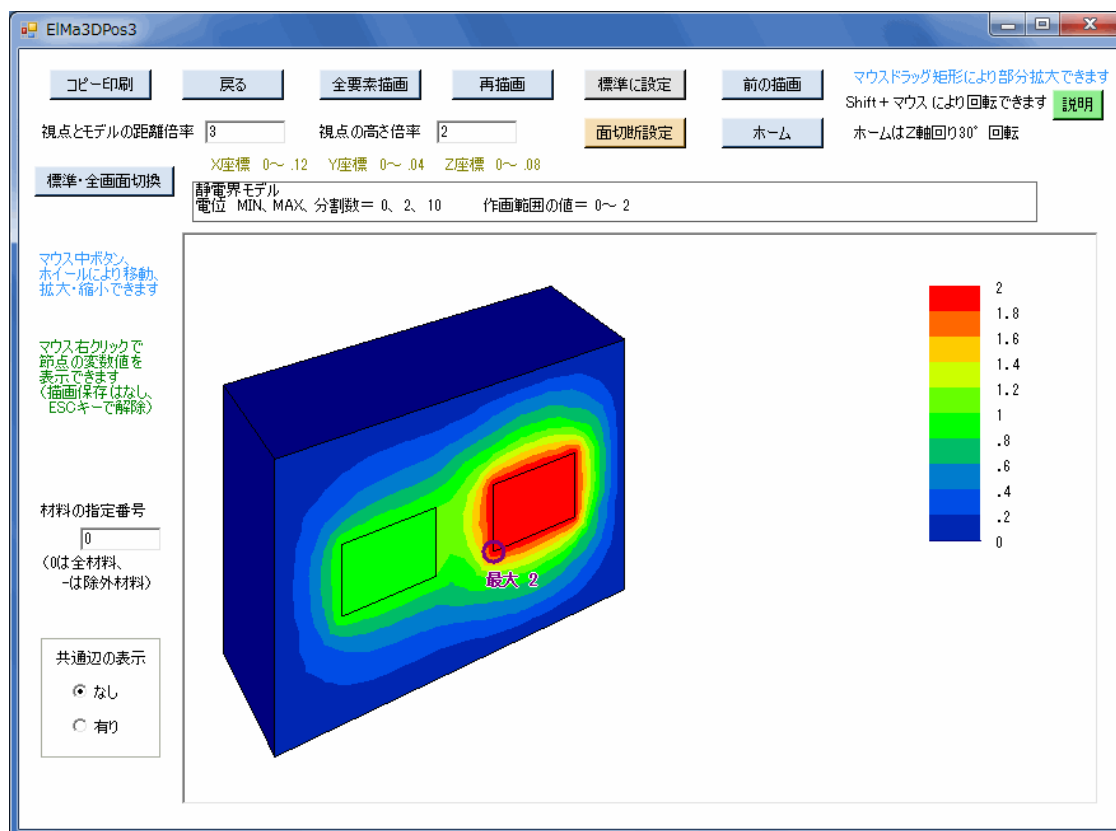


図6-10 等高線図の作画画面

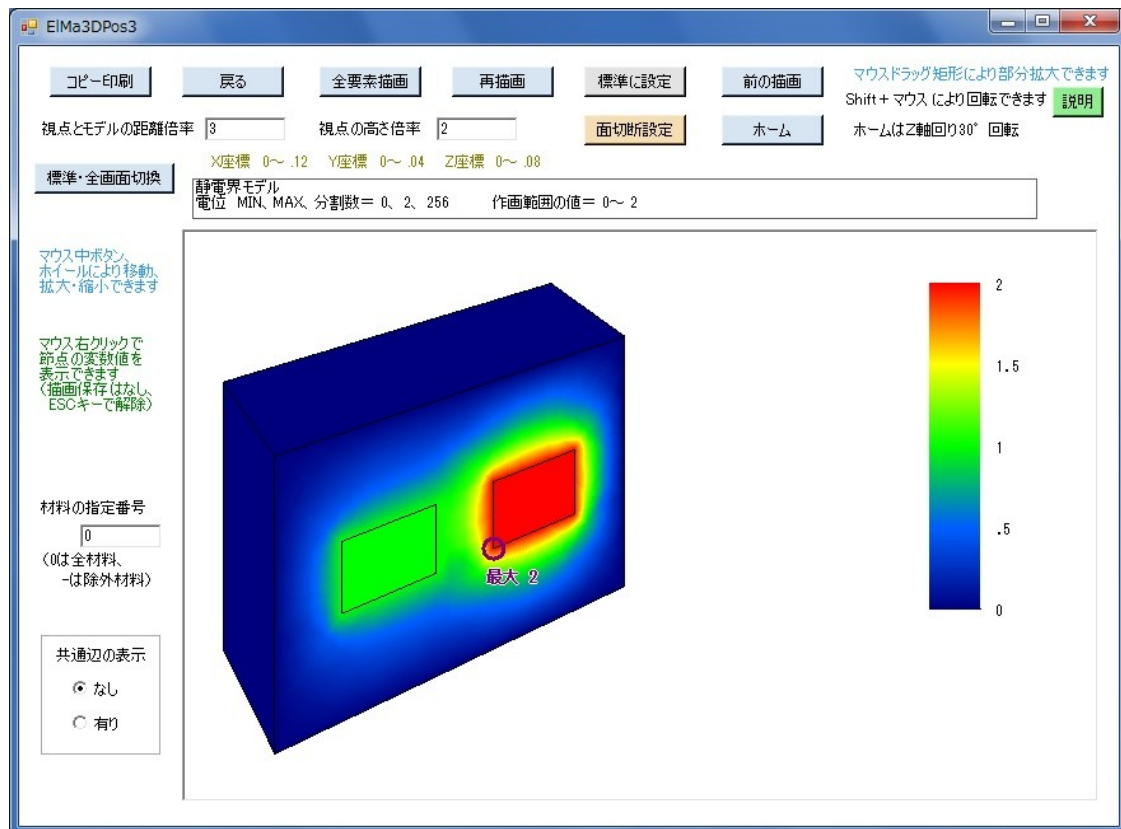


図6-11 等高線図の作画画面（グラデーション）

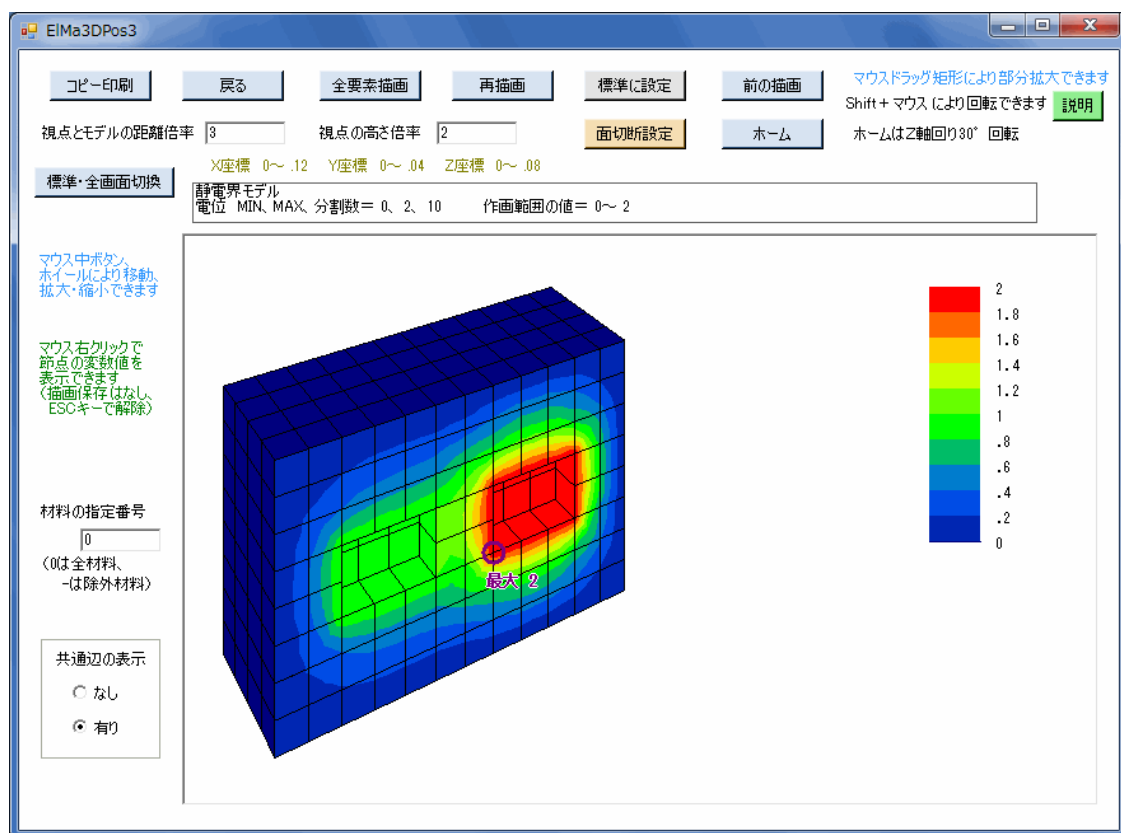
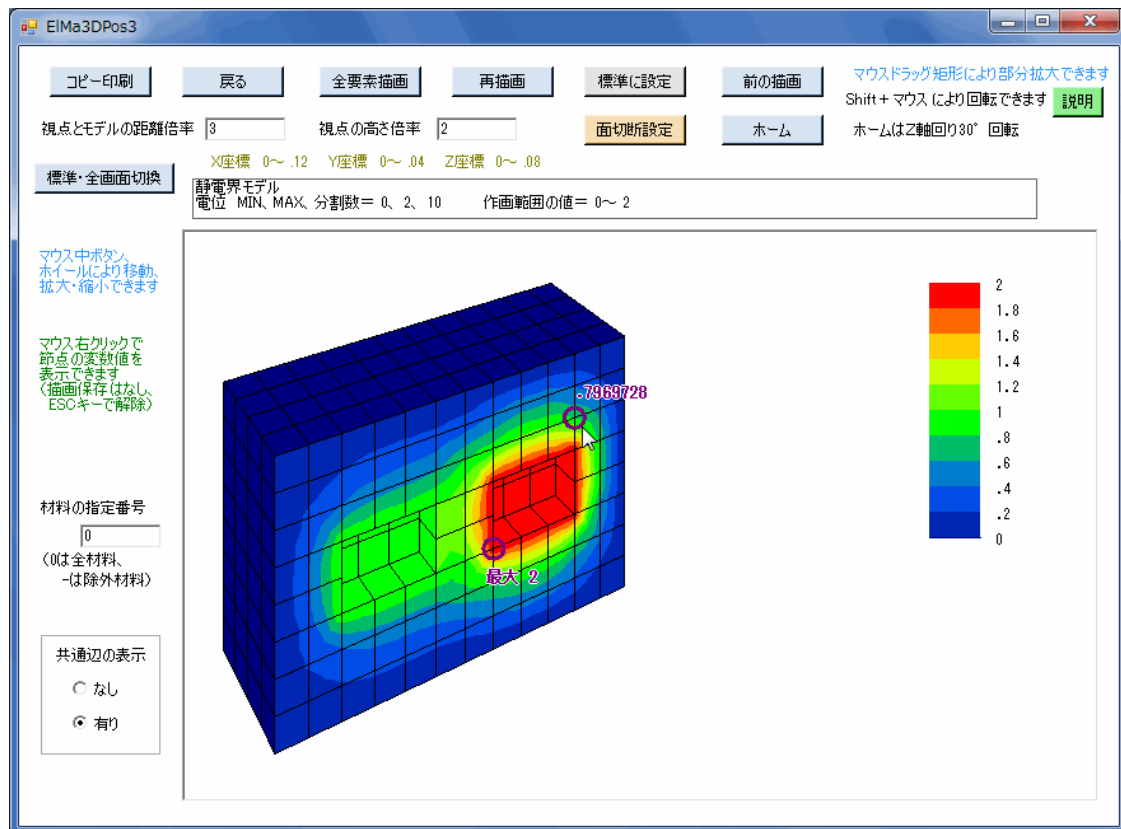
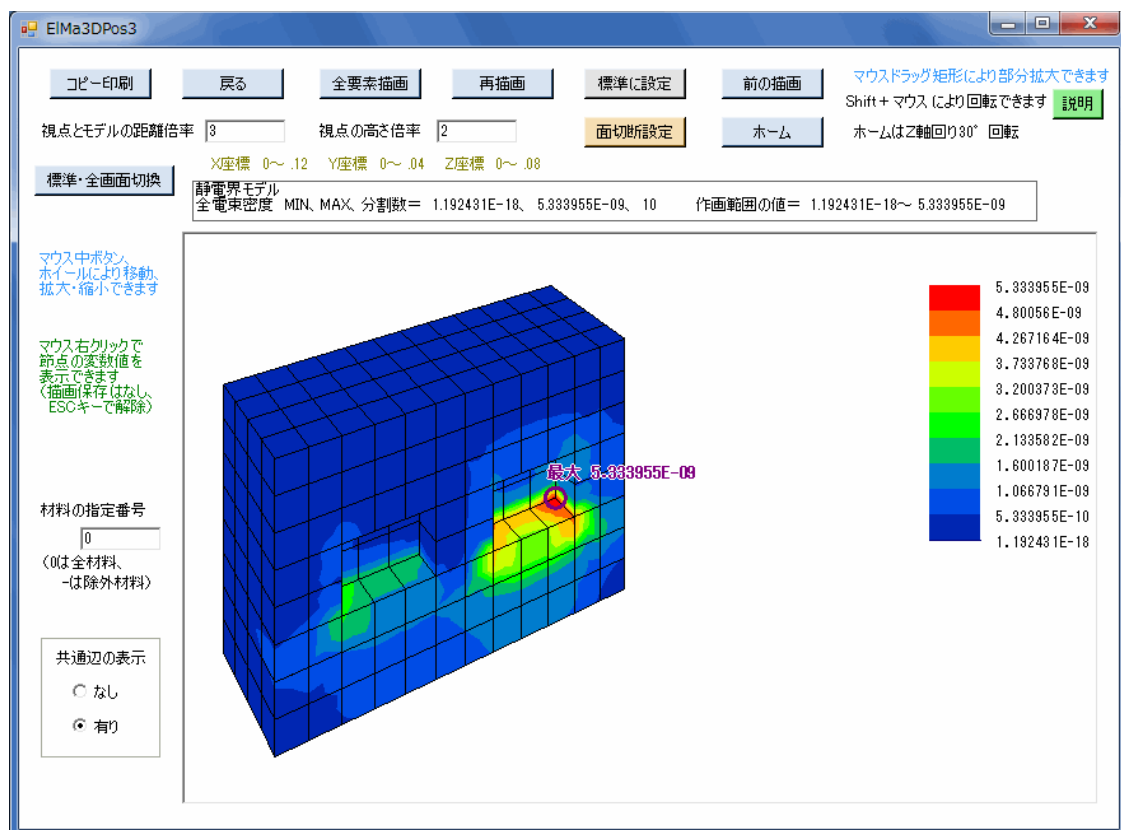


