
* 「2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

汎用的な2次元電磁界解析ソフトを提供します。このソフトは、有限要素法により、軸対称体を含む2次元電磁界問題を解くものです。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。入力データの自動メッシュについては、別途、算生会の「FEM断面データK」ソフトが必要です。

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

[備考]本書の解析事例の計算時間は、下記仕様のパソコンによります。

CPU : 3GHz (64bit、4コア) RAM : 16GB

<目次>

	ページ
第1章 有限要素法 -----	2
第2章 プログラムの機能・構成 -----	17
第3章 自動メッシュのデータの作り方 -----	21
第4章 構造データの作り方 -----	22
第5章「解析データ」処理プログラム -----	30
第6章「計算」プログラム -----	56
第7章「後処理」プログラム -----	64
第8章 静磁界（電流なし）の計算例 -----	74
第9章 静磁界（電流有り）の計算例 -----	81
第10章 準定常電磁界（渦電流）の計算例 -----	88
[参考文献] -----	96

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

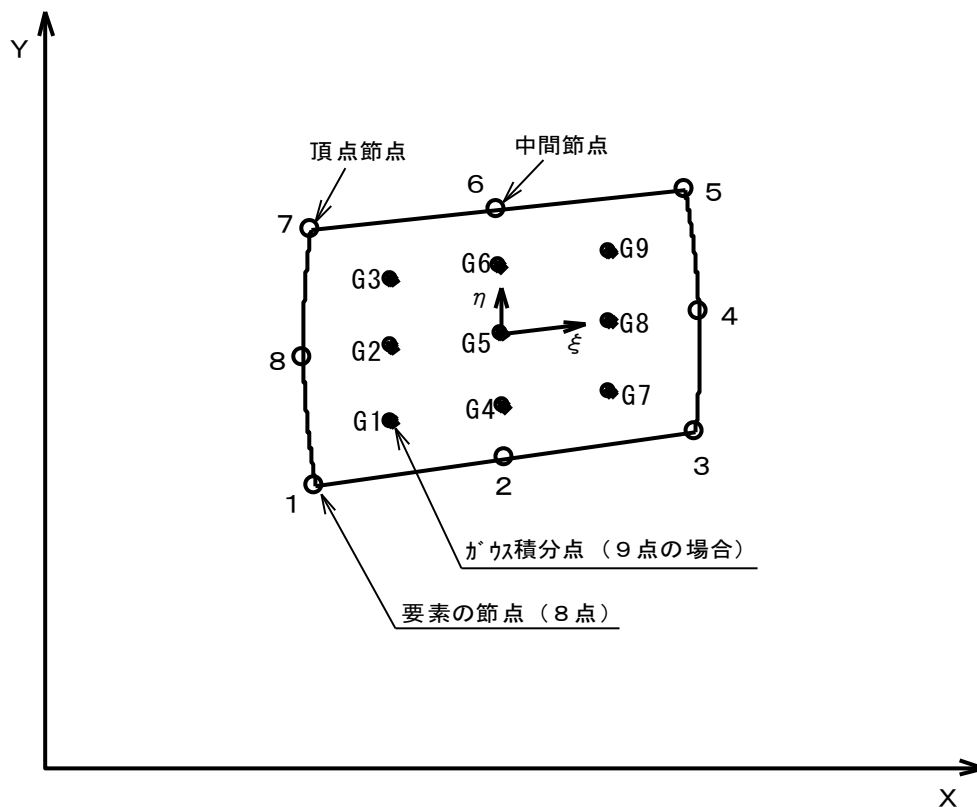


図1-1 四角形8節点要素

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

注) ①アイソパラメトリック要素とは、要素の幾何形状と変量が同一の内挿関数で表われる要素のことです。ここで、内挿関数とは後述の形状関数と同じです。

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

それ故、9点を採用しています。

図1-1に示す無次元化された局所座標 ξ, η を用いて、8節点の形状関数が下記のように定義されます。そして、要素内の任意位置の変数値が、8節点の変数値と形状関数の合成式により表わされます。

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

以上 (1-1)

ただし、 ξ, η の変域は、それぞれ-1～1

[要素内の変数値] 局所座標 (ξ, η) における値

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

ただし、 H_i は節点における変数値

1.2 要素積分

ガウス積分による要素積分は次式で表わされます。

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

ただし、 $F(\)$ ：任意関数

dV ：積分体積

n ：1軸当たりのガウス積分点数

W_i, W_j ：ガウス積分点の位置 (ξ, η) における重み係数

ξ, η ：要素の無次元化された局所座標

h ：平面問題の場合は要素の厚さ、軸対称問題の場合は $2\pi R$

$|J|$ ：ヤコビアンマトリックスの行列式の値

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

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

表1-1 ガウス積分点の位置と重み係数

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

1.3 辺積分

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

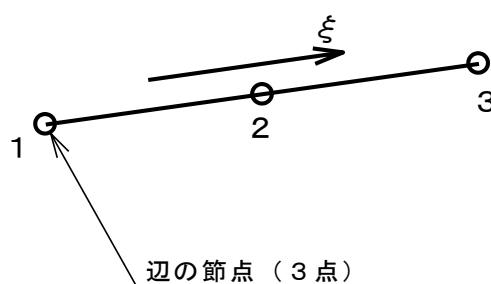


図1-2 要素の辺

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

ただし、 ξ の変域は-1～1

[辺上の変数値] 局所座標 ξ における値

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

ただし、 H_i は節点における変数値

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

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

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

ただし、 W_i ：ガウス積分点の位置 ξ における重み係数。

積分点の位置と重み係数は表1-1参照。

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

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

その他の記号は1.2節と同じ。

1.4 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。

$$\text{rot } H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1-11)$$

$$\text{rot } E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1-12)$$

$$\text{div } B = 0 \quad (1-13)$$

$$\text{div } D = \rho \quad (1-14)$$

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。

$$\text{rot } H = i \left(\frac{\partial H_z}{\partial Y} - \frac{\partial H_y}{\partial Z} \right) + j \left(\frac{\partial H_x}{\partial Z} - \frac{\partial H_z}{\partial X} \right) + k \left(\frac{\partial H_y}{\partial X} - \frac{\partial H_x}{\partial Y} \right) \quad (1-15)$$

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。

$$\text{div } B = \frac{\partial B_x}{\partial X} + \frac{\partial B_y}{\partial Y} + \frac{\partial B_z}{\partial Z} \quad (1-16)$$

div演算については他も同様。

なお、(1-11)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。

$$D = \varepsilon E \quad (1-17)$$

$$B = \mu H \quad (1-18)$$

$$J = \sigma E \quad (1-19)$$

ただし、 ε ：誘電率

μ ：透磁率

σ ：導電率（1/抵抗率）

1.5 2次元静電界の有限要素法解析

静電界の解析では、(1-12)式で右辺を0とおいた式と(1-14)式を用います。それらを

以下に示します。

$$\text{rot } E = 0 \quad (1-20)$$

$$\text{div } D = \rho \quad (1-21)$$

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。

$$E = -\text{grad } \phi \quad (1-22)$$

$$\text{ここで、} \quad \text{grad } \phi = i \frac{\partial \phi}{\partial X} + j \frac{\partial \phi}{\partial Y} + k \frac{\partial \phi}{\partial Z} \quad (1-23)$$

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、(1-20)式は自動的に成立する。

2次元の解析では、 E は X, Y 方向成分だけとなるので、それらは(1-22)式から次のように表わされます。ただし、軸対称体では X, Y 軸を R, Z 軸で置き換えます。

$$E_x = -\frac{\partial \phi}{\partial X} \quad (1-24)$$

$$E_y = -\frac{\partial \phi}{\partial Y} \quad (1-25)$$

他方、(1-17)式を(1-21)式に代入すると、

$$\text{div } D = \text{div}(\epsilon E) = \rho \quad (1-26)$$

(1-24)式、(1-25)式を(1-26)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。

$$\epsilon \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2} \right) + \rho = 0 \quad (1-27)$$

なお、軸対称体では次式となります。

$$\epsilon \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \phi}{\partial R} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Z^2} \right) + \rho = 0 \quad (1-27')$$

(1-27)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。

$$[K_e] \{\phi_e\} = \{F_e\} \quad (1-28)$$

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。

$$[K_e] = \int \left(\epsilon \frac{\partial [N]^T}{\partial X} \frac{\partial [N]}{\partial X} + \epsilon \frac{\partial [N]^T}{\partial Y} \frac{\partial [N]}{\partial Y} \right) dV \quad (1-29)$$

$$[F_e] = \int \rho [N]^T dV - \int q [N]^T dA_c \quad (1-30)$$

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_c : 境界積分面積

(1-30) 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（単位厚さ当り）の場合は、(1-30) 式によらず直接 $\{F_e\}$ に加算します。ただし、軸対称体では $2\pi R$ を掛けます。

(1-29) 式、(1-30) 式を局所座標 ξ, η によって表わすと、それぞれ以下ようになります。

$$[K_e] = \int \left(\varepsilon \frac{\partial [N]^T}{\partial X} \frac{\partial [N]}{\partial X} + \varepsilon \frac{\partial [N]^T}{\partial Y} \frac{\partial [N]}{\partial Y} \right) h |J| d\xi d\eta \quad (1-31)$$

$$[F_e] = \int \rho [N]^T h |J| d\xi d\eta - \int q [N]^T h dS \quad (1-32)$$

ただし、 dS ：境界辺に沿った積分長さ

h ：2次元の場合は単位厚さ、軸対称体の場合は $2\pi R$

$|J|$ ：ヤコビアンマトリックス J の行列式の値

全要素について (1-28) 式を合わせると、全体の方程式は次の形となります。

$$[K]\{\phi\} = \{F\} \quad (1-33)$$

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

(1-33) 式は、右辺がすべて既知項であり、1 次方程式となります。この方程式の左辺係数行列はいわゆるバンドマトリックス形となり、通常のソルバー計算により解くことができます。

[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

$$q = -\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial n} \quad (1-34)$$

ただし、 n ：境界の法線ベクトル

[電荷条件]

①電荷密度 ρ （単位体積当り）・・・要素の物性値とする

②節点電荷 P （単位厚さ当り）

<節点電荷の受けるクーロン力>

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。

$$F_{cx} = P \cdot E_x \quad (1-35)$$

$$F_{cy} = P \cdot E_y \quad (1-36)$$

ただし、 F_{cx} 、 F_{cy} ： X 、 Y 方向のクーロン力

なお、軸対称体の場合は X 、 Y の代わりに R 、 Z を使用

＜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。

$$F_{csx} = \int \rho [N]^T E_x dV \quad (1-37)$$

$$F_{csy} = \int \rho [N]^T E_y dV \quad (1-38)$$

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

なお、軸対称体の場合はX, Yの代わりにR, Zを使用

1.6 2次元静磁界（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、(1-11)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。

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

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

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。

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

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

2次元の解析では、HはX, Y方向成分だけとなるので、それらは(1-43)式から次のように表わされます。ただし、軸対称体ではX, Y軸をR, Z軸で置き換えます。

$$H_x = -\frac{\partial \phi_m}{\partial X} \quad (1-44)$$

$$H_y = -\frac{\partial \phi_m}{\partial Y} \quad (1-45)$$

他方、(1-43)式を(1-42)式に代入すると、

$$\text{div } B = \text{div}(\mu H) = 0 \quad (1-46)$$

(1-44)式、(1-45)式を(1-46)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。

$$\mu \left(\frac{\partial^2 \phi_m}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi_m}{\partial Y^2} \right) = 0 \quad (1-47)$$

なお、軸対称体では次式となります。

$$\mu \left(\frac{\partial^2 \phi_m}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \phi_m}{\partial R} + \frac{\partial^2 \phi_m}{\partial Z^2} \right) = 0 \quad (1-47')$$

(1-47)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。

$$[K_e] \{\phi_{me}\} = \{F_e\} \quad (1-48)$$

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。

$$[K_e] = \int \left(\mu \frac{\partial [N]^T}{\partial X} \frac{\partial [N]}{\partial X} + \mu \frac{\partial [N]^T}{\partial Y} \frac{\partial [N]}{\partial Y} \right) dV \quad (1-49)$$

$$[F_e] = - \int q [N]^T dA_c \quad (1-50)$$

ただし、 $[N]$ ：形状関数の行ベクトル

dV ：積分体積、 dA_c ：境界積分面積

(1-50) 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1.5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

$$q = - \mu \frac{\partial \phi_m}{\partial n} \quad (1-51)$$

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。

$$F_m = \int T_n dA \quad (1-52)$$

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。

$$T_{ij} = \frac{1}{\mu_0} \left(B_i B_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} B^2 \right) \quad (1-53)$$

ただし、 i, j ： X, Y 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 ：境界辺の法線ベクトル

dA ：境界辺の面積で、積分範囲は磁性体が環境に囲まれた領域

1.7 2次元静磁界（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、(1-11) 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。

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

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

ここで、ベクトルポテンシャル A を次式で定義します。

$$\mathbf{B} = \text{rot} \mathbf{A} \quad (1-63)$$

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

2次元解析では、電流は Z 方向のみとし、ベクトルポテンシャル A も Z 方向成分のみとします。そうすると、(1-63) 式は次のように表わされます。ただし、軸対称体では X, Y 軸を R, Z 軸で置き換え、 Z 軸を反 θ 方向の P 軸で置き換えます。

注) 軸対称体の座標軸は、通常 R, Z, θ 軸が用いられますが、 X, Y 軸に対する Z 軸と向きを揃えるため、 θ 軸の逆向きに P 軸を取って θ 軸の替わりに用いることにします (第4章の図4-7を参照)。

$$\mathbf{B} = i \left(\frac{\partial A_z}{\partial Y} \right) + j \left(-\frac{\partial A_z}{\partial X} \right) \quad (1-64)$$

なお、軸対称体では次式となります。

$$\mathbf{B} = i \left(\frac{\partial A_p}{\partial Z} \right) + j \left(-\frac{\partial A_p}{\partial R} - \frac{A_p}{R} \right) \quad (1-64')$$

ただし、(1-64) 式の i, j は X, Y 軸方向単位ベクトル。

8 節点要素の場合、

$$\frac{\partial A_z}{\partial X} = \sum_{i=1}^8 \frac{\partial N_i}{\partial X} A_{zi} \quad (1-65)$$

(1-18) 式から

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \mathbf{B} \quad (1-66)$$

(1-66) 式、(1-64) 式を (1-61) 式に代入すると、次のように変形されます。ただし、電流は Z 方向のみの J_z としています。

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

なお、軸対称体では次式となります。

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A_p}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial A_p}{\partial R} + \frac{\partial^2 A_p}{\partial Z^2} - \frac{A_p}{R^2} \right) + J_p = 0 \quad (1-67')$$

(1-67) 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。

$$[\mathbf{K}_e] \{A_{ze}\} = \{F_e\} \quad (1-68)$$

$$[\mathbf{K}_e] = \int \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial [\mathbf{N}]^T}{\partial X} \frac{\partial [\mathbf{N}]}{\partial X} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial [\mathbf{N}]^T}{\partial Y} \frac{\partial [\mathbf{N}]}{\partial Y} \right) dV \quad (1-69)$$

軸対称体では次式となります。

$$[\mathbf{K}_e] = \int \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial [\mathbf{N}]^T}{\partial R} \frac{\partial [\mathbf{N}]}{\partial R} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial [\mathbf{N}]^T}{\partial Z} \frac{\partial [\mathbf{N}]}{\partial Z} + \frac{1}{R^2} [\mathbf{N}]^T [\mathbf{N}] \right) 2\pi R dR dZ \quad (1-69')$$

ただし、 $[\mathbf{K}_e]$: 要素の磁界マトリックス

$\{A_{ze}\}$: 要素節点のベクトルポテンシャル・ベクトル

$\{F_e\}$: 右辺ベクトル。境界条件で決まる。

$$\{F_e\} = \int J_z [N]^T dV - \int q [N]^T dA_c \quad (1-70)$$

ただし、 $[N]$: 形状関数の行ベクトル

dV : 積分体積、 dA_c : 境界積分面積

(1-70) 式は後述の流束境界の場合に適用します。

節点電流の場合は、(1-70) 式によらず直接 $\{F_e\}$ に加算します。ただし、軸対称体では $2\pi R$ を掛けます。

以降の定式化は1.5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_z

②流束 q (単位面積当り) . . . 流出方向が正

$$q = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial n} \quad (1-71)$$

ただし、 n : 境界の法線ベクトル

[電流条件]

①電流密度 J_z (単位面積当り) . . . 要素の物性値とする

②節点電流 Q_z

[磁化条件 (永久磁石に対応)]

磁化 M_x, M_y (単位体積当り) . . . 要素の物性値とする

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (1-72)$$

ただし、 μ_0 : 真空の透磁率

$$\therefore H = \frac{1}{\mu_0} B - M \quad (1-73)$$

磁化条件を電流に置き換えて計算します。(1-73) 式を(1-61) 式に代入すると、

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu_0} B - M \right) = J \quad (1-74)$$

(1-63) 式を(1-74) 式の左辺に代入して整理すると次式が得られます。

$$\text{rot} \frac{1}{\mu_0} \text{rot} A = J + \text{rot} M = J + J_M \quad (1-75)$$

$$\therefore -\frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial Y^2} \right) = J + J_M \quad (1-76)$$

ただし、 J_M : 等価磁化電流密度 (Z方向のみ)

$$J_M = \text{rot} M \quad (1-77)$$

Z方向は次式で表わされます。

$$J_{Mz} = \left(\frac{\partial M_y}{\partial X} - \frac{\partial M_x}{\partial Y} \right) \quad (1-78)$$

(1-78) 式を有限要素法で積分すると、

$$\begin{aligned}\int [N]^T J_{Mz} dV &= \int [N]^T \left(\frac{\partial M_y}{\partial X} - \frac{\partial M_x}{\partial Y} \right) dV \\ &= - \int \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial X} M_y - \frac{\partial [N]^T}{\partial Y} M_x \right) dV\end{aligned}\quad (1-79)$$

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。

$$F = \int J \times B dV \quad (1-80)$$

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で、2次元の場合はZ方向のみ

B：磁束密度のベクトル

<磁性体が受ける磁気力>

「2次元静磁界（電流なし）」と全く同じです。

1.8 2次元準定常電磁界（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、(1-11)式で右辺の時間微分を除いた式、(1-12)式、(1-13)式を用います。それらを以下に示します。

$$\text{rot } H = J \quad (1-81)$$

$$\text{rot } E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1-82)$$

$$\text{div } B = 0 \quad (1-83)$$

また、(1-18)式によりHをBで表わして(1-81)式に代入すると、

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} B \right) = J \quad (1-84)$$

すなわち、(1-82)式～(1-84)式を満足するように方程式を解きます。そこで、(1-82)式と(1-83)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。

$$E = -\text{grad } \phi - \frac{\partial A}{\partial t} \quad (1-85)$$

$$B = \text{rot } A \quad (1-86)$$

(1-19)式と(1-85)式を用いると、

$$J = J_0 + \sigma E$$

$$= J_0 + \sigma \left(-\text{grad} \phi - \frac{\partial A}{\partial t} \right) \quad (1-87)$$

ただし、 J_0 ：負荷電流密度

右辺の2項は次の区分けにより、どちらか1項を使用します。

〔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。負荷電流密度 J_0 は0とする。

注) (1-87)式は(1-19)式に J_0 が加わっていますが、これは(1-19)式と負荷電流密度 J_0 を1つの式で表わす便法です。

(1-86)式、(1-87)式を(1-84)式に代入すると、

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} A \right) = J_0 + \sigma \left(-\text{grad} \phi - \frac{\partial A}{\partial t} \right) \quad (1-88)$$

(1-87)式の右辺第2項（渦電流）のdivを0とおいて、

$$\text{div} \left\{ \sigma \left(-\text{grad} \phi - \frac{\partial A}{\partial t} \right) \right\} = 0 \quad (1-89)$$

2次元の場合は、平面内の電流は生じないため、ポテンシャル ϕ は面内では0となります。そして、ベクトルポテンシャルもZ方向成分のみとなり、Z方向に関して一定となります。そうすると、(1-89)式はdiv展開した各項が0となり、恒等的に成立します。また、(1-88)式は次のようになります。ただし、軸対称体ではX, Y軸をR, Z軸で置き換え、Z軸を反 θ 方向のP軸で置き換えます。

注) 軸対称体の座標軸は、通常R, Z, θ 軸が用いられますが、X, Y軸に対するZ軸と向きを揃えるため、 θ 軸の逆向きにP軸を取って θ 軸の替わりに用いることにします。

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} A_z \right) = J_{0z} + \sigma \left(-\frac{\partial A_z}{\partial t} \right) \quad (1-90)$$

そして、クーロンゲージ $\text{div} A = 0$ を適用すると、次式のように変形されます。

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial Y^2} \right) - \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} + J_{0z} = 0 \quad (1-91)$$

なお、軸対称体では次式となります。

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A_p}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial A_p}{\partial R} + \frac{\partial^2 A_p}{\partial Z^2} - \frac{A_p}{R^2} \right) - \sigma \frac{\partial A_p}{\partial t} + J_{0p} = 0 \quad (1-91')$$

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(1-91)式は次のようになります。ただし、各項の $e^{j\omega t}$ は省略してあります。

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial Y^2} \right) - j\omega \sigma A_z + J_{0z} = 0 \quad (1-92)$$

ここで、各変数を次のように表わします。

$$A_z = (A_a + j A_b) e^{j\omega t} \quad (1-93)$$

$$J_{0z} = J_a e^{j\omega t} \quad (1-94)$$

注) J_{0z} だけ非時間項を実数にするのは、 J_{0z} を基準に取るためです。

(1-93)式、(1-94)式を(1-92)式に代入すると

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 (A_a + jA_b)}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 (A_a + jA_b)}{\partial Y^2} \right) - j\omega \sigma (A_a + jA_b) + J_a = 0 \quad (1-95)$$

$$\therefore \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A_a}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 A_a}{\partial Y^2} \right) + \omega \sigma A_b + J_a + j \left\{ \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A_b}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 A_b}{\partial Y^2} \right) - \omega \sigma A_a \right\} = 0 \quad (1-96)$$

従って、上式で実数部と虚数部をそれぞれ0とおくと、

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A_a}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 A_a}{\partial Y^2} \right) + \omega \sigma A_b + J_a = 0 \quad (1-97)$$

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A_b}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 A_b}{\partial Y^2} \right) - \omega \sigma A_a = 0 \quad (1-98)$$

従って、(1-97)式と(1-98)式を連立させて、 A_a 、 A_b について解きます。

(1-97)式をFEM方程式で表わすと次のようになります。

$$\begin{aligned} & \int \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial [N]^T}{\partial X} \frac{\partial [N]}{\partial X} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial [N]^T}{\partial Y} \frac{\partial [N]}{\partial Y} \right) \{A_{ai}\} dV - \int \omega \sigma [N]^T [N] \{A_{bi}\} dV \\ &= \int J_a [N]^T dV - \int q [N]^T dA_c \end{aligned} \quad (1-99)$$

なお、軸対称体では次式となります。

$$\begin{aligned} & \int \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial [N]^T}{\partial R} \frac{\partial [N]}{\partial R} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial [N]^T}{\partial Z} \frac{\partial [N]}{\partial Z} + \frac{1}{R^2} [N]^T [N] \right) \{A_{ai}\} 2\pi R dR dZ \\ & - \int \omega \sigma [N]^T [N] \{A_{bi}\} 2\pi R dR dZ = \int J_a [N]^T 2\pi R dR dZ - \int q [N]^T 2\pi R dS \end{aligned} \quad (1-99')$$

ただし、 $[N]$ ：形状関数の行ベクトル

dV ：積分体積、 dA_c ：境界積分面積

添え字*i*は要素の節点を表わす。

右辺の第2項は、境界で次の条件のみとします。

$$q = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial n} = 0 \quad (1-100)$$

また、境界で A_z を指定する場合もゼロ設定のみ（実数、虚数共）とします。

(1-100)式を適用すると、(1-99)式は次のようになります。

$$\begin{aligned} & \int \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial [N]^T}{\partial X} \frac{\partial [N]}{\partial X} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial [N]^T}{\partial Y} \frac{\partial [N]}{\partial Y} \right) \{A_{ai}\} dV - \int \omega \sigma [N]^T [N] \{A_{bi}\} dV \\ &= \int J_a [N]^T dV \end{aligned} \quad (1-101)$$

同様にして、(1-98)式から、

$$\int \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial [N]^T}{\partial X} \frac{\partial [N]}{\partial X} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial [N]^T}{\partial Y} \frac{\partial [N]}{\partial Y} \right) \{A_{bi}\} dV + \int \omega \sigma [N]^T [N] \{A_{ai}\} dV = 0 \quad (1-102)$$

なお、軸対称体では次式となります。

$$\int \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial [N]^T}{\partial R} \frac{\partial [N]}{\partial R} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial [N]^T}{\partial Z} \frac{\partial [N]}{\partial Z} + \frac{1}{R^2} [N]^T [N] \right) \{A_{bi}\} 2\pi R dR dZ + \int \omega \sigma [N]^T [N] \{A_{ai}\} 2\pi R dR dZ = 0 \quad (1-102')$$

以降の定式化は1.5節と同様なので省略します。

[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。

$$J_E = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (1-103)$$

$$\begin{aligned} \therefore J_{Ez} &= -j\omega\sigma A_z \\ &= -j\omega\sigma (A_a + jA_b) \\ &= \omega\sigma A_b - j\omega\sigma A_a \end{aligned} \quad (1-104)$$

(1-104) 式を次のように書き直します。

$$\begin{aligned} \therefore J_{Ez} &= J_{Ea} + jJ_{Eb} \\ \text{ここで、} J_{Ea} &= \omega\sigma A_b \end{aligned} \quad (1-105)$$

$$J_{Eb} = -\omega\sigma A_a \quad (1-106)$$

材料別の渦電流は、(1-104) 式を同一材料の要素について積分合計することにより算出できます。また、渦電力 W_{Ez} は以下のように算出します。

まず、渦電圧 V_{Ez} は次式で表わされます。

$$V_{Ez} = R_M J_{Ez} \quad (1-107)$$

ただし、 R_M : 抵抗

$$R_M = \rho \frac{L}{S} = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{dA} \quad (1-108)$$

ここで、 ρ : 抵抗率、 L : 長さ、 S : 断面積、 dA : 要素面積

$$\begin{aligned} \therefore W_{Ez} &= V_{Ez} J_{Ez} \\ &= R_M J_{Ez}^2 \end{aligned} \quad (1-109)$$

(1-109) 式において、

$$\begin{aligned} J_{Ez}^2 &= (J_{Ea} + jJ_{Eb})^2 \\ &= J_{Ea}^2 - J_{Eb}^2 + 2jJ_{Ea}J_{Eb} \end{aligned} \quad (1-110)$$

$$\begin{aligned} \therefore |J_{Ez}|^2 &= \sqrt{(J_{Ea}^2 - J_{Eb}^2)^2 + 4J_{Ea}^2 J_{Eb}^2} \\ &= \sqrt{(J_{Ea}^2 + J_{Eb}^2)^2} = J_{Ea}^2 + J_{Eb}^2 \end{aligned} \quad (1-111)$$