図6-12 等高線図の作画画面（共通辺の表示有り）



また、図6-14に例題の全電束密度の等高線の作画画面を示します。



6.6 ベクトル図の作画

図6-15にベクトル図の作画画面（静電界の電束密度ベクトル）を示します。解析種類によりベクトル変数が異なります。図6-15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、各節点における速度ベクトルが青色で表示されています。
- ②本画面の左側に、「ベクトルの長さ係数」、「ベクトルの矢印長さ係数」、「ベクトル線の幅」の3つのパラメーターを表示してあります。そ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。
 - ◇「ベクトルの長さ係数」と「矢印長さ係数」の標準値は1にしてあります。実際に作画させてみて適当な値を再設定できます。
 - ◇「ベクトル線の幅」は1～3が可能で、初期値は2にしてあります。
- ③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。
 - ◇ただし、番号表示はありません。他方、「共通辺の表示」が追加になっています。
 - ◇「共通辺の表示」は、「有り」か「なし」を選択できます。共通辺とは、要素どうしが共有する辺のことです。
 - 図6-16のように標準条件では共通辺の表示「有り」です。要素の区分線を表示したくないときは、共通辺の表示を「なし」にしてください。
 - ◇図6-16に図6-15の中央部分を拡大したベクトル図を示します。同図では、共通辺の表示を「なし」にしています。
 - ◇「隠面処理」は、「有り」か「なし」を選択できます。
 - 図6-16のように標準条件では隠面処理「有り」です。隠面処理を「なし」にすると、すべての節点の速度ベクトルが作画されますので、マウสดラッグ矩形により一部のみ領域選択して節点数が少ない状態で利用してください。
 - ◇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、「部分拡大モード」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。
 - ◇ベクトル図の「説明」ボタンをクリックすると、マウスによる回転操作（Shiftキー併用）の説明図が表示されます。
- ④マウス右クリックで任意の節点を選択すると、図6-17のように同節点のベクトル値が表示されます。
 - ◇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。
- ⑤「標準・全画面切替」ボタンをクリックすると、標準画面と全画面を切り換えることができます。また、画面Formの右下コーナー等をマウสดラッグすることにより、標準画面と全画面の間で自由に拡大・縮小できます。

- ⑥マウス中ボタン、ホイールにより移動、拡大・縮小を行なうことができます。中ボタンを押したまま動かせば図形を移動できます。また、ホイールの回転により拡大・縮小ができます。
- ⑦マウスドラッグ矩形により、ベクトル図の一部分を拡大できます。操作方法是4.16節の構造図と同じです。
- ⑧繰り返して描画を実施した場合、「前の描画」ボタンをクリックすると1つずつ前の描画にさかのぼることができます。
- ◇さかのぼれる描画の数は最大8つです。
- ◇回転操作があっても無視され、初期の回転位置で描画されます。
- ⑨「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。操作方法是構造図の作画と同じです。
- ⑩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。
- ⑪本画面を終了するには、「中止」ボタンをクリックします。