[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。単位厚さ当り（軸対称体では全周）の誘起電圧は、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。

$$\begin{aligned}
V_{Iz} &= - \int \frac{\partial B}{\partial t} dA_s = - \int \frac{\partial \text{rot} A}{\partial t} dA_s = - \int \frac{\partial A}{\partial t} dL \\
&= -j\omega \int A_z dL = -j\omega \int A_z h dA / A_T
\end{aligned}
\tag{1-112}$$

ただし、 dA_s : 電流回路に鎖交する積分面積

dL : 電流回路に沿った微小長さ。

h : 2次元では単位厚さ、軸対称体では $2\pi R$

dA : 積分面積

A_T : 該当材料の全要素の面積

また、負荷電流は次式で表わされます。

$$I_{Iz} = \int J_{0z} dA \tag{1-113}$$

従って、インピーダンスは次式で計算できます。

$$Z_{Iz} = \frac{V_{Iz}}{I_{Iz}} = \frac{-j\omega \frac{1}{A_T} \int A_z h dA}{I_{Iz}} \tag{1-114}$$

(1-114) 式において、(1-93) 式による A_z の非時間項を用いると、

$$\begin{aligned}
-j A_z &= -j (A_a + j A_b) \\
&= A_b - j A_a
\end{aligned}
\tag{1-115}$$

なお、(1-114) 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 2 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、2次元または軸対称体の問題タイプで、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 2 D」 解析機能

解析種類	内 容	問題のタイプ	
		2次元	軸対称体
1) 静電界	静的な電界を解析するもの	○	○
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	○	○
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。	○	○
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）	○	○

注) ○印：対応。

力の出力：

- [1] 静電界] 節点電荷と電荷部が受けるクーロン力
- [2] 静電界（電流なし）] 物性区分数1以上の磁性体受ける磁気力
- [3] 静電界（電流有り）] 電流部が受けるローレンツ力、および
物性区分数1以上の磁性体受ける磁気力

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断面データ」ソフトにより作成した解析データファイルを使用します。ただし、問題タイプや解析種類の変更は、「解析データ」のサブメニュー「データ入力・修正」で実施します。また、「計算」メニューでは解析計算を実行し、「後処理」メニューでは計算結果の図を作画します。そして、ソフトを終了させる際は、「終了」をクリックします。なお、「計算」メニューには体積計算の補助機能もあります。

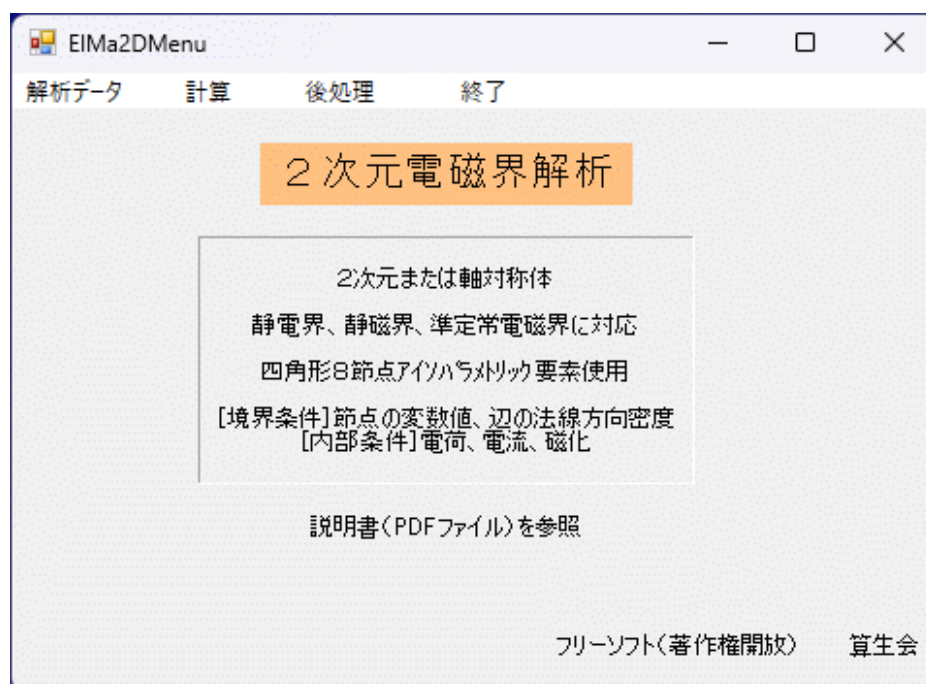


図2-1 「E I e M a g 2 D」ソフトのメニュー画面

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EIMa2DMenuモジュール*で制御し、その下に「解析データ」、「計算」、「後処理」の3つのプログラム群に分かれています。

注) *モジュール名や各フォーム名は、ファイル名と名前を一致させてあります。

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

表2-2に本ソフトのファイルリストを示します。同表で、[解析データ]のEIMa2DDat1～2とeIMa2DDat4は、各種データを画面入力するためのものです。特にEIMa2DDat2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。

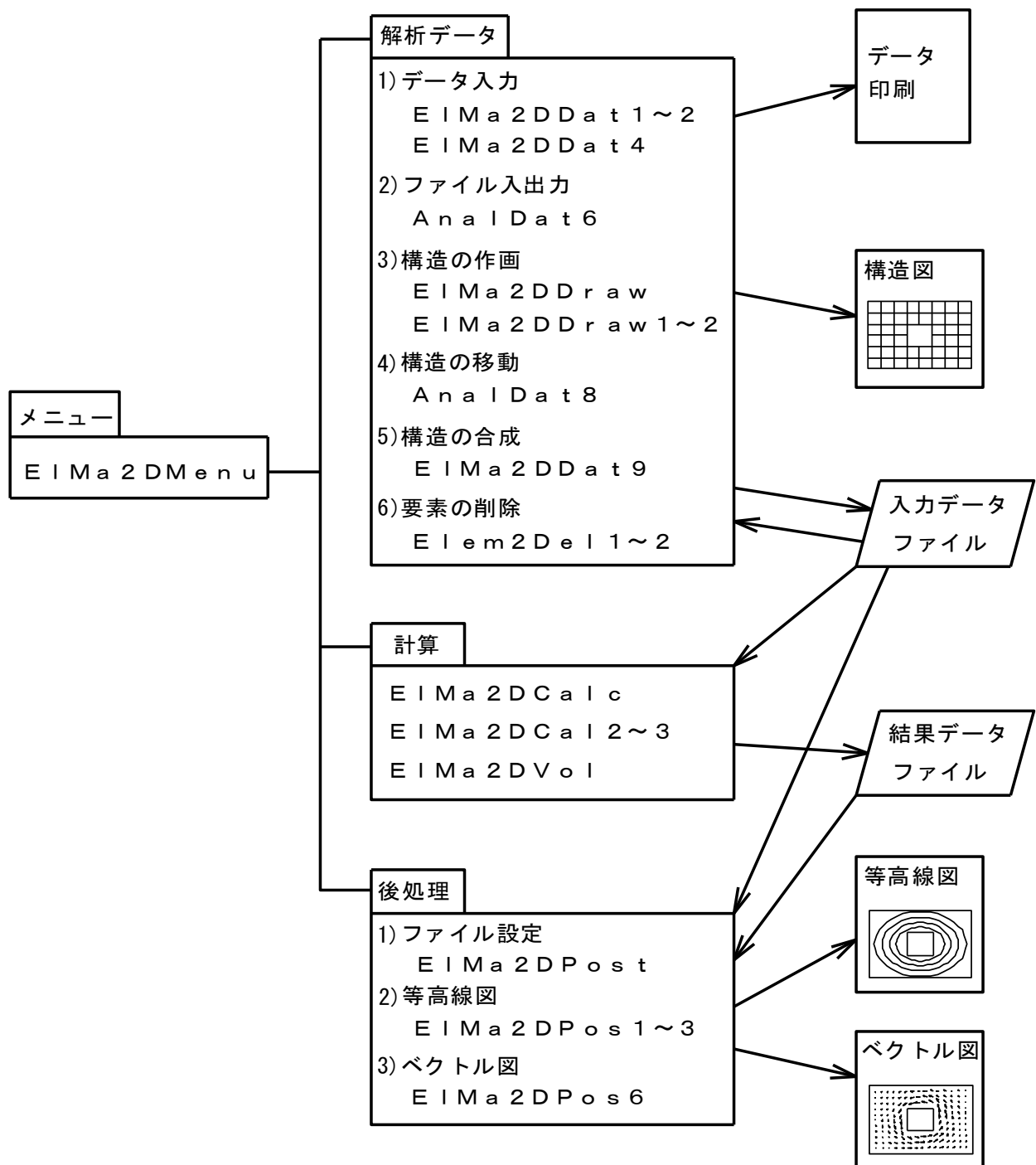


図2-2 「EImag2D」ソフトのプログラム構成

表2-2 「E l e M a g 2 D」ソフトのファイルリスト

[全般]

ファイル名	内 容
EIMa2DCom.vb	共通変数の宣言とサブルーチンの定義
EIMa2DMenu.vb	メニューの提示・選択

[解析データ]

ファイル名	内 容
EIMa2DDat1.vb	データ仕様の入力
EIMa2DDat2.vb	各データの入力
EIMa2DDat4.vb	材料データの入力(静磁界)
AnalDat6.vb	データファイルの入出力
AnalDat8.vb	構造の移動
EIMa2DDat9.vb	構造の合成
EIMa2DDraw.vb	構造の作画
EIMa2DDraw1.vb	構造図でデータ入力項目の選択
EIMa2DDraw2.vb	構造図でデータの入力
Elem2Del1.vb	要素の削除数の入力と削除の実行
Elem2Del2.vb	要素削除の要素指定

[計算]

ファイル名	内 容
EIMa2DCalc.vb	計算に使用するファイルの設定
EIMa2DCal2.vb	物性変化対応の繰返し計算の条件入力
EIMa2DCal3.vb	解析計算の実行
EIMa2DVol.vb	体積計算のファイル設定と実行

[後処理]

ファイル名	内 容
EIMa2DPost.vb	後処理に使用するファイルの設定
EIMa2DPos1.vb	等高線図作画の変数の指定
EIMa2DPos2.vb	等高線図の仕様設定
EIMa2DPos3.vb	等高線図の作画実行
EIMa2DPos6.vb	ベクトル図の作画実行

第3章 自動メッシュのデータの作り方

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

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

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

具体例として、図3-1に示す簡単な形状で説明します。同図では、外形が長方形になっており、①～④の4つの線分で表わされます。そして、たとえば線分①は点1と点2で定義します。他方、中央に円形の穴が空いており、その円は、2つの円弧（半円）⑤と⑥で表わします。そして、たとえば円弧⑤は点5、点6、点7で定義します。線分や点の番号は任意に付番してよいですが、欠番があってはなりません。なお、外形線分の定義点（円弧の中間点を除く）は、自動メッシュ生成の際、優先的に節点として選択されます。それ故、外形の特定の点を荷重点などに設定したい場合は、同点を線分定義点とし、1つの線分を複数線分に分けても構いません。

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

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

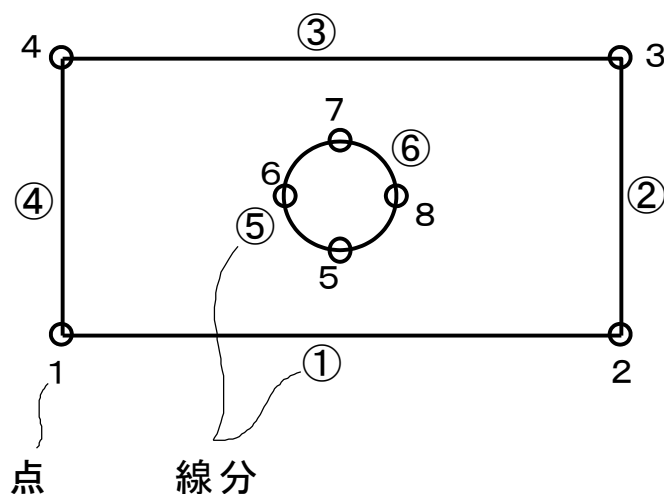


図3-1 線分による形状定義例

第4章 構造データの作り方

一般には前節の自動メッシュを利用しますので、人手で構造データ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、構造データについてよく理解しておかねばなりません。有限要素のメッシュデータについては、大半が「FEM断面データ」ソフトと同じなので、ここでは補足事項を主体に説明します。また、境界条件等の設定についても説明します。

構造データは2次元と軸対称体の各問題タイプで若干異なりますが、基本的な所は同じです。従って、共通な形で説明し、タイプにより異なる所は補足説明します。

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

以降では、図4-1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4-1のモデルは、2つの材料から構成されており、中央の2つの正方形穴に電位1Vと2Vが作用し、外周の電位は0Vです。

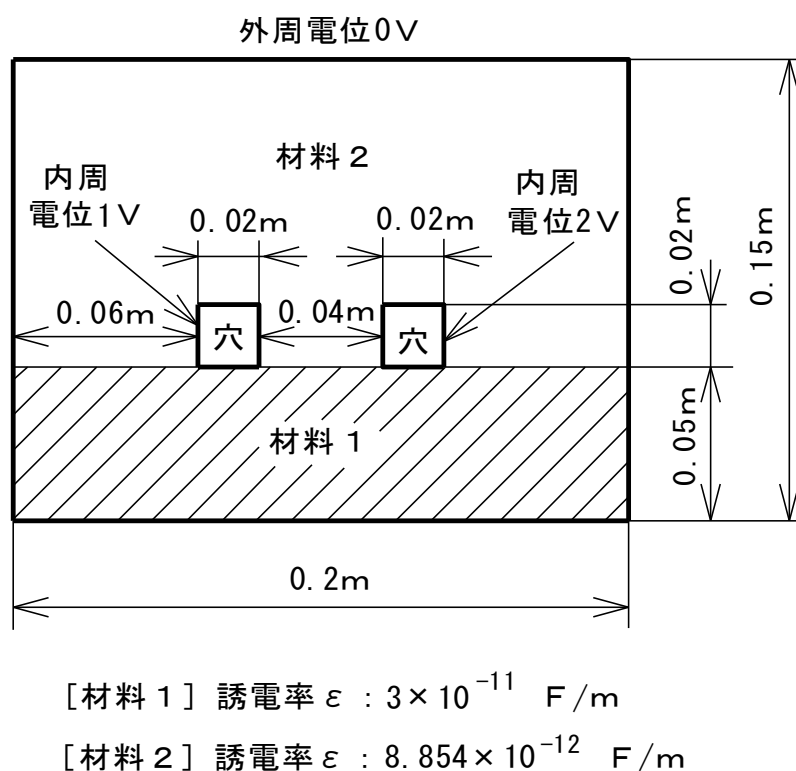


図4-1 静電界テスト構造

1) 先ず構造の平面図を作成し、座標を設定します。

- 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、図4-1のように外周が決まっています、その内部の解析を行なうものです。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座標軸は、図4-2、図4-3のように問題タイプにより異なります。

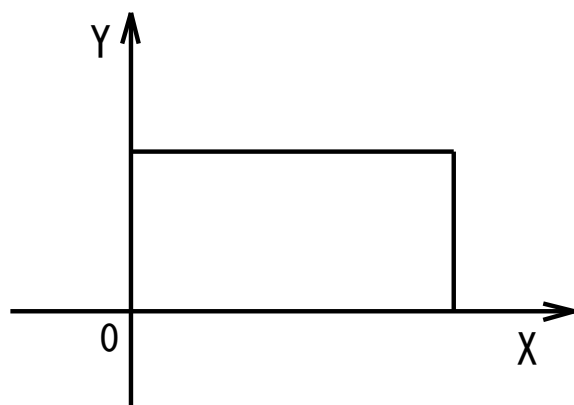


図4-2 2次元の平面図

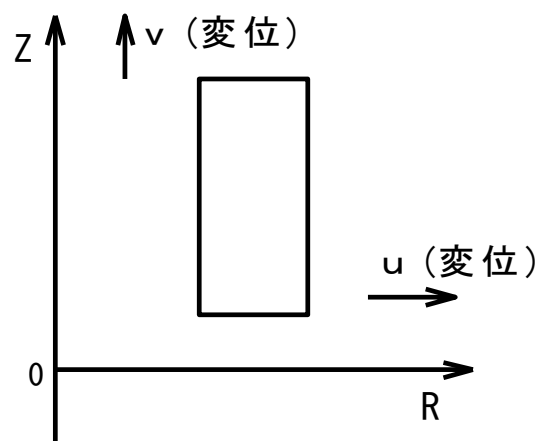


図4-3 軸対称体の平面図

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。たとえば、図4-4の対称形状の場合、境界や負荷の条件も対称であれば、斜線の部分だけを計算すれば済みます。ただし、その際、対称となる境界では法線方向の流束条件を0に設定する必要があります。

◇対称かどうかは、あくまでも有限要素法解析の変数に関してであり、有限要素法本来の計算結果から後計算される変数に関しては非対称でも構いません。たとえば、静磁界解析では磁気ポテンシャルに関して対称であればよく、後計算される磁束密度に関しては非対称で差し支えありません。

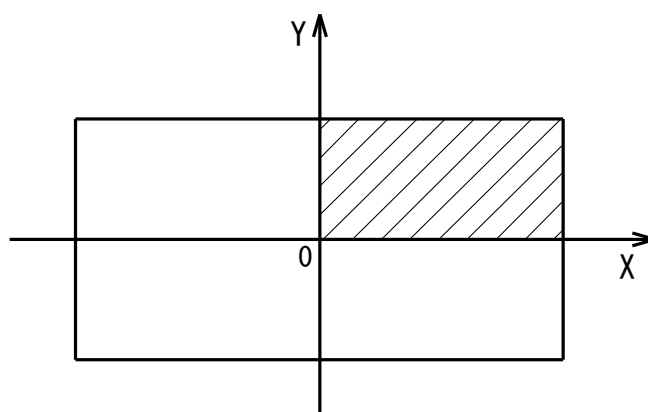


図4-4 対称形状の構造

2) 自動メッシュの場合は、「FEM断面データ」ソフトにより、要素や節点を自動生成します。自動メッシュでない場合は、構造を四角形要素に分割し、各要素に所定の節点を設けます。

①構造すべてを適当な大きさの四角形に分割します。四角形の辺は直線でも曲線（円

弧)でも構いません。また、形状は三角形であって、いずれかの辺の midpoint に頂点節点を設けるような変則の四角形も使用できます。四角形の大きさは、問題により異なり、全体の一部だけを細かくすることもあります。自動メッシュでない場合、各要素の頂点などの節点座標が計算しやすいように、なるべく座標軸に平行に分割します。

- ②図4-1の構造例では、材料1と材料2で別々の構造データを作成し、後で合成する方がデータ作成の手間が少ないです。また、材料2の部分については、図4-5に示すように①～④の4部分に分けて自動メッシュ生成を行ってから合成しています。なお、実際のメッシュ分割図は後掲します。

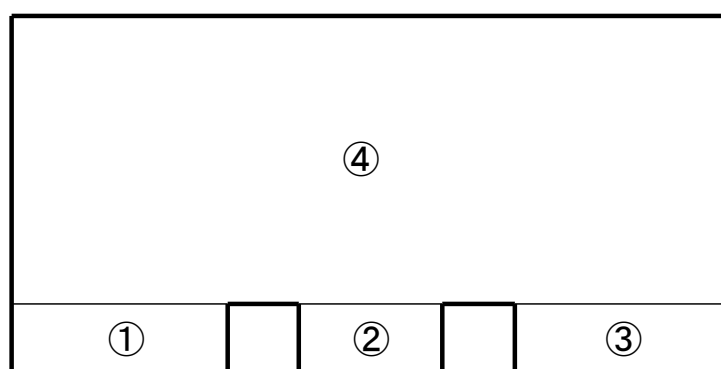


図4-5 テスト構造の材料2の部分分け

- 3) 自動メッシュでない場合、全要素に番号を付けます。

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

- 4) 自動メッシュでない場合、全節点に番号を付けます。

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

節点番号は、規則正しく、短い構造形状（すなわち要素の少ない）方向に入力するのがコツです。そうすれば、バンド幅を最小にできます。

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

- 5) 自動メッシュでない場合、節点座標を算出しておきます。

すべての四角形要素の頂点節点の座標を求めておきます。要素の辺が直線の場合、中間節点座標は、「FEM断面データ」ソフトに自動計算機能があるので求めておかなくても構いません。なお、要素の辺が円弧等の場合、節点座標の算出に表計算ソフトを利用すると便利です。

6) 材料物性データを用意します。

表4-1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4-1 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_z	磁化 M_x, M_y
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_z ：単位面積当りの値
 磁化密度 M_x, M_y ：単位体積当りの値

①透磁率 μ

透磁率 μ は、(1-18)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4-6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、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。

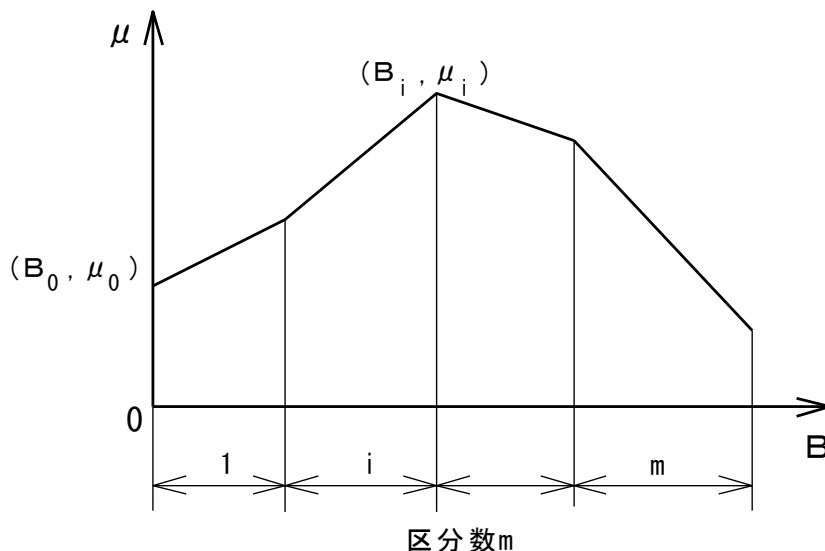


図4-6 透磁率 μ の変化区分（静磁界のみ）

②電流密度 J_z

J_z は2次元平面に垂直なZ軸方向の電流密度で、軸対称体の場合はZ軸方向の代わりに円周P方向の J_p を用います。それら座標軸の関係を図4-7に示します。同図のように、軸対称体の場合に θ 方向と反対のP方向を用いるのは、2次元平面の垂直方向と同じ向きに揃えるためです。

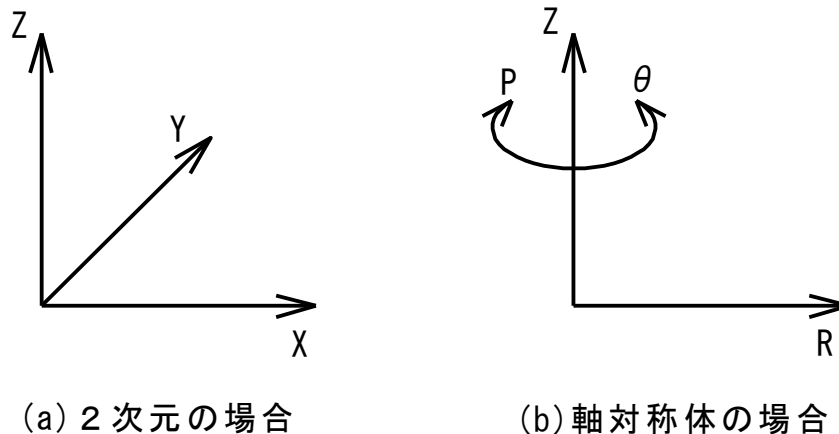


図4-7 構造平面に垂直方向の座標関係

③磁化 M_x 、 M_y

M_x 、 M_y は2次元の場合で、軸対称体の場合は M_r 、 M_z になります。また、(1-72)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。

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (1-72) \text{再掲}$$

7) 境界条件と負荷条件を決めます。

表4-2に各解析種類の境界条件と負荷条件の項目を示します。なお、負荷条件項目の内、材料物性として与えるものは表4-1に掲載してあります。

表4-2について、以下に補足説明します。

①磁気ポテンシャル A_z

A_z は2次元平面に垂直なZ軸方向の磁気ポテンシャルで、軸対称体の場合はZ軸方向の代わりに円周P方向の A_p を用います。それら座標軸の関係は上記の図4-7に示した通りです。

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、外周や内周の境界の節点について、節点値も境界辺の流束値も入力指定されない場合、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、流束値が指定されている境界辺の節点で、境界節点値を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。

[軸対称体で中心軸節点の場合]

境界設定区分で自動を選択すると、解析計算時に中心軸節点の節点値は自動的

に非固定となります。従って、中心軸節点については入力データでの境界設定を省略できます。

③境界辺の流束

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。

表4-2 境界条件と節点負荷条件の項目

解析種類	境界節点値	境界辺の流束値	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 $\left(= -\mu \frac{\partial \phi_m}{\partial n} \right)$	なし
3) 静磁界 (電流有り)	磁気ポテンシャル A_z	流束 q $\left(= -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial n} \right)$	電流
4) 準定常電磁界 (渦電流)	磁気ポテンシャル A_z (0の値のみ)	流束 q $\left(= -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial n} \right)$ (0の値のみ)	なし

8) 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4-3にS I 単位系を示しておきます。

表4-3 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) $A = C/s$ 、 $F = C/V$ 、 $H = Wb/A$ 、 $T = Wb/m^2 = N \cdot s / C \cdot m$
 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)、 Wb (ウェーバー)、 N (ニュートン)、 s (秒)

9) 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は次の点に注意しなければなりません。

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

10) 構造モデルの移動

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

11) 構造の合成

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

〔構造の合成方法〕

- ①2つの構造を組合せます。
- ②片方の構造をベース構造、他方を追加構造と呼びます。
- ③ベース構造の要素および節点はそのまま保持されます。
- ④2つの構造で同一の座標位置の節点どうしを重ね合わせます。

◇節点どうしを重ね合わせたときに、要素が正しく接続されるように配慮しておく必要があります。

◇合成の際に、追加構造を平行・回転移動させることも可能です。

⑤追加構造の要素番号と節点番号は、ソフト内で自動的に付番し直します。

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

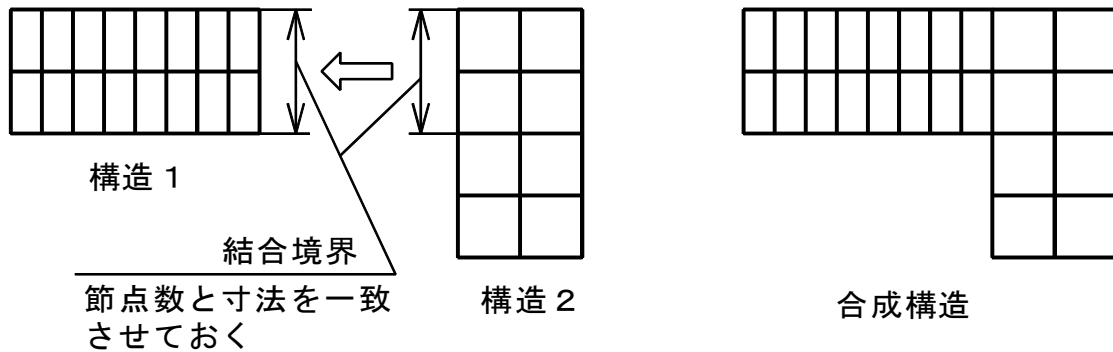


図4-8 構造の合成の説明図

第5章 「解析データ」処理プログラム

5.1 サブメニュー画面

「メニュー」プログラムにおける「解析データ」のサブメニュー選択画面を図5-1に示します。同図に示すように、10個のサブメニューがあります。全く新たにデータを作成する場合は「データ入力・修正」を選択しますが、既存ファイルを修正して新たなファイルを作成する場合は先に「ファイル読み込み」を行ないます。