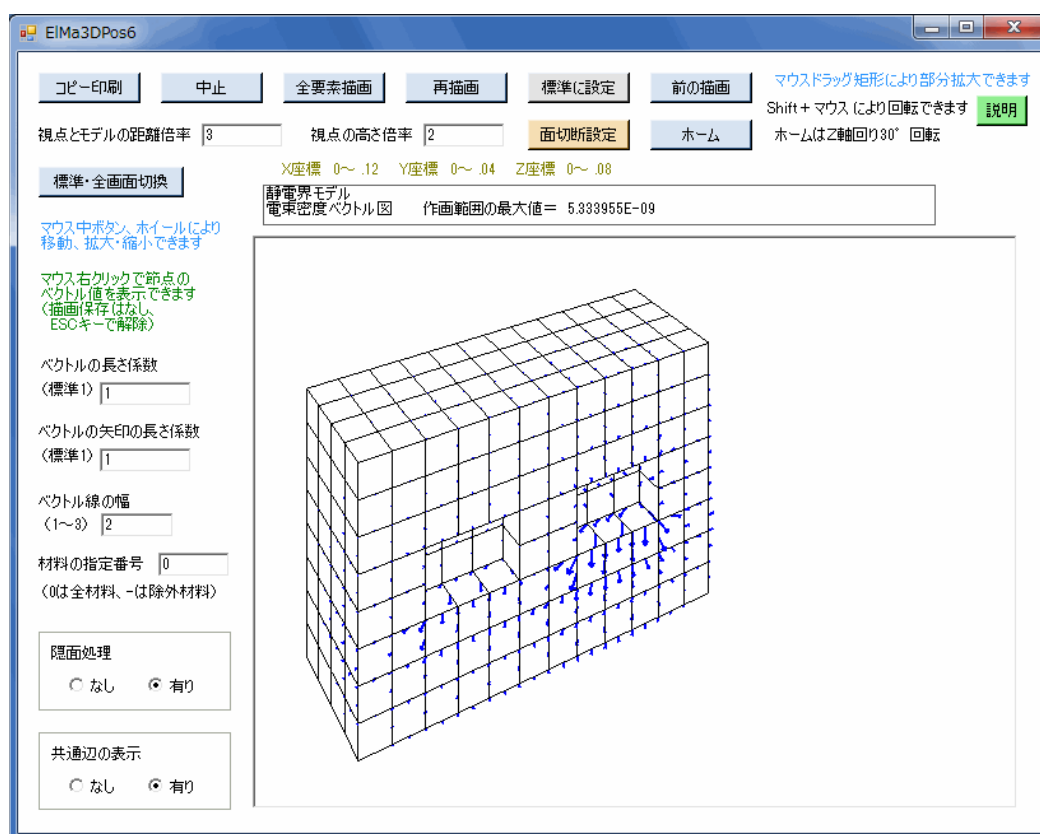


図6-15 ベクトル図の作画画面（静電界の電束密度ベクトル）

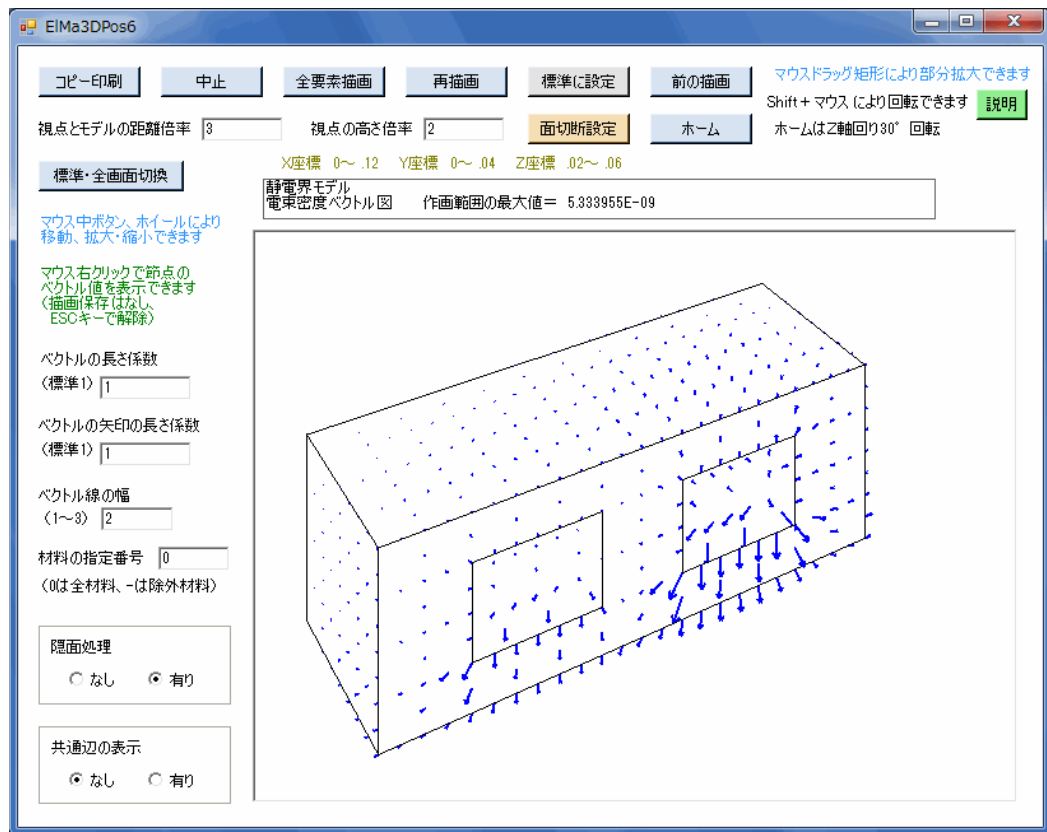


図6-16 中央部分の拡大ベクトル図（共通辺表示なし）

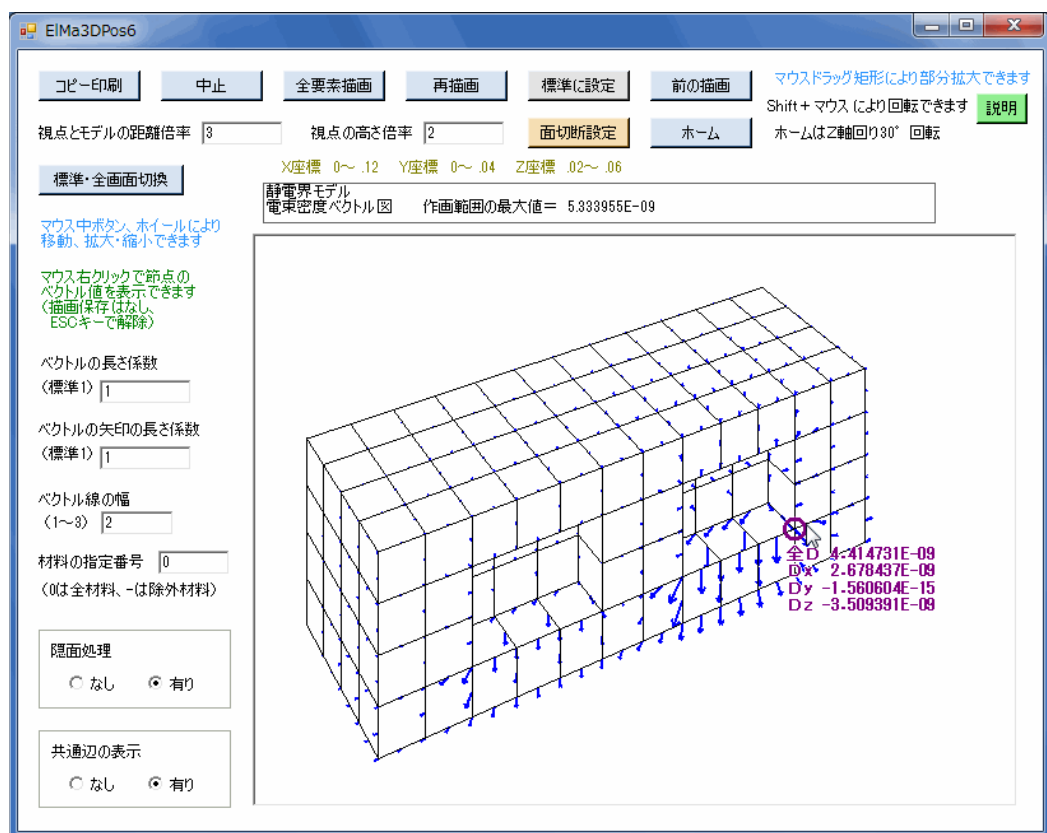


図6-17 ベクトル図の作画画面（マウス右クリックの節点のベクトル値表示）

6.7 解析結果の主要値表示

図6-18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。

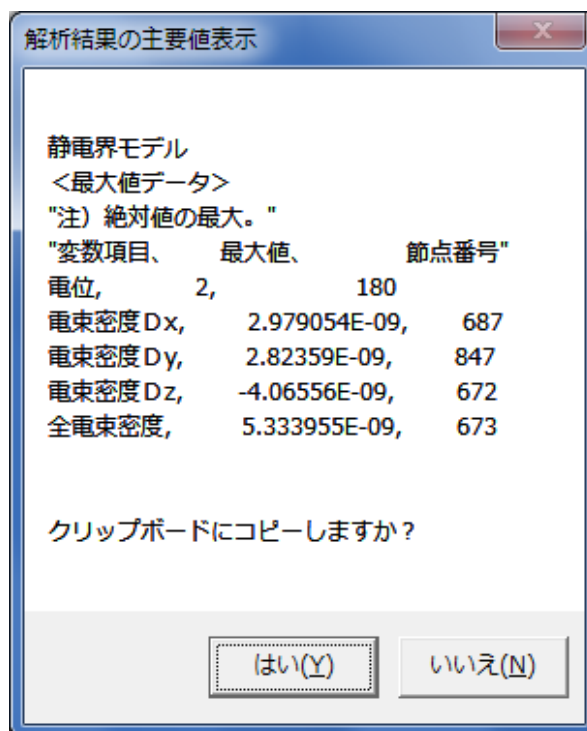


図6-18 解析結果の主要値表示の画面（静電界の場合）

第7章 静磁界（電流なし）の計算例

静磁界で電流なしの場合は、静電界の電位に相当する磁位（磁気スカラーポテンシャル）を計算します。その磁位を用いて磁束密度も算出されます。

7.1 構造モデル

図7-1にモデル図を示します。同図のように、領域の中央部に直方体の磁石があり、その両端面では $\pm 1\text{mT}$ （流出、流入）、4側面では $0.1\text{mT} \sim -0.1\text{mT}$ の線形変化の磁束密度です。この4側面の線形変化の磁束密度は、各要素面毎に平均磁束密度で近似します。また、直方体の磁石部分は穴となり、要素はありません。本構造は対称形状なので、半分だけの構造モデルをします。そして、対称面のXZ平面では磁位を非固定にします。

注）本構造は上下も対称なので、上下を2分割して1／4部分だけで解析することもできます。

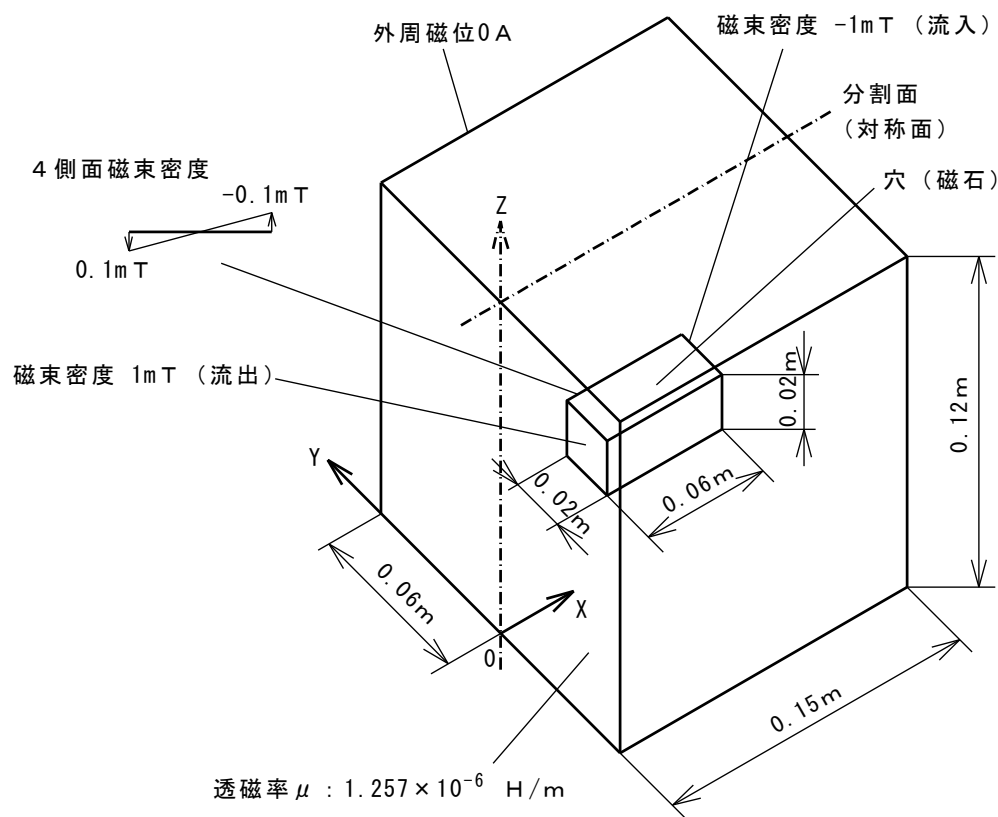


図7-1 静磁界（電流なし）計算例のモデル図

7.2 入力データ

構造図は第4章の図4-24に掲載してあります。また、図7-2に入力データファイルの内容を示します。

プログラム名, EleMag3D

要素種類 (0:六面体、1:四面体) , 0

静磁界モデル (電流なし)

解析種類 (1:静磁界(電流なし)), 1

境界の設定区分 (0:自動、1:非自動) , 0

節点数, 5039

要素数, 1052

材料データ数, 1

磁位固定・非固定の節点数, 0

磁位固定・非固定の面の数, 156

磁束固定境界の面の数, 64

ガウス積分点数, 3

1 節点当りの変数の数, 1

材料データの成分数, 1

要素データ (要素番号、材料番号、20節点番号)

1, 1, 1, 8, 12, 13, 14, 9, 3, 2, 289, 293
294, 290, 395, 402, 406, 407, 408, 403, 397, 396
2, 1, 3, 9, 14, 15, 16, 10, 5, 4, 290, 294
295, 291, 397, 403, 408, 409, 410, 404, 399, 398
3, 1, 5, 10, 16, 17, 18, 11, 7, 6, 291, 295
296, 292, 399, 404, 410, 411, 412, 405, 401, 400
4, 1, 12, 19, 23, 24, 25, 20, 14, 13, 293, 297
298, 294, 406, 413, 417, 418, 419, 414, 408, 407
.
.
1051, 1, 4843, 4844, 4840, 4853, 3888, 3896, 3897, 4854, 4899, 4898
3997, 4000, 5028, 5029, 5025, 5038, 4286, 4294, 4295, 5039
1052, 1, 3223, 4845, 4843, 4854, 3897, 3901, 3255, 3256, 3311, 4899
4000, 3322, 3470, 5030, 5028, 5039, 4295, 4299, 3502, 3503

節点データ (節点番号、X座標、Y座標、Z座標)

1, 0, 0, 0
2, 0, 0, .005
3, 0, 0, .01
4, 0, 0, .015
5, 0, 0, .02
6, 0, 0, .025
7, 0, 0, .03
8, .005, 0, 0
9, .005, 0, .01
10, .005, 0, .02
.
.

図7-2 (1/2) 静磁界 (電流なし) 計算例の入力データファイル

5035,	.05,	.04375,	.09999999
5036,	.06499998,	.04375,	.09999999
5037,	.07999999,	.04375,	.09999999
5038,	.09499998,	.04375,	.09999999
5039,	.11,	.04375,	.09999999

各材料の透磁率区分数（材料番号、区分数）				
1,	0			
各材料の透磁率データ				
材料番号, 1				
区分番号、磁束密度、透磁率				
0,	0,	1.257E-06		

<磁位固定・非固定の面>				
No.、要素番号、面番号、磁位拘束、磁位値				
1,	1,	1,	0,	0
2,	2,	1,	0,	0
3,	3,	1,	0,	0
4,	4,	1,	0,	0
5,	5,	1,	0,	0
.....				
.....				
154,	1010,	3,	0,	0
155,	1011,	3,	0,	0
156,	1012,	3,	0,	0

磁束密度境界（境界番号、要素番号、面番号、磁束密度 q（単位面積当り））				
1,	32,	5,	.001	
2,	34,	5,	.001	
3,	36,	5,	.001	
4,	38,	5,	.001	
5,	39,	6,	-.001	
.....				
.....				
62,	212,	1,	-8.33E-05	
63,	213,	1,	-8.33E-05	
64,	214,	1,	-8.33E-05	

図7-2（2/2） 静磁界（電流なし）計算例の入力データファイル

7.3 計算結果データ

図7-3に計算結果データファイルの内容を示します。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）は、それぞれ4098、3732、103551です。
- ②最大の磁位は、節点153における6.979087 Aです。
- ③最大の磁束密度は、節点549における0.001074 Tです。
- ④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。
- ⑤計算時間は2sです（反復法、前処理なし）。

7.4 等高線図

図4-5、図7-5に磁位、全磁束密度の等高線図（カラーフィル有り）を示します。

7.5 ベクトル図

図7-6に中心部分の磁束密度ベクトル図を示します。

<< 3次元電磁界解析の計算結果 >>

静磁界モデル（電流なし）

[入力データファイル] , C:\¥VB2022¥3次元電磁界解析¥Data¥Mag3D1ModelA. dat

[解析種類] 静磁界（電流なし）

*** 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）

4098, 3732, 103551

①

** 節点の計算出力 **

<節点番号、磁位、磁束密度Bx、磁束密度By、磁束密度Bz、全磁束密度>

1,	-.1983282,	8.693201E-06,	-4.665976E-08,	1.620606E-05,	1.83905E-05
2,	-.2716147,	1.262218E-05,	-4.739957E-08,	2.038166E-05,	2.39736E-05
3,	-.3607053,	1.852518E-05,	-2.113526E-07,	2.509948E-05,	3.119632E-05
4,	-.4730984,	2.695604E-05,	-6.181063E-08,	3.054535E-05,	4.073881E-05
5,	-.6041932,	4.050378E-05,	-1.699985E-07,	3.683129E-05,	5.474604E-05
6,	-.7525885,	5.602403E-05,	-1.467337E-06,	3.601206E-05,	6.661616E-05
7,	-.8913924,	7.385251E-05,	-1.963032E-06,	4.058707E-05,	8.429328E-05
8,	-.2291273,	6.647588E-06,	-8.76623E-08,	1.937683E-05,	2.04856E-05
9,	-.4331811,	1.663125E-05,	-2.138882E-07,	3.100038E-05,	3.51805E-05
10,	-.7748786,	4.186246E-05,	-9.560779E-07,	5.70956E-05,	7.080457E-05

.....

152,	6.896775,	.0009491744,	-3.73661E-05,	-.000118292,	.0009572467
153,	6.979087,	.0009242551,	-3.551181E-05,	1.612712E-10,	.0009249371
154,	6.896775,	.0009491745,	-3.736611E-05,	.0001182917,	.0009572468

②

.....

548,	6.449833,	.0009782545,	.0003437917,	.0001016975,	.001041881
549,	6.103156,	.0009830948,	.0003063521,	.0003058597,	.001074187
550,	4.998558,	.0006388592,	.0002559959,	.000745982,	.00101497

③

.....