また、「オプション」では、3つの項目についてチェックの有無により採否を選択できます。「バックアップファイル作成」は、データ読み込み時にバックアップファイル（.bak）を自動作成するものです。

◇「FEM断面データK」ソフトによる本解析用データファイルを読み込みます。

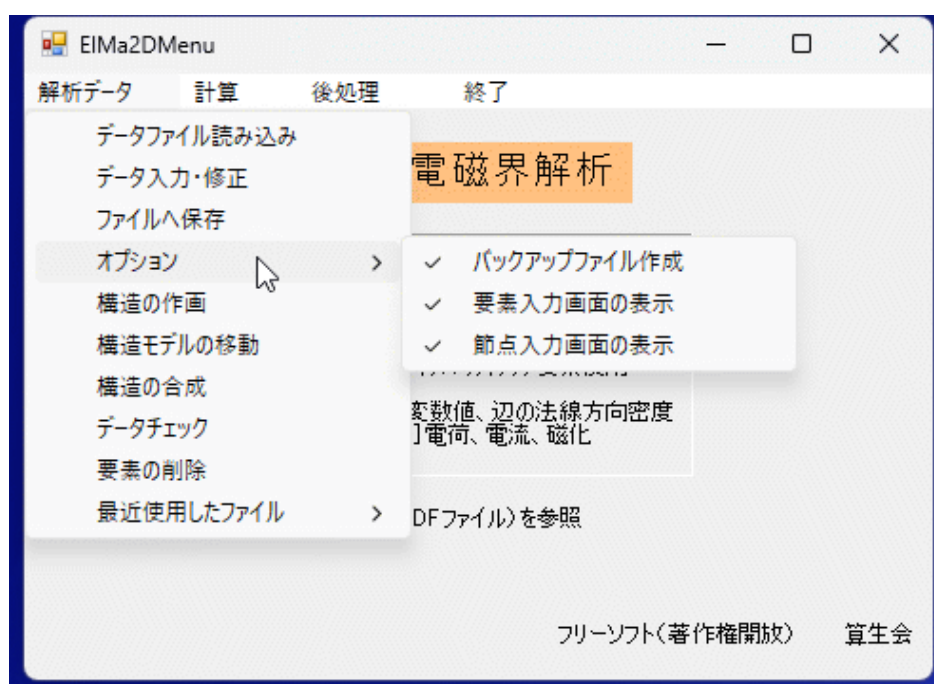


図5-1 「解析データ」サブメニュー画面

5.2 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。

5.3 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5-2～5-5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5-2では図4-1の例題を取り上げており、以降も同じです。本画面の入力について、以下に補足説明します。

①タイトルは、任意の題名を入力できます。

- ②問題のタイプは、2次元なら2、軸対称体なら4を入力します。
- ③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。
- ④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（含辺）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。
- ◇自動を選択すると、軸対称体で中心軸節点の場合、解析計算時に中心軸節点は自動的に非固定となるので、入力データで境界設定しなくて構いません。
- ◇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。非自動の選択は、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。
- ⑤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④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（含辺）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）固定境界の辺に含まれるか、境界固定・非固定節点として非固定指定を行なうかが必要です。
- ◇流束（電束等）固定境界については、流束値が0の辺は入力不要です。
- ⑥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。
- ⑦各データ入力終了すると、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5-3の静磁界（電流なし）のデータ仕様入力画面は、図5-2と同様です。

図5-4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5-5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。

注) 磁気ベクトルポテンシャルAは、2次元では A_z 、軸対称体では A_ρ になります。

ElMa2DDat1

データを入力してください。

タイトル

問題のタイプ(2次元=2, 軸対称体=4)

節点数 要素数

材料データ数

電位固定・非固定の節点数

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

電束固定境界の辺の数(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5-2 データ仕様入力画面（静電界）

ElMa2DDat1

データを入力してください。

タイトル

問題のタイプ(2次元=2, 軸対称体=4)

節点数 要素数

材料データ数

磁位固定・非固定の節点数

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

磁束固定境界の辺の数(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5-3 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

問題のタイプ(2次元=2, 軸対称体=4)

節点数 要素数

材料データ数

Ap固定・非固定の節点数

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

流束q 固定境界の辺の数(数値0は不要)

電流負荷の節点数

注) Apの添え字pは、Z軸の左回り方向を表わします。

設定
中止
すべて確定

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5-4 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

問題のタイプ(2次元=2, 軸対称体=4)

節点数 要素数

材料データ数

Az固定・非固定の節点数

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

正弦波周波数(Hz)

設定
中止
すべて確定

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5-5 データ仕様入力画面（準定常電磁界）

5.4 要素データ入力画面（オプションで省略可能）

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

例）図5-7の入力順は、1、4、6、7、8、5、3、2（どの頂点が先頭でも可）

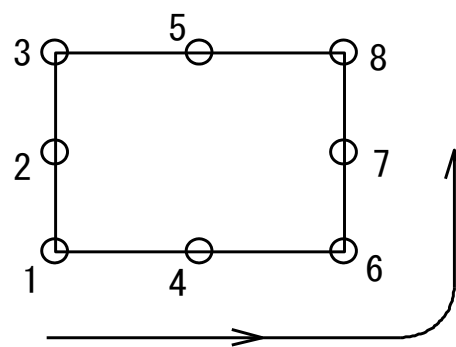


図5-7 要素の節点番号の入力順序（左回り）

- 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。

要素番号	材料番号	節点順 1	節点順 2	節点順 3	節点順 4	節点順 5
1	1	1	12	18	19	20
2	1	3	13	20	21	22
3	1	5	14	22	23	24
4	1	7	15	24	25	26
5	1	9	16	26	27	28
6	1	18	29	35	36	37
7	1	20	30	37	38	39
8	1	22	31	39	40	41
9	1	24	32	41	42	43
10	1	26	33	43	44	45
11	1	35	46	52	53	54
12	1	37	47	54	55	56
13	1	39	48	56	57	58
14	1	41	49	58	59	60
15	1	43	50	60	61	62

図5-6 要素データ入力画面

5.5 節点データ入力画面（オプションで省略可能）

図5-8に節点データ入力画面を示します。自動メッシュだけで済む場合は変更不要です。

- ①各節点の座標を入力します。
- ②四角形要素辺の中間節点は、辺が直線ならば、後で「中間節点自動計算」を実施できるので、本画面では入力しなくても構いません。ただし、辺が円弧等の曲線の場合は、直線辺の「中間節点自動計算」の後で、本画面で中間節点座標を最後に入力します。
- ③「一括定数掛算」ボタンをクリックして定数値を入力し、全座標に一括掛算することができます。

◇本機能により、座標値の単位を変更したり、構造を拡大・縮小したりできます。

- ④すべての節点データを入力し終ったなら、「設定」ボタンをクリックして次の画面に移ります。

図5-8 節点データ入力画面

5.6 材料データ入力画面（静電界、準定常電磁界）

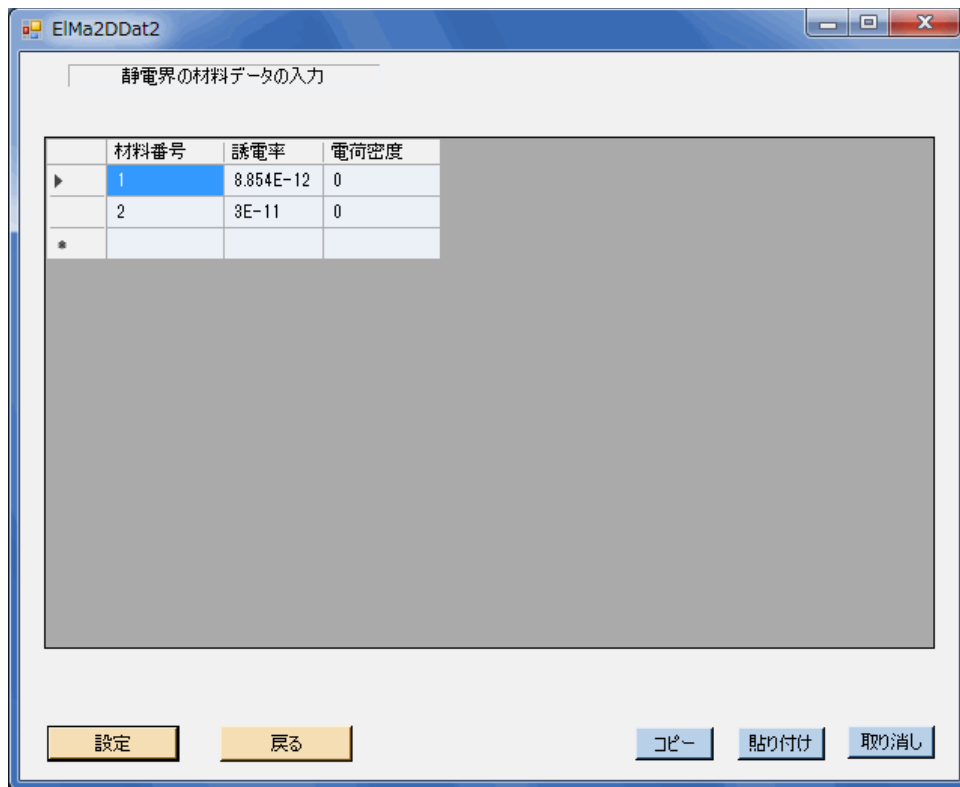
図5-9に材料データ入力画面（静電界）を示します。準定常電磁界の場合は、データ項目が異なるだけです。なお、静磁界の場合は、本画面がなく、次項の材料物性区分数の入力画面となります。

- ①各材料毎に物性データを入力します。

[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。

- 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。



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

図5-9 材料データ入力画面（静電界）

5.7 材料物性区分数の入力画面（静磁界）

図5-10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各材料毎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。

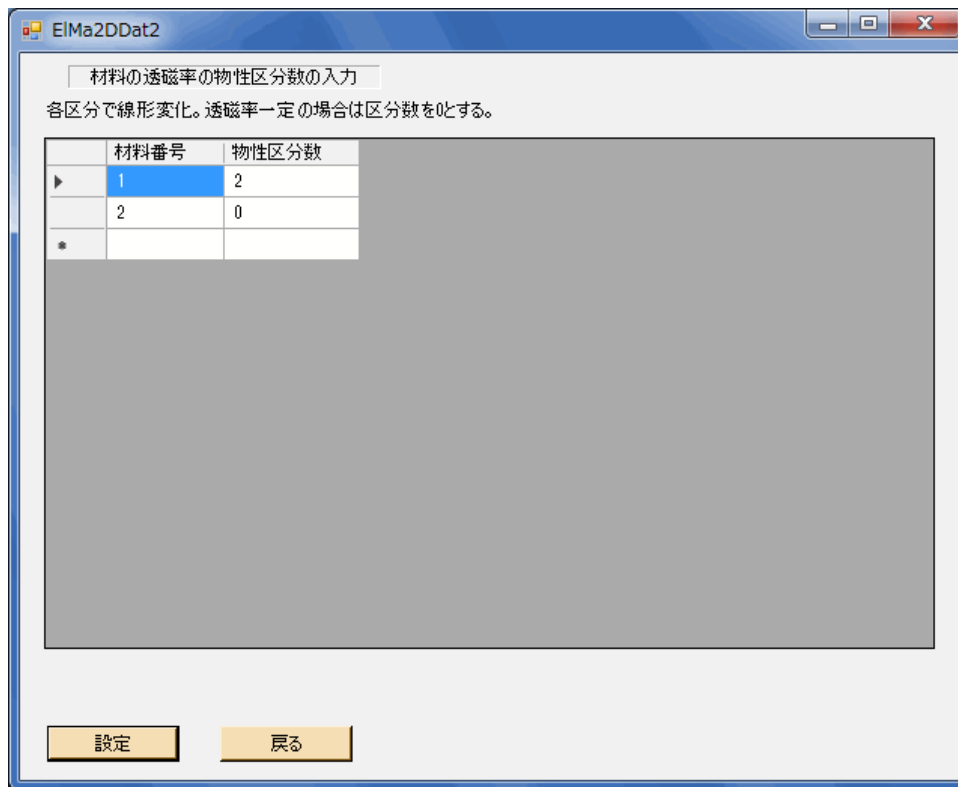


図5-10 材料物性区分数の入力画面（静磁界）

5.8 境界固定・非固定節点データ入力画面

本入力は、境界変数固定・非固定の節点数が1以上にのみ実施します。図5-11、図5-12に静電界と準定常電磁界（渦電流）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、データ項目が異なるだけです。

- 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、拘束区分、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となります。
 - 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。

ElMa2DDat2

電位固定・非固定の節点の入力 [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	113	1	1
	2	119	1	1
	3	130	1	1
	4	136	1	1
	5	147	1	1
	6	388	1	1
	7	389	1	1
	8	390	1	1
	9	391	1	1
	10	392	1	1
	11	393	1	1
	12	394	1	1
	13	395	1	1
	14	620	1	1
	15	629	1	1

節点番号に-1を入力すると、その行を削除・前詰めします。

設定 戻る 一括コピー コピー 貼り付け 取り消し

図5-11 境界固定・非固定節点データ入力画面（静電界）

ElMa2DDat2

Az固定・非固定の節点の入力 [拘束区分] 0:非固定、1:固定

Az: 面に垂直方向(Z軸方向)のベクトルポテンシャル

	固定番号	節点番号	Az拘束	Az値
▶	1	1	0	0
	2	2	0	0
	3	3	0	0
	4	9	0	0
	5	10	0	0
	6	14	0	0
	7	15	0	0
	8	19	0	0
	9	20	0	0
	10	140	0	0
	11	141	0	0
	12	145	0	0
	13	146	0	0
	14	150	0	0
	15	151	0	0

節点番号に-1を入力すると、その行を削除・前詰めします。

設定 戻る 一括コピー コピー 貼り付け 取り消し

図5-12 境界固定・非固定節点データ入力画面（準定常電磁界）

5.9 流束固定境界データ入力画面

本入力は、流束固定境界の辺の数が1以上にのみ実施します。図5-13に流束固定境界データ入力画面（静磁界）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解析種類により呼び方が異なります。

- ①流束固定境界の辺の数の分だけ番号が表示されているので、それぞれ辺の節点番号3個と流束値を入力します。

◇辺の節点番号3個は必ず要素を左側に見る順序で入力します（図5-5に示した要素の節点番号入力順序と同様）。

◇流束値は、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辺節点1 番号に「-1」を入力すると、その行を削除して前詰めします。
- 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、辺の節点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。

磁束固定境界の入力 辺の3節点は物体を左側に見て進む順に入力

磁束密度 q : 流出が正

番号	辺節点1	辺節点2	辺節点3	磁束密度 q
1	130	436	437	.001
2	437	438	439	.001
3	439	440	441	.001
4	441	442	443	.001
5	451	450	449	-.001
6	449	448	447	-.001
7	447	446	445	-.001
8	445	444	232	-.001
9	232	221	215	-8.33E-05
10	215	204	198	-5E-05
11	198	187	181	-1.67E-05
12	181	170	164	1.67E-05
13	164	153	147	5E-05
14	147	136	130	8.33E-05
15	443	720	729	8.33E-05

辺節点1 に-1を入力すると、その行を削除・前詰めします。

設定 戻る 一括コピー コピー 貼り付け 取り消し

図5-13 流束固定境界データ入力画面（静磁界）

5.10 節点負荷データ入力画面

本入力、負荷の節点数が1以上にのみ実施します。図5-14に節点負荷データ入力画面（静電界）を示します。なお、ここでは一般的に負荷と称しますが、静電界では電荷、静磁界（電流有り）では電流というように解析種類により呼び方が異なります。

- 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。

	負荷番号	節点番号	電荷
▶	1	107	2E-08
	2	235	1E-08
*			

節点番号に-1を入力すると、その行を削除・前詰めします。

設定 戻る コピー 貼り付け 取り消し

図5-14 節点負荷データ入力画面（静電界）

5.11 材料データ入力画面（静磁界）

図5-15に材料データ入力画面（静磁界、電流有り）を示します。本画面は静磁界の場合だけで、他の解析種類は5.6節に掲載した通りです。

- ①電流密度と各座標軸方向の磁化は、物性区分によらない共通の値を入力します。
 - ◇電流密度か各座標軸方向の磁化か、いずれか片方しか設定できません。なお、磁化 M_x 、 M_y の双方を設定することはできます。
 - ◇静磁界の電流なしでは、これらの入力項目は表示されません。
- ②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以上の場合は、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設定しておきます。
- 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に移ります。すべての材料番号について終了すると、図5-3、図5-4のデータ仕様入力画面に戻ります。

材料データの入力

材料番号 1 電流密度 0

電流密度は面に垂直方向(Z軸左回り円周方向)の値

磁化 Mr 0 磁化 Mz 0

	区分端番号	磁束密度	透磁率
▶	0	0	.001
	1	.03	.0015
	2	.1	.002
*			

コピー
貼り付け
取り消し

設定 戻る

図5-15 材料データ入力画面（静磁界、電流有り）

5.12 ファイルへの保存

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

◇保存ファイルの文字コードはUTF-8です。

◇1行内の複数データは、「,」（コンマ）で区切られます。

図5-16に入力データファイル例を示します。

```

プログラム名, EleMag2D
静電界モデル
問題のタイプ (2: 2次元、4: 軸対称体), 2
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, 961
要素数, 292
材料データ数, 2
電位固定・非固定の節点数, 32
電束固定境界の辺の数, 0
電荷の節点数, 0
ガウス積分点数, 3
1節点当り変数の数, 1
材料データの成分数, 2
要素データ (要素番号、材料番号、8節点番号)
1, 1, 1, 12, 18, 19, 20, 13, 3, 2
2, 1, 3, 13, 20, 21, 22, 14, 5, 4
3, 1, 5, 14, 22, 23, 24, 15, 7, 6
4, 1, 7, 15, 24, 25, 26, 16, 9, 8
5, 1, 9, 16, 26, 27, 28, 17, 11, 10
6, 1, 18, 29, 35, 36, 37, 30, 20, 19
7, 1, 20, 30, 37, 38, 39, 31, 22, 21
8, 1, 22, 31, 39, 40, 41, 32, 24, 23
9, 1, 24, 32, 41, 42, 43, 33, 26, 25
10, 1, 26, 33, 43, 44, 45, 34, 28, 27
. . . . .
. . . . .
288, 2, 927, 940, 951, 952, 953, 941, 929, 928
289, 2, 929, 941, 953, 954, 955, 942, 931, 930
290, 2, 931, 942, 955, 956, 957, 943, 933, 932
291, 2, 933, 943, 957, 958, 959, 944, 935, 934
292, 2, 935, 944, 959, 960, 961, 945, 937, 936
節点データ (節点番号、X座標、Y座標)
1, 0, 0
2, 0, .005
3, 0, .01
4, 0, .015
5, 0, .02
6, 0, .025
7, 0, .03
8, 0, .035
9, 0, .04
10, 0, .045
. . . . .
. . . . .
957, .2, .13
958, .2, .135
959, .2, .14
960, .2, .145
961, .2, .15

```

図5-16 (1/2) 入力データファイル例

材料データ（材料番号、誘電率、電荷密度）			
1,	8.854E-12,	0	
2,	3E-11,	0	
< 電位固定・非固定の境界 >			
固定番号、節点番号、電位拘束、電位値			
1,	113,	1,	1
2,	119,	1,	1
3,	130,	1,	1
4,	136,	1,	1
5,	147,	1,	1
6,	388,	1,	1
7,	389,	1,	1
8,	390,	1,	1
9,	391,	1,	1
10,	392,	1,	1
.....			
.....			
28,	422,	1,	2
29,	423,	1,	2
30,	767,	1,	2
31,	776,	1,	2
32,	793,	1,	2

図5-16 (2/2) 入力データファイル例

5.13 構造の作画

サブメニューの「構造の作画」を選択すると、構造図が画面に作画されます。図5-17に構造作画の画面例を示します。同図は本画面に移った状態のもので、作画のパラメーターは標準条件になっています。

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

◇マウスドラッグ矩形は、拡大したい部分の左上隅にマウスを移動し、そこでマウスの左ボタンを押し、その左ボタンを押した状態で拡大部分の右下隅までマウスを移動させ、そこで左ボタンを離します。そうしますと、図5-18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（8 節点）が選択領域に入っている要素だけがすべて拡大の対象となります。

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

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

◇「番号表示の文字サイズ」は任意の値に設定できます。

◇「要素番号」、「節点番号」を選択して、「再描画」させた部分拡大画面を図5-19に示します。

- ⑦「条件設定部の表示」は、「電位固定・非固定節点（緑色）」、「電束固定辺・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で表示されます。図5-20に、電束固定境界の辺を追加して、表示の両項目とも選択した構造図を示します。

- ⑧任意の要素を右クリックすると、図5-21のように当該要素の各番号が表示されます。

◇ESCキーを押すと上記の番号表示が解除されます。

- ⑨「データ設定モード」を選択して、任意の要素を右クリックすると図5-22のようにデータ項目選択画面が出て、境界条件等のデータ入力・変更を実施できます。

◇図5-22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5-23のデータ入力画面に移ります。同図は境界固定・非固定節点データの入力画面ですが、他のデータ項目でも同様です。同図でのデータ入力は、前述の「データ入力・修正」サブメニュー以降の各データ入力画面と同様です。なお、「材料番号」以外の本画面では、表の最下行にデータを追加できるようになっています。図5-23で「設定」ボタンをクリックすると、データ変更が実施されます。

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

◇さかのぼれる描画の数は最大8つです。

- ⑪「Ctrlキー+マウス」で矩形ドラッグすると、図5-24のようにデータ項目選択画面が出て、境界条件等のデータを一括設定できます。矩形の囲む必要範囲は、条件項目により有限要素、要素辺、または節点の任意の領域となります。ただし、要素辺は外周の辺（穴の辺を含む）に限定されます。

◇条件項目に必要な要素・辺・節点を選択されていない場合は、エラーメッセージが出ます。

◇図5-24の画面でいずれかのデータ項目を選択し、「設定」ボタンをクリックすると図5-25のデータ入力画面に移ります。同図は境界固定・非固定節点データの入力画面ですが、他のデータ項目でも同様です。同図でのデータ入力は、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5-25で「設定」ボタンをクリックすると、データが一括設定され、図5-26のように構造画面に反映されます。また、「一括削除」ボタンをクリックすると、既存のデータが一括して削除されます。