5035,	0,	-6.370043E-09,	-2.932337E-15,	9.418303E-13,	6.370043E-09
5036,	0,	-6.043246E-09,	-4.543337E-10,	1.349043E-06,	1.349056E-06
5037,	0,	-4.736406E-09,	5.347027E-10,	2.075256E-06,	2.075261E-06
5038,	0,	-2.093976E-09,	3.033222E-09,	1.865485E-06,	1.865489E-06
5039,	0,	8.107204E-10,	5.836321E-09,	9.391425E-07,	9.39161E-07

<最大値データ>

④

注) 絶対値の最大。

変数項目、	最大値、	節点番号
磁位,	-6.979087,	133
磁束密度Bx,	.0009830948,	549
磁束密度By,	-.0007945278,	732
磁束密度Bz,	-.0007936941,	150
全磁束密度,	.001074187,	549
END	0h 0min 2s	5375MB free

⑤

図7-3 静磁界（電流なし）計算例の計算結果データファイル

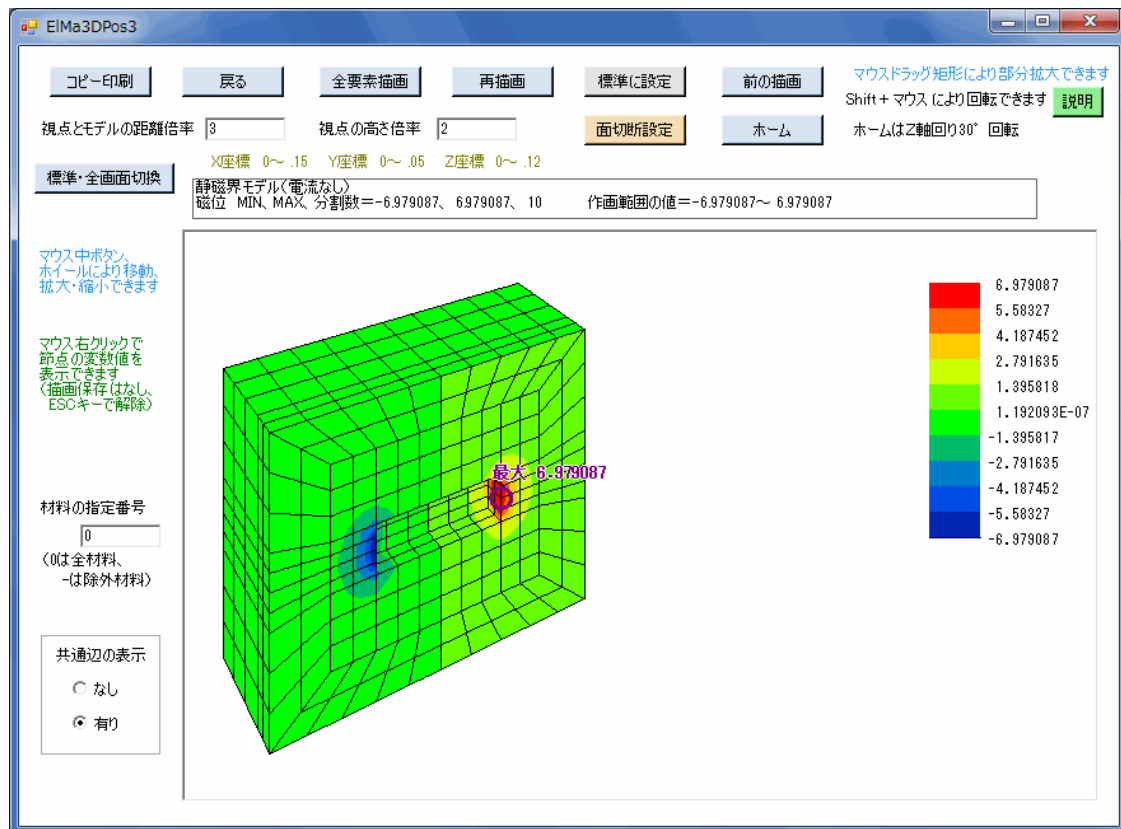


図7-4 静磁界（電流なし）計算例の磁位の等高線図

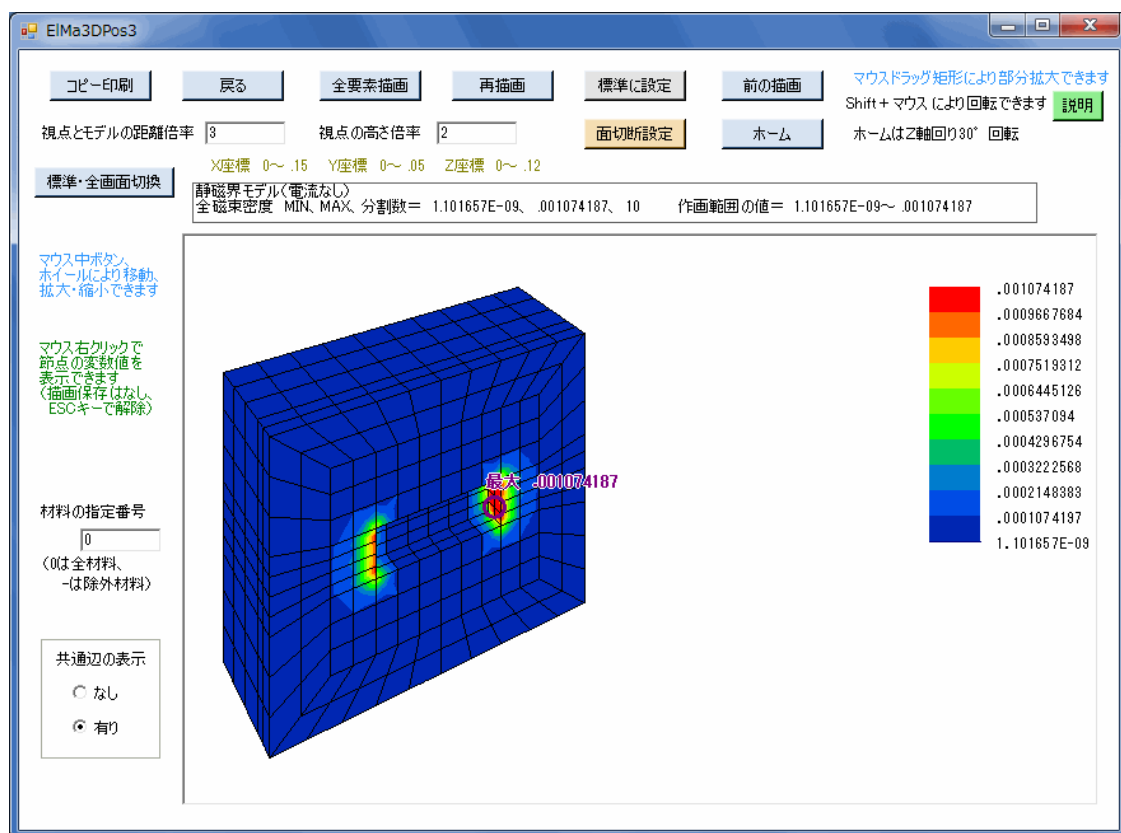


図7-5 静磁界（電流なし）計算例の全磁束密度の等高線図

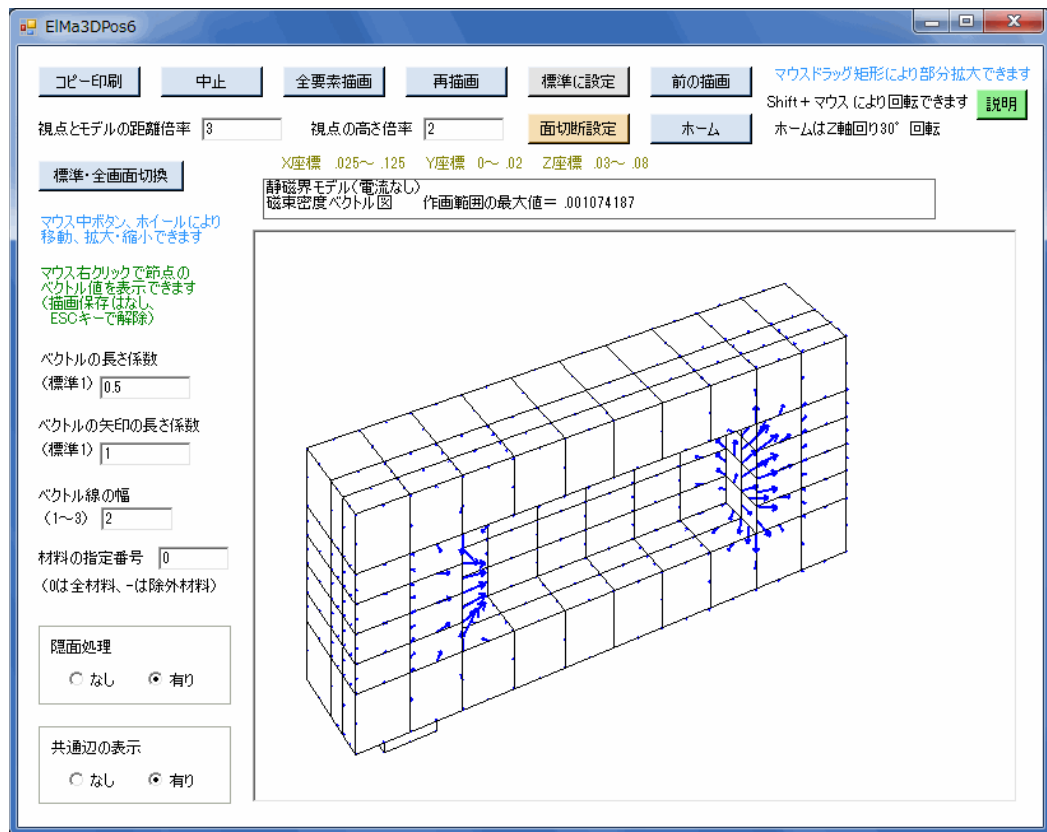


図7-6 静磁界（電流なし）計算例の磁束密度ベクトル図（中心部分）

第8章 静磁界（電流有り）の計算例

静磁界で電流有りの場合は、磁気ベクトルポテンシャルを計算します。その磁気ベクトルポテンシャルを用いて磁束密度も算出されます。

8.1 構造モデル

図8-1にモデル図を示します。同図のように、中央部のリング状コイルと周囲の鉄心とから成ります。X軸、Y軸に関して対称なので、XY座標第1象限の1／4部分を使用します。コイルには周方向電流200 Aが流れ、その電流密度Jを材料物性データとして与えます。また、鉄心の透磁率は、図示のグラフのように多区分変化をします。

対称面のXZ平面では、 A_x 、 A_z を0固定、 A_y を非固定にし、同様に対称面のYZ平面では、 A_y 、 A_z を0固定、 A_x を非固定にします。

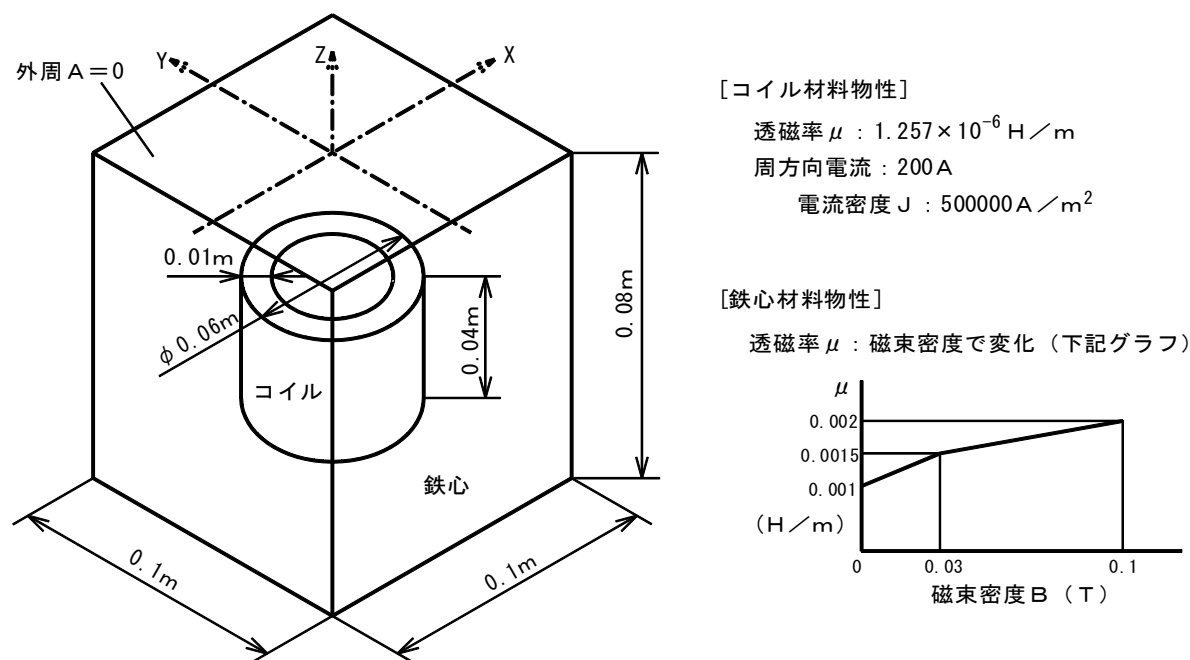


図8-1 静磁界（電流有り）計算例のモデル図

8.2 入力データ

図8-2に構造図の画面、図8-3に入力データファイルの内容を示します。

8.3 計算結果データ

図8-4に計算結果データファイルの内容を示します。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繰返し計算の条件が示されています。
- 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）は、それぞれ17181、1662、433014です。
- ③繰返し計算回数は4回です。

- ④出力1では、各節点の磁気ベクトルポテンシャルAを出力しています。
- ⑤出力2では、各節点の磁束密度を出力しています。
- ⑥電流部が受けるローレンツ力が出力されています。
- ⑦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。
- ⑧計算時間は15sです（反復法、前処理なし）。

8.4 等高線図

図8-5、図8-6に磁気ベクトルポテンシャルA絶対値、全磁束密度の等高線図（カラーフィル有り）を示します。

8.5 ベクトル図

図8-7に磁束密度ベクトル図を示します。

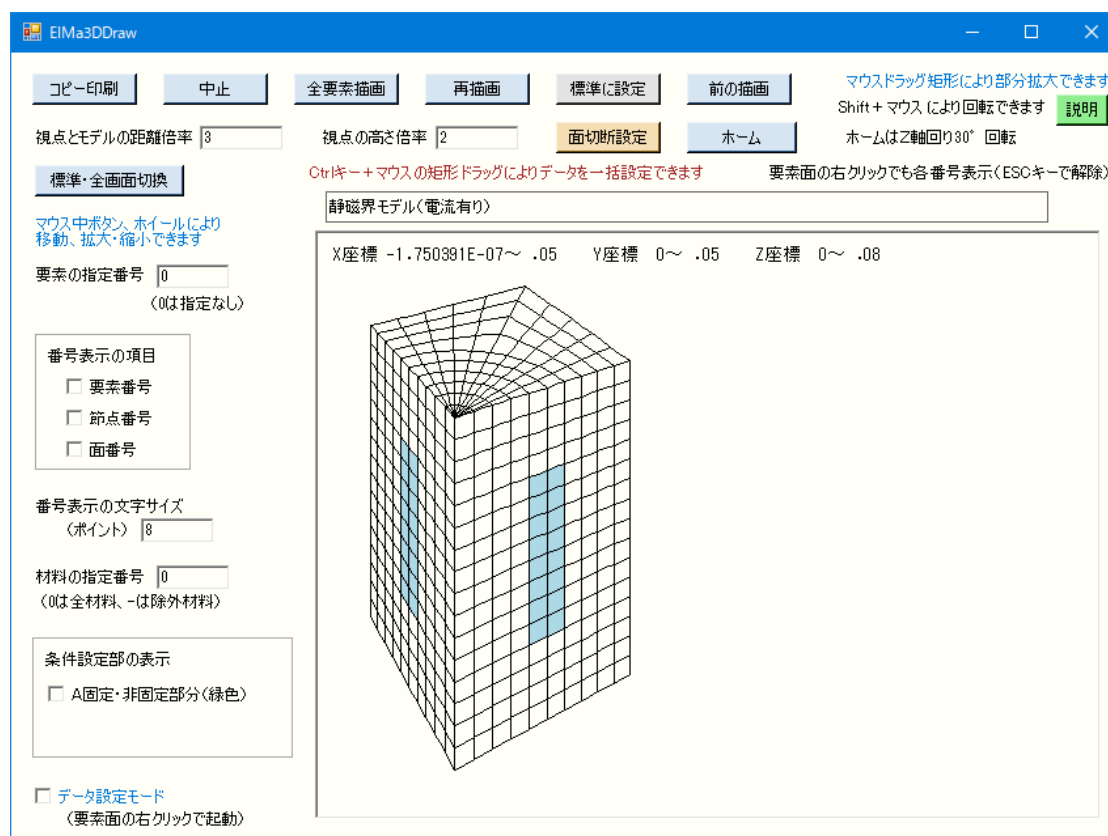


図8-2 静磁界（電流有り）計算例の構造図

```

プログラム名, EleMag3D
要素種類 (0:六面体、1:四面体) , 0
静磁界モデル (電流有り)
解析種類 (2:静磁界(電流有り)), 2
境界の設定区分 (0:自動、1:非自動) , 0
節点数, 7483
要素数, 1600
材料データ数, 2
A固定・非固定の節点数, 0
A固定・非固定の面の数, 320
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, 4
-----
要素データ (要素番号、材料番号、20節点番号)
1, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 7, 6, 4, 332, 333
   335, 334, 448, 449, 450, 452, 455, 454, 453, 451
2, 1, 3, 9, 10, 11, 13, 12, 8, 5, 333, 336
   337, 335, 450, 456, 457, 458, 460, 459, 455, 452
3, 1, 10, 14, 15, 16, 18, 17, 13, 11, 336, 338
   339, 337, 457, 461, 462, 463, 465, 464, 460, 458
4, 1, 15, 19, 20, 21, 23, 22, 18, 16, 338, 340
   341, 339, 462, 466, 467, 468, 470, 469, 465, 463
. . . . .
. . . . .
1599, 1, 7018, 7020, 7021, 7031, 7033, 7032, 7030, 7028, 7146, 7147
   7151, 7150, 7465, 7467, 7468, 7478, 7480, 7479, 7477, 7475
1600, 1, 7021, 7023, 7024, 7034, 7036, 7035, 7033, 7031, 7147, 7148
   7152, 7151, 7468, 7470, 7471, 7481, 7483, 7482, 7480, 7478
-----
節点データ (節点番号、X座標、Y座標、Z座標)
1, 0, 0, .08
2, .0025, 0, .08
3, .005, 0, .08
4, .00123461, .0001955435, .08
5, .004969221, .000391087, .08
6, .002469221, .000391087, .08
7, .003703831, .0005866305, .08
8, .004938441, .0007821741, .08
9, .0075, 0, .08
10, .01, 0, .08
. . . . .
. . . . .

```

図8-3 (1/2) 静磁界 (電流有り) 計算例の入力データファイル

7479,	-1.093994E-07,	.0425,	0
7480,	-1.312793E-07,	.045,	0
7481,	.003959442,	.05,	0
7482,	-1.531592E-07,	.0475,	0
7483,	-1.750391E-07,	.05,	0

各材料の透磁率区分数（材料番号、区分数）			
1,	2		
2,	0		
各材料の透磁率データ			
材料番号, 1			
区分番号、磁束密度、透磁率			
0,	0,	.001	
1,	.03,	.0015	
2,	.1,	.002	
材料番号, 2			
区分番号、磁束密度、透磁率			
0,	0,	1.257E-06	

各材料の物性データ			
材料番号, 1			
定義区分（0: J・座標軸方向、1: J・対面方向、2: M・座標軸方向、3: M・対面方向）, 0			
電流密度 Jx、Jy、Jz			
0,	0,	0	
材料番号, 2			
定義区分（0: J・座標軸方向、1: J・対面方向、2: M・座標軸方向、3: M・対面方向）, 1			
要素面番号、電流密度 J、ダミー			
3,	500000,	0	

< A 固定・非固定の面 >			
No.、要素番号、面番号、Ax拘束、Ax値、Ay拘束、Ay値、Az拘束、Az値			
1,	1,	3,	1, 0, 0, 0, 1, 0
2,	2,	3,	1, 0, 0, 0, 1, 0
3,	3,	3,	1, 0, 0, 0, 1, 0
4,	4,	3,	1, 0, 0, 0, 1, 0
5,	5,	3,	1, 0, 0, 0, 1, 0
.....			
.....			
318,	1598,	4,	0, 0, 1, 0, 1, 0
319,	1599,	4,	0, 0, 1, 0, 1, 0
320,	1600,	4,	0, 0, 1, 0, 1, 0

図8-3（2/2） 静磁界（電流有り）計算例の入力データファイル

<< 3次元電磁界解析の計算結果 >>					
静磁界モデル（電流有り）					
[入力データファイル] , C:\¥VB2022¥3次元電磁界解析¥Data¥Mag3D2ModelA. dat					
[解析種類] 静磁界（電流有り）					
最大繰返し計算回数, 20					①
収束基準誤差率, .005					
環境材料番号, 1					

*** 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）					②
17181, 1662, 433014					

繰返し計算回数, 4					③
** 節点の計算出力 **					
出力 1					④
<節点番号、Ax、Ay、Az、全A>					
1, 0, 0, 0, 0					
2, 0, 0, 0, 0					
3, 0, 0, 0, 0					
.....					
.....					
3681, -.0002692981, .0002692973, 0, .0003808444					
3682, -.0002703733, .0002703727, 0, .0003823652					
3683, -.0002494902, .0002921105, 0, .0003841535					
3684, -.0002712917, .000271291, 0, .0003836639					
3685, -.0002716252, .0002716244, 0, .0003841355					
.....					
.....					
7481, 0, 0, 0, 0					
7482, 0, 0, 0, 0					
7483, 0, 0, 0, 0					

出力 2					⑤
<節点番号、磁束密度Bx、磁束密度By、磁束密度Bz、全磁束密度>					
1, -6.144296E-09, -6.144304E-09, -8.774762E-10, 8.733545E-09					
2, .001425514, -1.225312E-10, 2.105781E-08, .001425514					
3, .002849214, -1.419531E-09, -2.936504E-08, .002849214					
4, .0007040931, .0001115177, -3.190254E-08, .0007128697					
5, .002831762, .0002229765, -2.25357E-08, .002840528					
.....					
.....					
7479, 2.438037E-10, -.003761552, 1.959619E-08, .003761552					
7480, 1.222496E-09, -.002493516, -9.893051E-09, .002493516					
7481, 8.639569E-11, 9.038327E-10, -1.57369E-08, 1.576307E-08					
7482, 8.646427E-11, -.00124117, 1.352379E-08, .00124117					
7483, 7.115487E-10, 6.687237E-09, -4.533524E-09, 8.110381E-09					

** 電流部が受けるローレンツ力 **					⑥
<材料番号、Fx、Fy、Fz、Fall（絶対値）>					
2, -.08851036, -.141526, .2838376, .3292832					

図8-4（1/2） 静磁界（電流有り）計算例の計算結果データファイル

＊ ＊ 磁性体が受ける磁気力 ＊ ＊

<材料番号、Fmx、Fmy、Fmz、Fmall（絶対値）>

<最大値データ>

注）絶対値の最大。

変数項目、	最大値、	節点番号
Ax,	-.0003841198,	3779
Ay,	.0003841202,	3606
Az,	0,	0
全A,	.0003841535,	3683
磁束密度Bx,	.03837669,	1685
磁束密度By,	.03837674,	1744
磁束密度Bz,	.04743169,	5560
全磁束密度,	.05047677,	1984