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

◇「通常画面」の作画が印刷されます。

- ⑬本画面を終了するには、「中止」ボタンをクリックします。

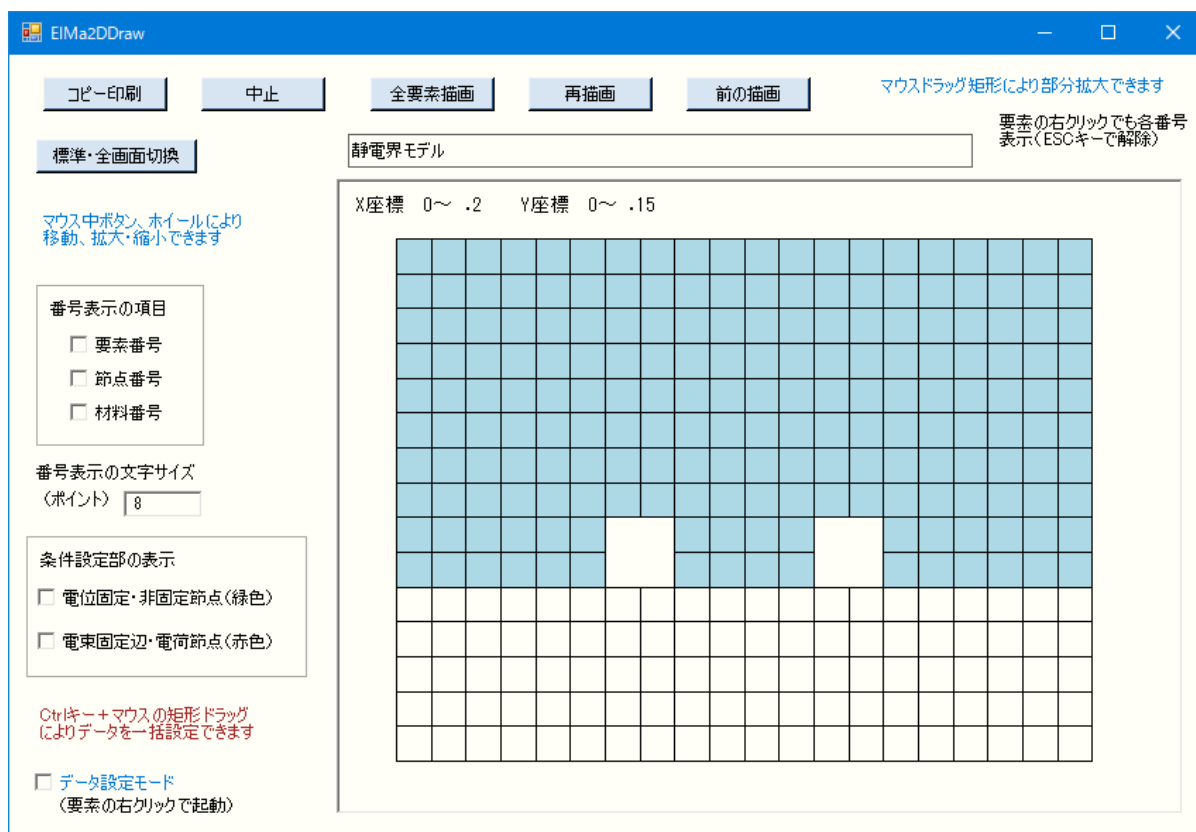


図5-17 構造作画の画面例

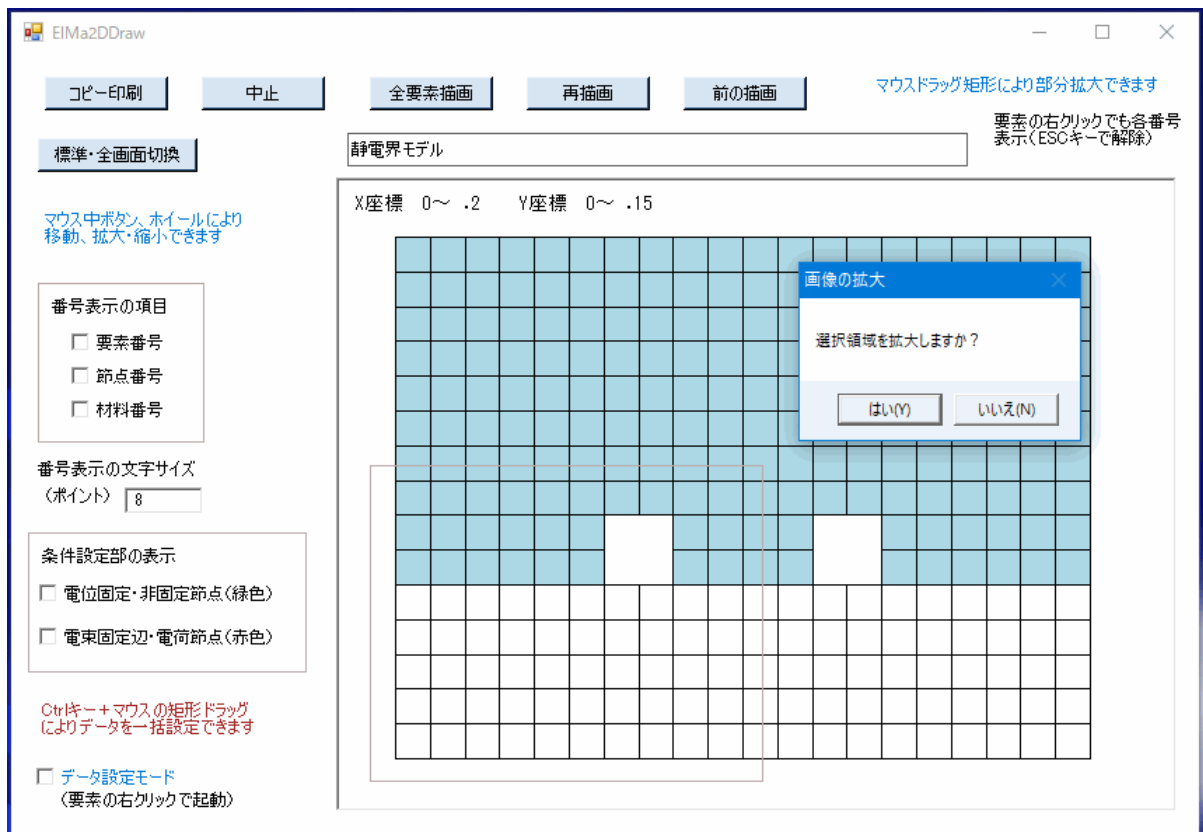


図5-18 構造作画における拡大領域選択例



図5-19 構造作画の部分拡大例

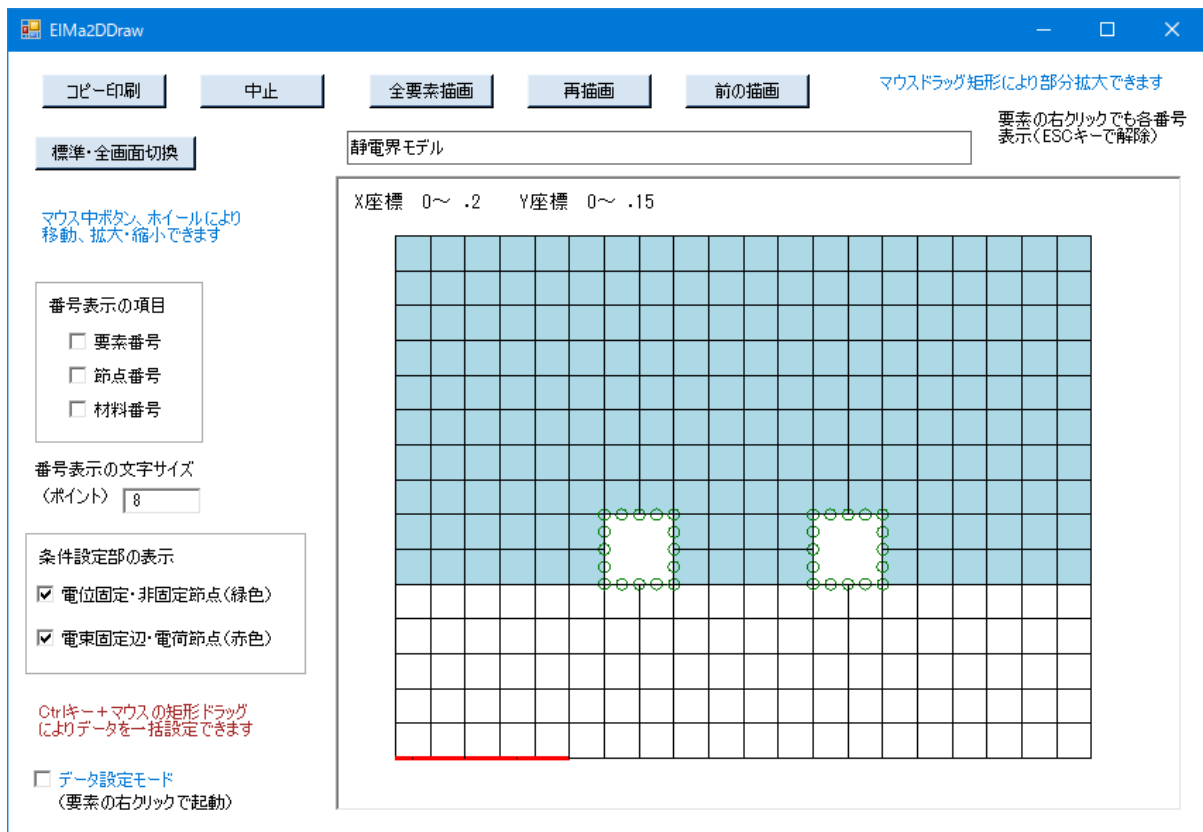


図5-20 構造作画の条件設定部の表示有りの画面例

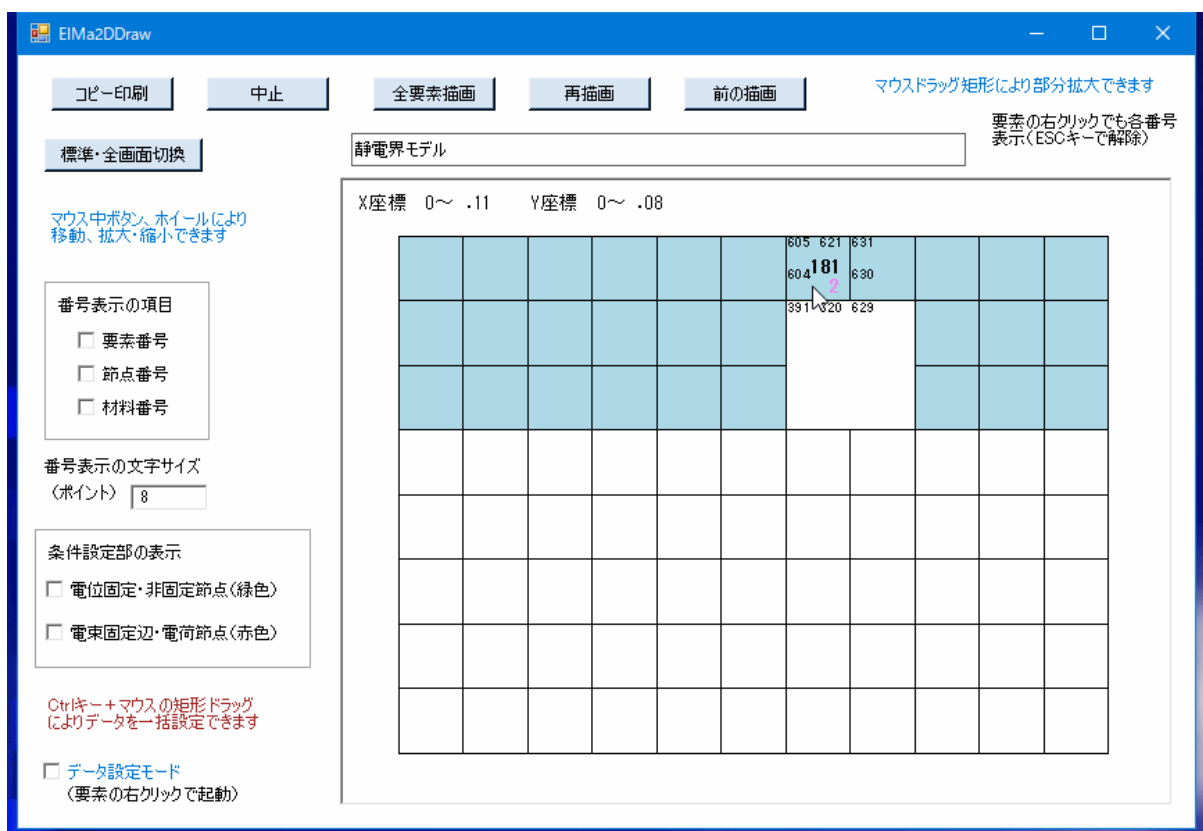
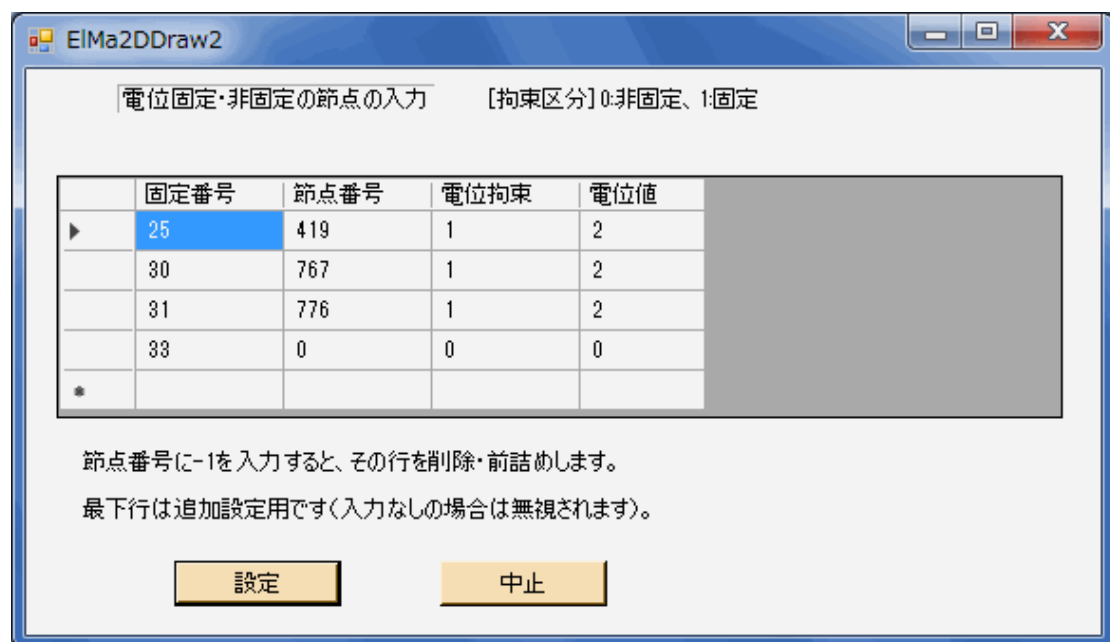
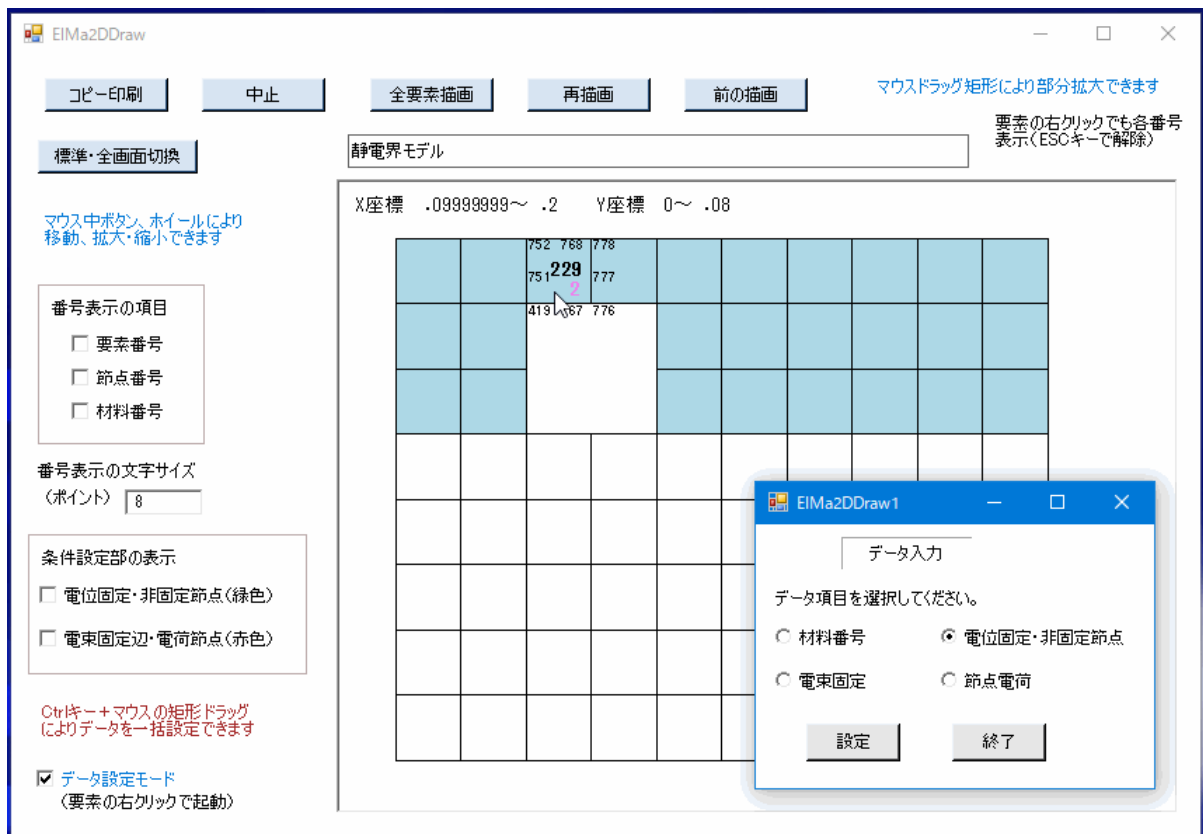