END 0h 0min 15s 5450MB free

⑦

⑧

図8-4 (2/2) 静磁界（電流有り）計算例の計算結果データファイル

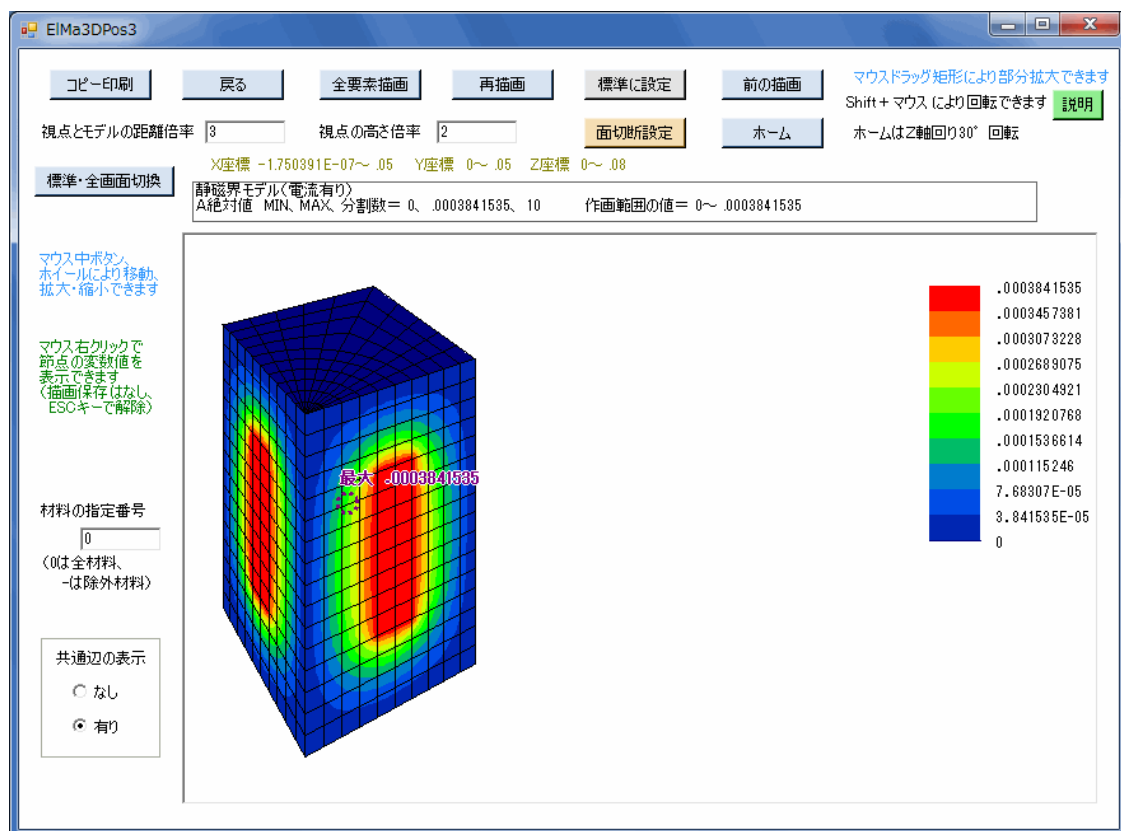


図8-5 静磁界（電流有り）計算例の全Aの等高線図

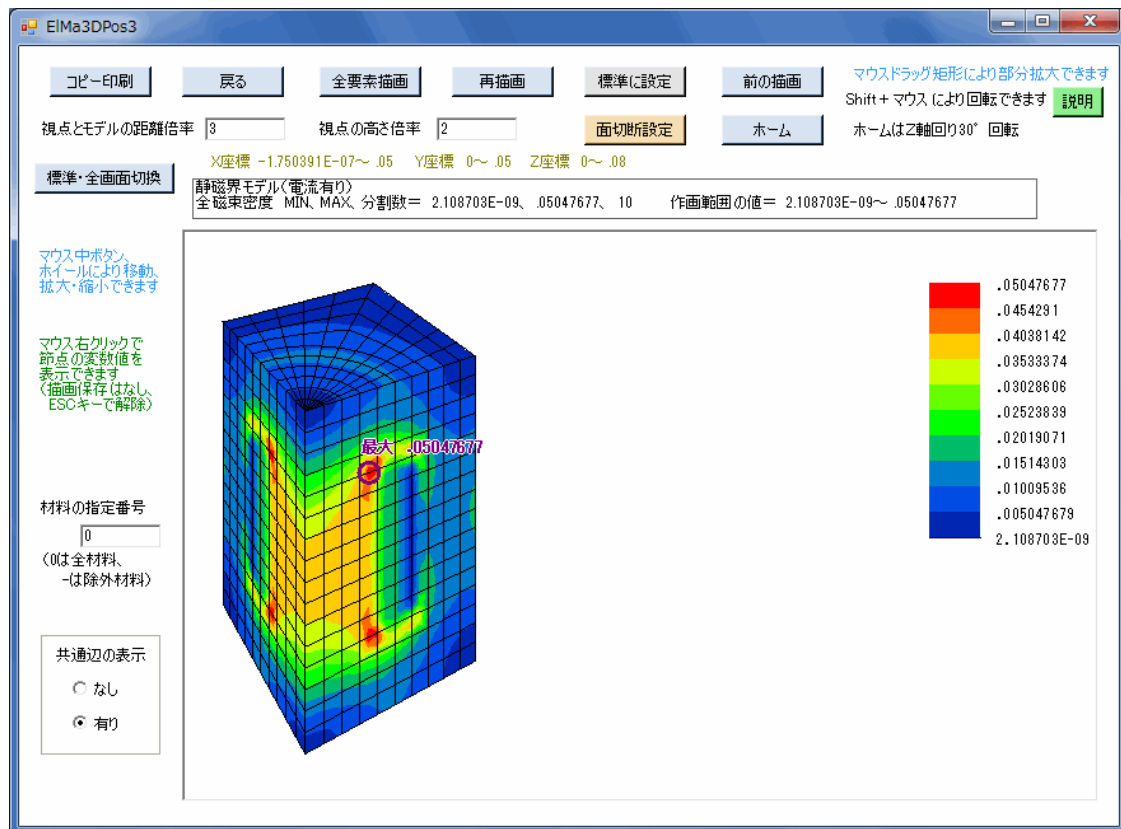


図8-6 静磁界（電流有り）計算例の全磁束密度の等高線図

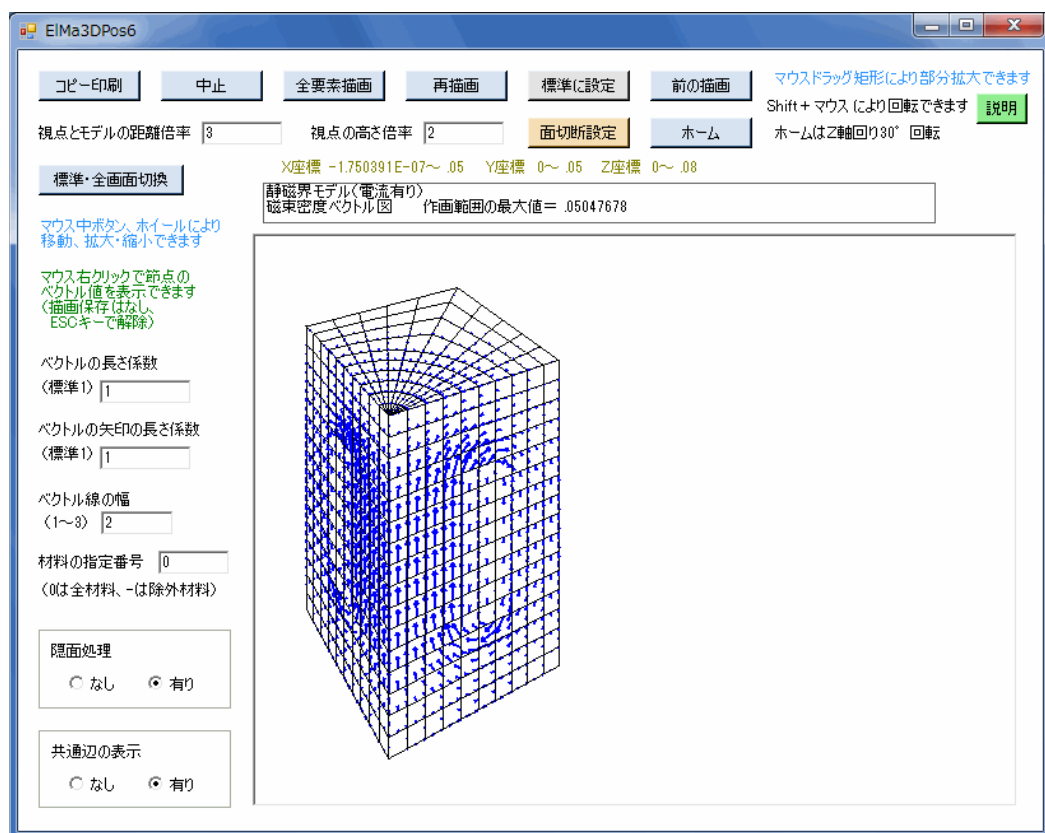


図8-7 静磁界（電流有り）計算例の磁束密度ベクトル図

第9章 準定常電磁界（渦電流）の計算例

準定常電磁界（渦電流）の場合は、複素数の磁気ベクトルポテンシャルと電位を計算します。それらを用いて、さらに磁束密度、渦電流、インピーダンスも算出されます。

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、中央にリング状コイル、その下方に正方形の鉄板、および周囲の空気とから成ります。X軸、Y軸に関して対称なので、XY座標第1象限の1/4部分を使用します。コイルには周方向電流100 A 60Hzが流れ、その電流密度Jを物性データとして与えます。

対称面のXZ平面では、 A_x 、 A_z を0固定、 A_y 、電位を非固定にし、同様に対称面のYZ平面では、 A_y 、 A_z を0固定、 A_x 、電位を非固定にします。

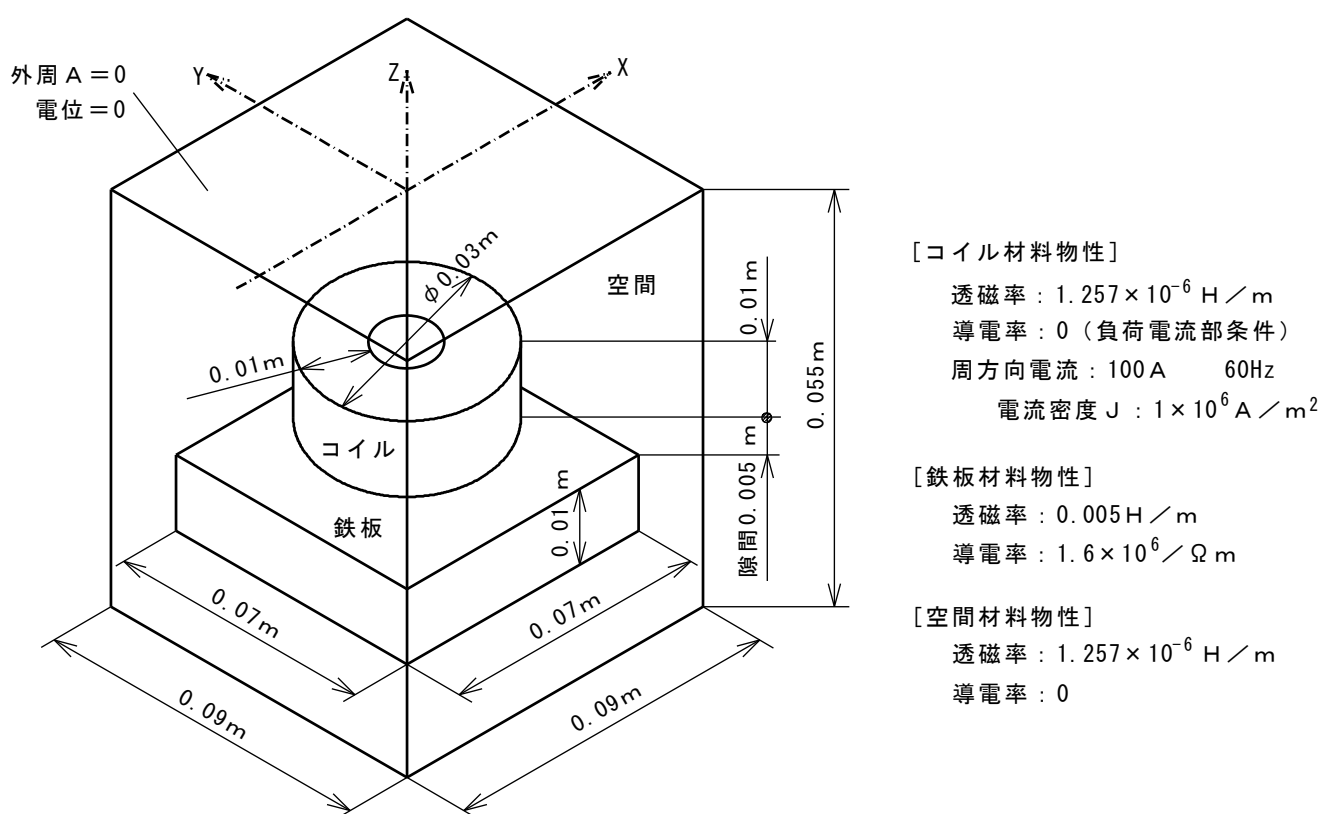


図9-1 準定常電磁界（渦電流）計算例のモデル図

注) 第4章で説明したように、入力電流密度に通常は実効値を使用しますが、最大値であっても構いません。入力に実効値を使用した場合は計算結果も実効値となり、入力に最大値を使用した場合は結果も最大値となります。

9.2 入力データ

図9-2に構造図の画面、図9-3に入力データファイルの内容を示します。

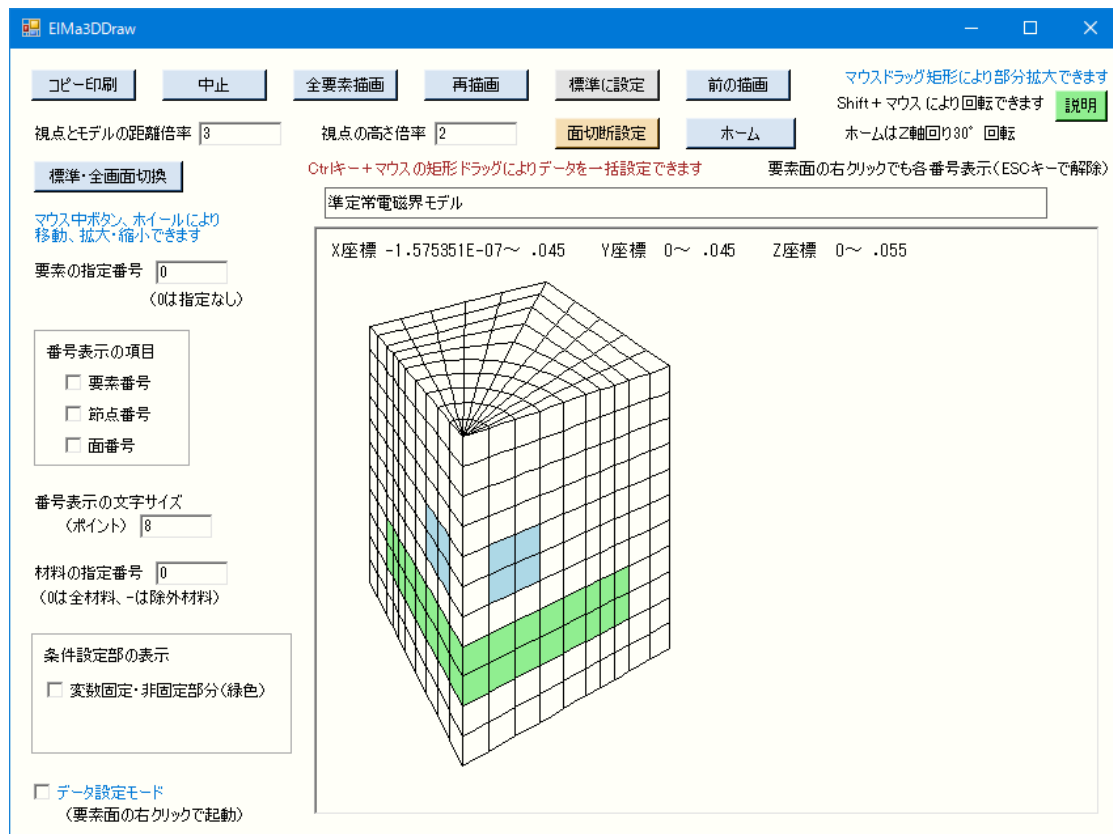


図9-2 準定常電磁界（渦電流）計算例の構造図

プログラム名, EleMag3D

要素種類 (0:六面体、1:四面体), 0

準定常電磁界モデル

解析種類 (3:準定常電磁界), 3

境界の設定区分 (0:自動、1:非自動), 0

節点数, 5248

要素数, 1100

材料データ数, 3

変数固定・非固定の節点数, 0

変数固定・非固定の面の数, 220

正弦波周波数 (Hz), 60

ガウス積分点数, 3

1 節点当りの変数の数, 8

材料データの成分数, 5

要素データ (要素番号、材料番号、20節点番号)

1, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 7, 6, 4, 332, 333
335, 334, 448, 449, 450, 452, 455, 454, 453, 451
2, 1, 1, 4, 6, 7, 8, 11, 10, 9, 332, 334
335, 336, 448, 451, 453, 454, 455, 458, 457, 456
3, 1, 1, 9, 10, 13, 16, 15, 14, 12, 332, 336
338, 337, 448, 456, 457, 460, 463, 462, 461, 459
4, 1, 1, 12, 14, 15, 16, 19, 18, 17, 332, 337
338, 339, 448, 459, 461, 462, 463, 466, 465, 464
.
.
1099, 1, 4728, 4791, 4792, 4796, 4798, 4797, 4737, 4735, 4892, 4914
4916, 4895, 5175, 5238, 5239, 5243, 5245, 5244, 5184, 5182
1100, 1, 4792, 4794, 4795, 4799, 4801, 4800, 4798, 4796, 4914, 4915
4917, 4916, 5239, 5241, 5242, 5246, 5248, 5247, 5245, 5243

節点データ (節点番号、X座標、Y座標、Z座標)

1, 0, 0, .055
2, .0025, 0, .055
3, .005, 0, .055
4, .00123461, .0001955435, .055
5, .004984586, .0003922963, .055
6, .002469221, .000391087, .055
7, .003703831, .0005866305, .055
8, .004938441, .0007821741, .055
9, .002377641, .0007725441, .055
.
.

図9-3 (1/2) 準定常電磁界 (渦電流) 計算例の入力データファイル

5244, -1.312793E-07, .0375, 0
 5245, -1.400312E-07, .04, 0
 5246, .003563497, .045, 0
 5247, -1.487832E-07, .0425, 0
 5248, -1.575351E-07, .045, 0

 各材料の物性データ

材料番号, 1

透磁率、導電率

1.257E-06, 0

電流密度定義区分 (0:座標軸方向、1:対面方向), 0

電流密度 Jx、Jy、Jz

0, 0, 0

材料番号, 2

透磁率、導電率

1.257E-06, 0

電流密度定義区分 (0:座標軸方向、1:対面方向), 1

要素面番号、電流密度 J、ダミー

3, 1000000, 0

材料番号, 3

透磁率、導電率

.0005, 1600000

電流密度定義区分 (0:座標軸方向、1:対面方向), 0

電流密度 Jx、Jy、Jz

0, 0, 0

 <変数固定・非固定の面>

No.、要素番号、面番号、Ax拘束、Ax値、Ay拘束、Ay値、Az拘束、Az値、電位拘束、電位値

1,	1,	3,	1,	0,	0,	0,	1,	0,	0,	0
2,	11,	3,	1,	0,	0,	0,	1,	0,	0,	0
3,	12,	3,	1,	0,	0,	0,	1,	0,	0,	0
4,	31,	3,	1,	0,	0,	0,	1,	0,	0,	0
5,	32,	3,	1,	0,	0,	0,	1,	0,	0,	0
.....										
.....										
218,	1080,	4,	0,	0,	1,	0,	1,	0,	0,	0
219,	1099,	4,	0,	0,	1,	0,	1,	0,	0,	0
220,	1100,	4,	0,	0,	1,	0,	1,	0,	0,	0

図9-3 (2/2) 準定常電磁界（渦電流）計算例の入力データファイル

9.3 計算結果データ

図9-4に計算結果データファイルの内容を示します。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計算マトリックスの変数個数、フルバンド幅、保存インデックス数（1個）は、それぞれ25070、7407、2930006です。
- ②出力1では、各節点の磁気ポテンシャルベクトルAと電位の絶対値を出力しています。
- ③出力2では、各節点の磁束密度の絶対値を出力しています。
- ④出力3では、各節点の渦電流密度の絶対値を出力しています。
◇材料境界の節点については、渦電流発生側の値を示しています。
注）元電流の材料では、渦電流は発生せず0になります。
- ⑤材料別の渦電力が、電流部以外の材料について、合計出力されています。
- ⑥インピーダンスとして、電流部の材料について、断面積、負荷電流、誘起電圧、インピーダンス、複素角が合計出力されています。
- ⑦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。
- ⑧計算時間は36sです（反復法、前処理なし）。

9.4 等高線図

図9-5～図9-7にA絶対値、全磁束密度および渦J絶対値の等高線図（カラーフィル有り）を示します。

<< 3次元電磁界解析の計算結果 >>

準定常電磁界モデル

[入力データファイル] , C:\¥VB2022¥3次元電磁界解析¥Data¥Mag3D3ModelA. dat

[解析種類] 準定常電磁界 (渦電流)

*** 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、フルバンド幅、保存インデックス数 (1 個)

25070, 7407, 2930006

①

** 節点の計算出力 **

出力 1

②

<節点番号、Ax絶対値、Ay絶対値、Az絶対値、全A、電位絶対値>

1, 0, 0, 0, 0, 0

2, 0, 0, 0, 0, 0

3, 0, 0, 0, 0, 0

.....

.....

2308, 1.658813E-05, 1.658808E-05, 7.88415E-16, 2.345912E-05, 0

2309, 1.816668E-05, 1.816662E-05, 1.343093E-15, 2.569152E-05, 0

2310, 1.294315E-05, 1.515044E-05, 3.141551E-12, 1.992639E-05, 0

.....

.....

5246, 0, 0, 0, 0, 0

5247, 0, 0, 0, 0, 0

5248, 0, 0, 0, 0, 0

出力 2

③

<節点番号、Bx絶対値、By絶対値、Bz絶対値、全磁束密度>

1, 4.143257E-10, 4.143269E-10, 7.328E-09, 7.351389E-09

2, 8.949586E-05, 7.730343E-12, 2.653209E-09, 8.949586E-05

3, .0001700348, 8.708927E-11, 3.862177E-08, .0001700348

4, 4.526132E-05, 7.168635E-06, 8.085837E-09, 4.58255E-05

5, .0001693025, 1.337854E-05, 4.882328E-08, .0001698303

.....

.....

5244, 5.290232E-13, 9.545965E-06, 1.011006E-10, 9.545965E-06

5245, 3.046412E-12, 7.326944E-06, 3.386516E-10, 7.326944E-06

5246, 3.383622E-13, 4.215667E-12, 8.687541E-10, 8.687644E-10

5247, 2.756858E-13, 4.341798E-06, 5.701111E-10, 4.341798E-06

5248, 2.686606E-12, 2.915835E-11, 8.298946E-10, 8.30411E-10

図9-4 (1/2) 準定常電磁界 (渦電流) 計算例の計算結果データファイル

出力 3

④

<節点番号、渦 J x絶対値、渦 J y絶対値、渦 J z絶対値、全渦電流密度>

1, 0, 0, 0, 0

2, 0, 0, 0, 0

3, 0, 0, 0, 0

.

.

3204, 48021.08, 56047.68, 13.4481, 73806.28

3205, 56949.46, 56949.33, .00463522, 80538.6

3206, 52033.66, 52033.55, .005919408, 73586.63

.

.

5246, 0, 0, 0, 0

5247, 0, 0, 0, 0

5248, 0, 0, 0, 0

* * 材料別の渦電力 * *

⑤

<材料番号、渦電力>

3, .005240991

* * インピーダンス * *

⑥

<材料番号、断面積、負荷電流、誘起電圧、インピーダンス、複素角>

2, .0009999999, 999.9999, 4.2237E-07, 4.2237E-10, -86.79099

<最大値データ>

⑦

注) 絶対値の最大。

変数項目、 最大値、 節点番号

A x絶対値, 2.567734E-05, 2339

A y絶対値, 2.567735E-05, 2280

A z絶対値, 1.033116E-07, 3815

全 A, 2.569152E-05, 2309

電位絶対値, 1.587269E-06, 3548

磁束密度 B x, .003662277, 3178

磁束密度 B y, .003662274, 3235

磁束密度 B z, .007047712, 2243

全磁束密度, .007049354, 2243

J x絶対値, 80008.61, 3235

J y絶対値, 80008.66, 3178

J z絶対値, 511.7954, 4259

全渦電流密度, 80538.6, 3205

END 0h 0min 36s 5433MB free

⑧

図9-4 (2/2) 準定常電磁界（渦電流）計算例の計算結果データファイル

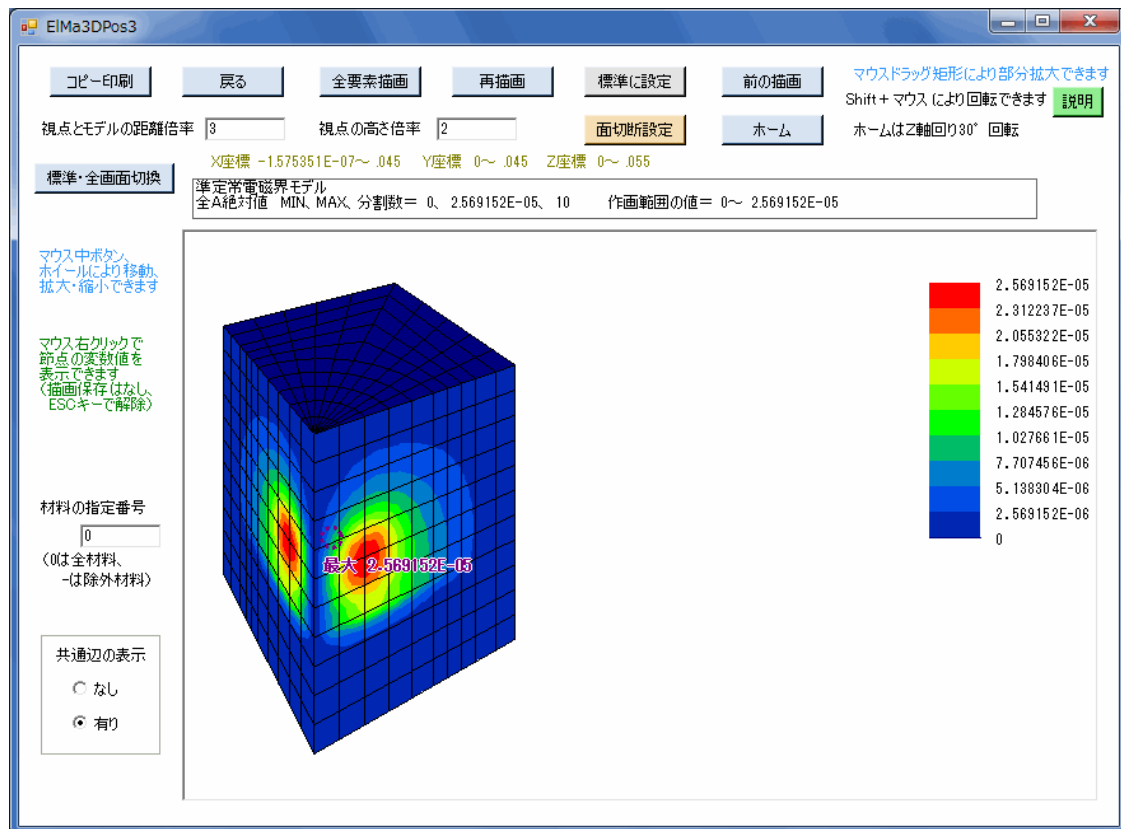


図9-5 準定常電磁界（渦電流）計算例の全Aの等高線図

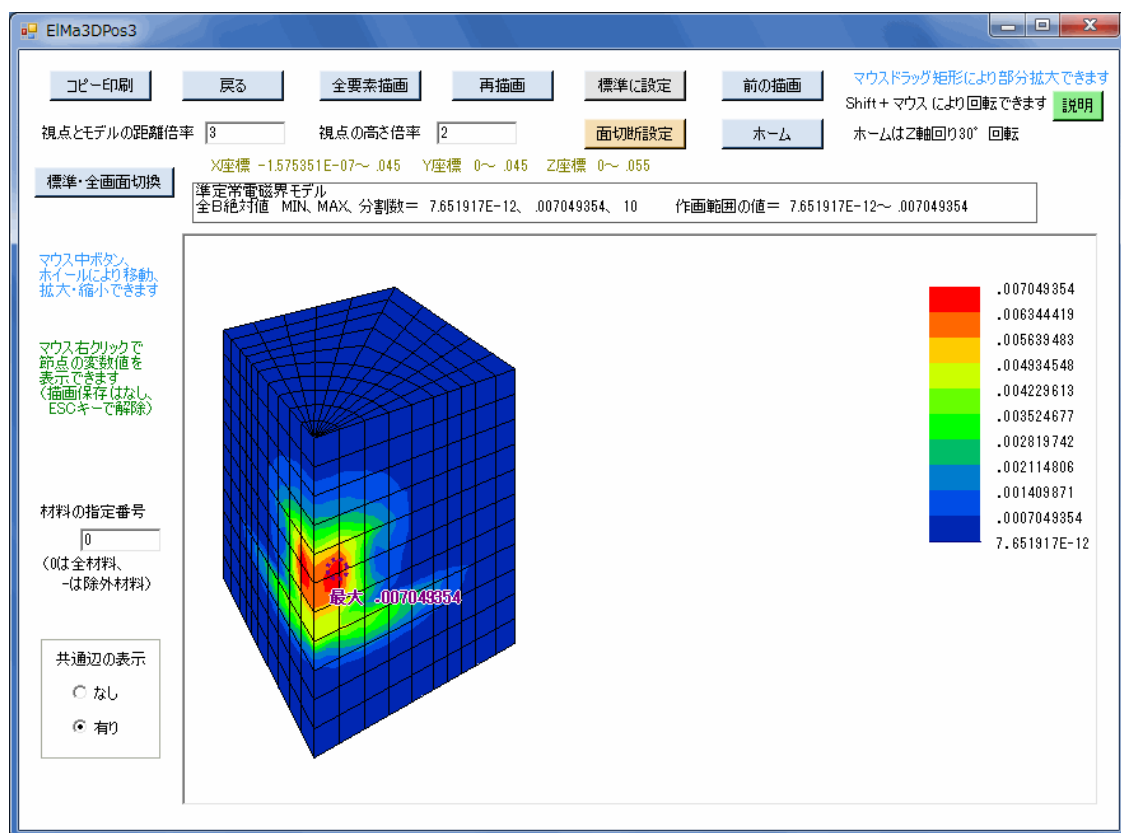


図9-6 準定常電磁界（渦電流）計算例の全磁束密度の等高線図

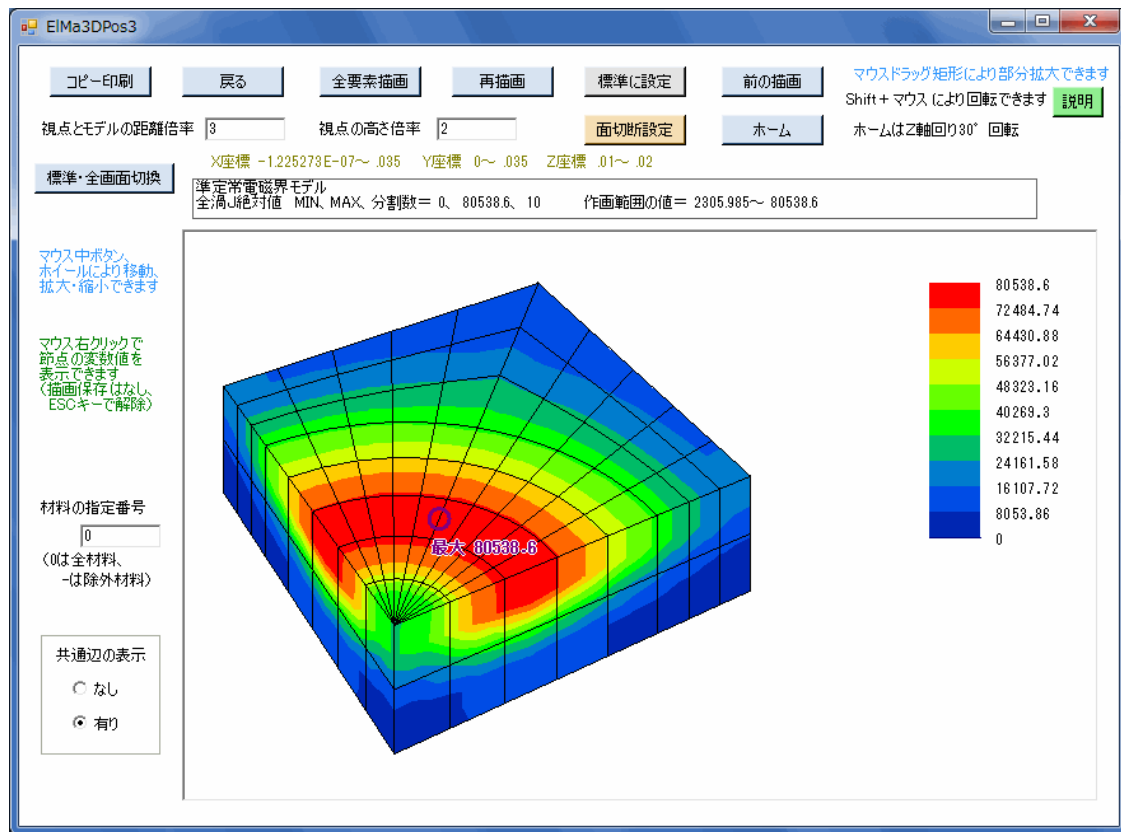
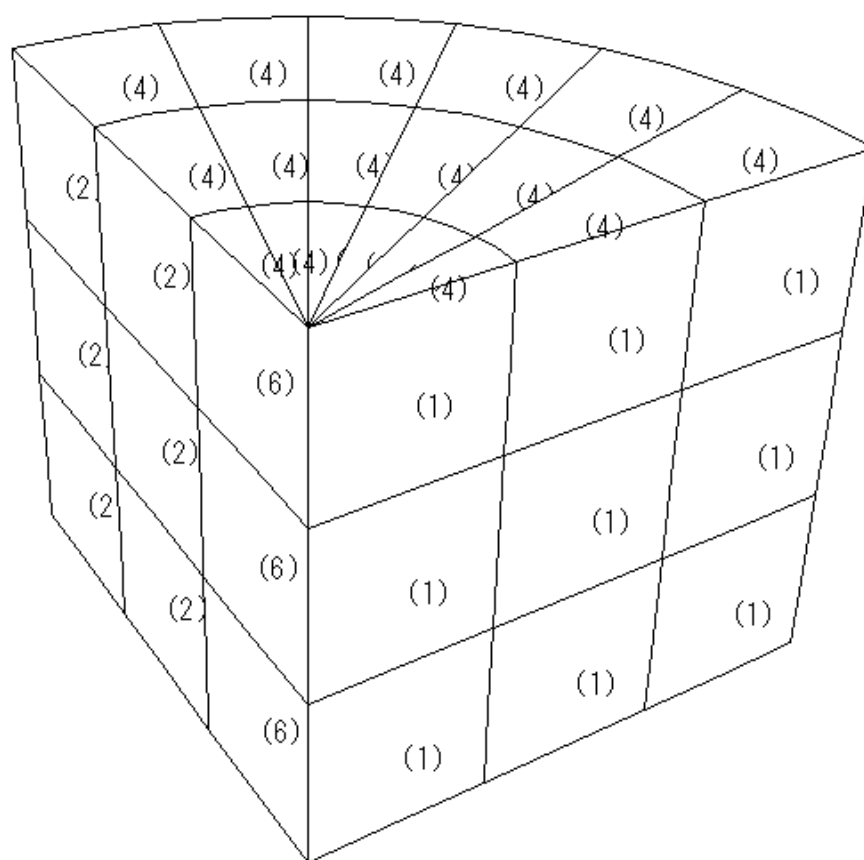


図9-7 準定常電磁界（渦電流）計算例の全渦Jの等高線図（渦電流発生部分）

[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ック」、谷尻 かおり、
技術評論社、2007

 数値計算・統計解析・グラフィックス

- B1) 「数学公式・数表ハンドブック」、ヒューゲル 著、氏家 勝巳 訳、
マグローヒル ブック (株)、1984
- B2) 「数値解析とその応用」、名取 亮、
コロナ社、1992
- B3) 「線形計算」、名取 亮、
朝倉書店、1993
- B4) 「コンピュータグラフィックス講義」、青木 由直、
コロナ社、2000
- B5) 「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) 「マトリックス有限要素法」、O.C.Zienkiewicz 他、吉識 雅夫 監訳、
(株) 培風館、1970
- C2) 「有限要素プログラミング」、E.Hinton 他、川井 忠彦 監訳、
丸善 (株)、1981

- C3) 「マイコンによる有限要素解析」、戸川 隼人、
(株) 培風館、1982
- C4) 「流れと熱伝導の有限要素法入門」、矢川 元基、
(株) 培風館、1983
- C5) 「有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析」、矢川 元基 他、
(株) サイエンス社、1987
- C6) 「The Finite Element Method (Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis)」、Thomas J.R. Hughes、Dover Publications、2000
- C7) 「電気磁気学」、電気学会編
電気学会、1991
- C8) 「実践数値電磁界解析法」、坪井 始 他
(株) 養賢堂、1995
- C9) 「最新 三次元有限要素法による 電気・電子機器の実用解析」、河瀬 順洋 他
森北出版(株)、1997
- C10) 「Numerical Computation of Electric and Magnetic Fields」、
Charles W. Steele、International Thomson Publishing、1997
- C11) 「The Finite Element Method in Electromagnetics」、Jianming Jin
John Wiley & Sons、2002
- C12) 「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
- C13) 「基本からわかる有限要素法」、邵 長城、
森北出版(株)、2008