図5-21 構造作画における要素右クリック画面例



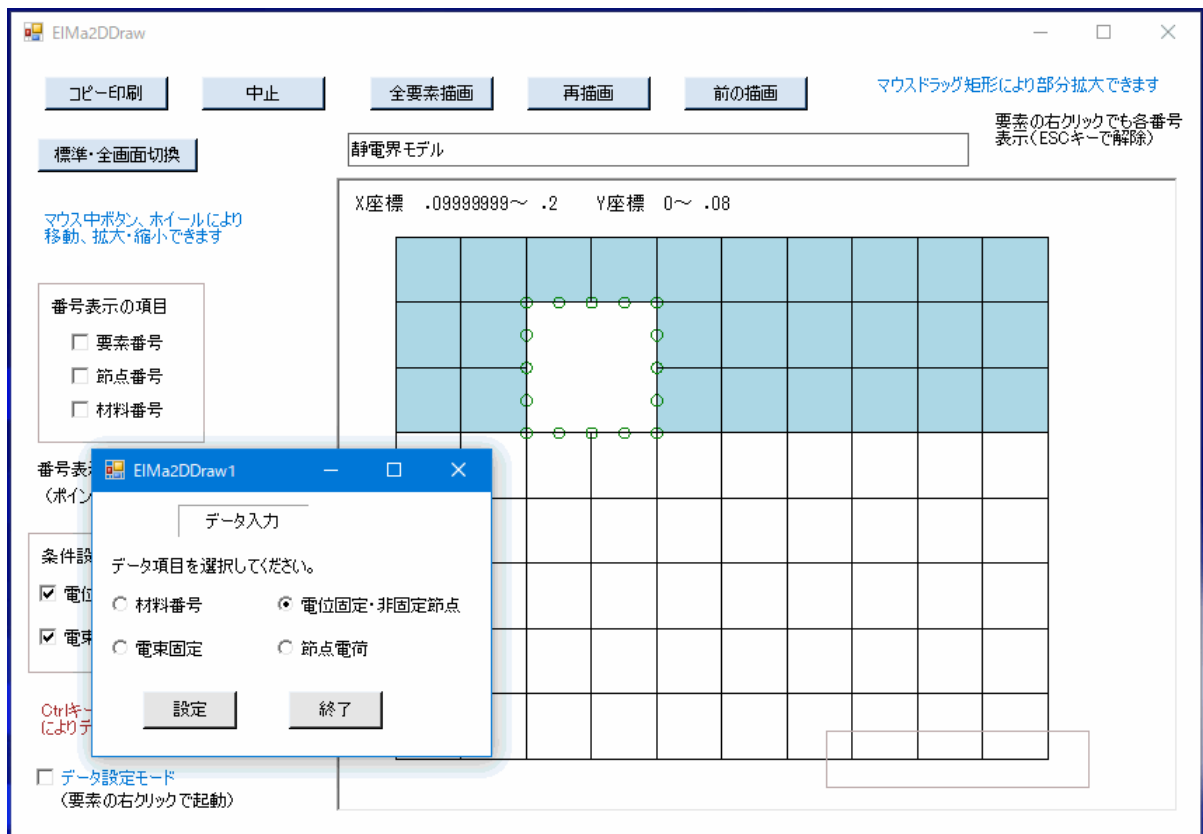


図5-24 構造作画の「Ctrlキー+マウス」ドラッグ矩形によるデータ項目選択画面

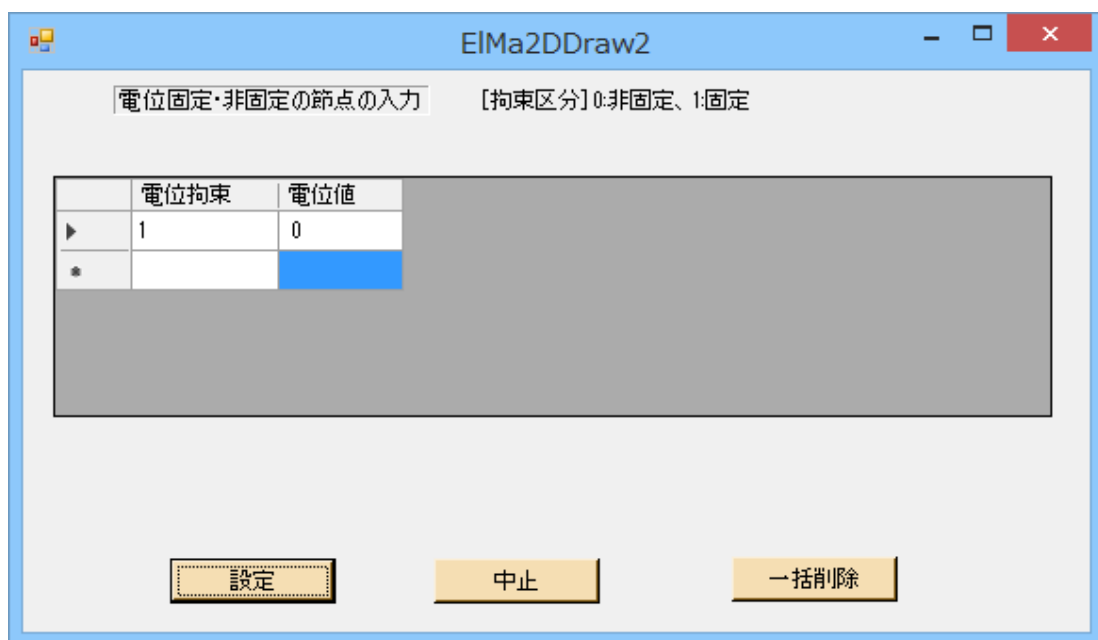


図5-25 構造作画における一括設定データ入力画面例（境界固定・非固定節点の場合）

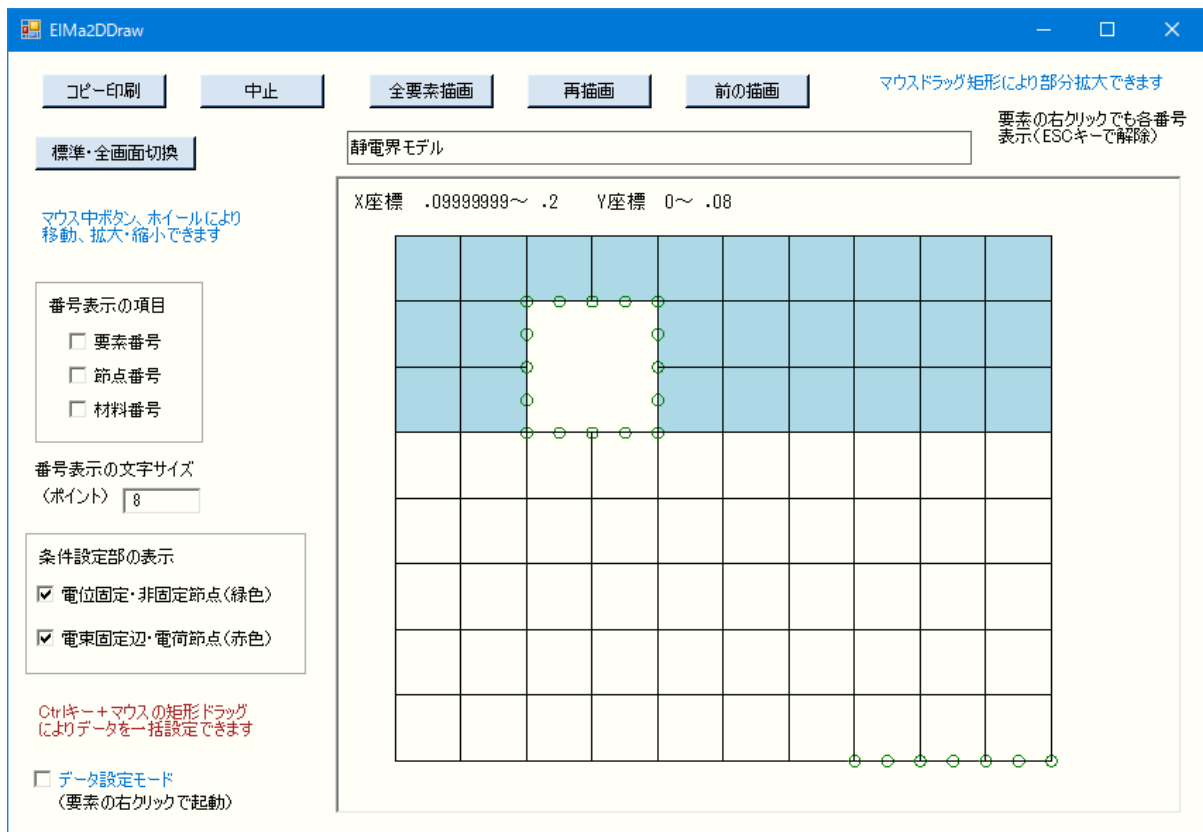


図5-26 一括設定終了後の構造作画の画面例（境界固定・非固定節点の場合）
注）下側右部に電位固定・非固定節点の追加表示

5.14 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5-27の移動量入力画面となります。同画面で、平行移動の各座標軸方向の移動量、および原点回りの回転角を入力します。同図に示すように、移動の順序は、原点回りの回転、次にX, Y軸方向（またはR, Z軸方向）の平行移動となります。もし、違う順序で移動させたい場合は、「構造モデルの移動」を繰り返し実施することにより可能です。その際は、繰り返し途中の生成データをファイルへ保存する必要はなく、最終の生成データのみをファイル保存すればよいです。

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

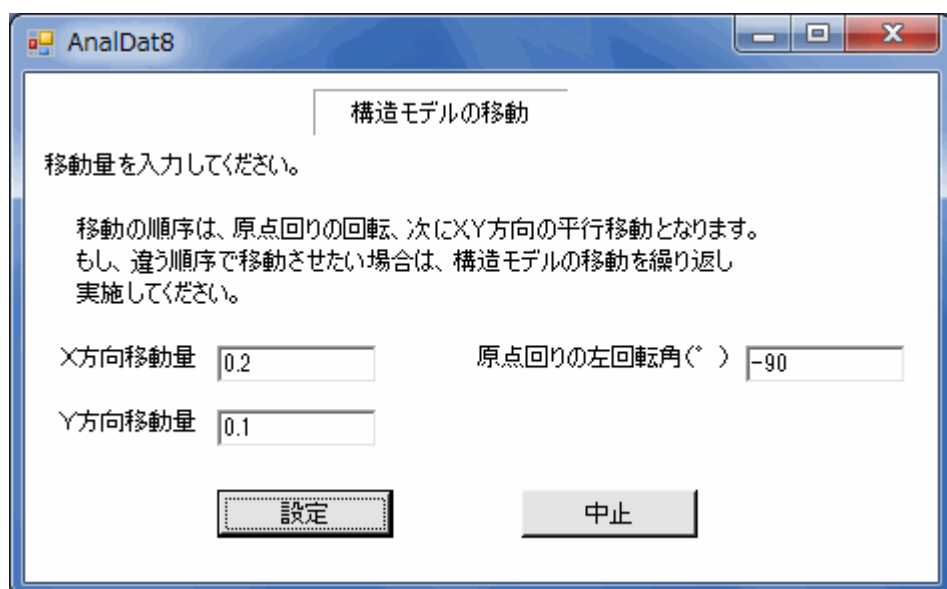


図5-27 構造モデルの移動量入力画面

5.15 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5-28の合成ファイル設定画面となります。

① 同画面で、ベースファイルと追加ファイルを設定します。「ベースファイル名」ボタン、または「追加ファイル名」ボタンをクリックすると、コモンダイアログでファイルを開く画面となり、それぞれの構造データファイル（入力データファイルに同じ）を選定して読み込みます。

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

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

◇「結合点1個所指定（回転なし）」とは、追加構造を平行移動して指定の節点どうしで結合するという事です。節点の指定は結合方法の下部に表示される第1結合点で行ないます（図5-29参照）。

◇「結合点2個所指定（回転有り）」とは、追加構造を平行・回転移動して2個所の指定節点どうしで結合するという事です。節点の指定は結合方法の下部に表示される第1結合点と第2結合点で行ないます（図5-29参照）。

2) 図5-28の画面で「作画」ボタンをクリックすると、図5-29のように2つの構造図が作画された画面となります。本画面により、合成する構造が間違っていないか確かめることができます。

◇ 結合点を指定した場合は、図5-29のように指定節点が赤丸と青丸で表示されます。

3) 本画面の「設定」ボタンをクリックすると、合成計算が実行されます。計算が終了すると、計算終了確認ボックスが出て、入力データファイルへの保存を問うてきますので、ここで「はい」を選択すると、書き出し用のデータファイル設定画面となり、合成され

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

◇構造が合成されたデータでは、ベース構造の要素番号や節点番号は保持されますが、追加構造の要素番号や節点番号は自動変更されます。また、材料データは、追加構造の材料番号が変わる場合がありますが、物性値は保持されます。

図5-30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。

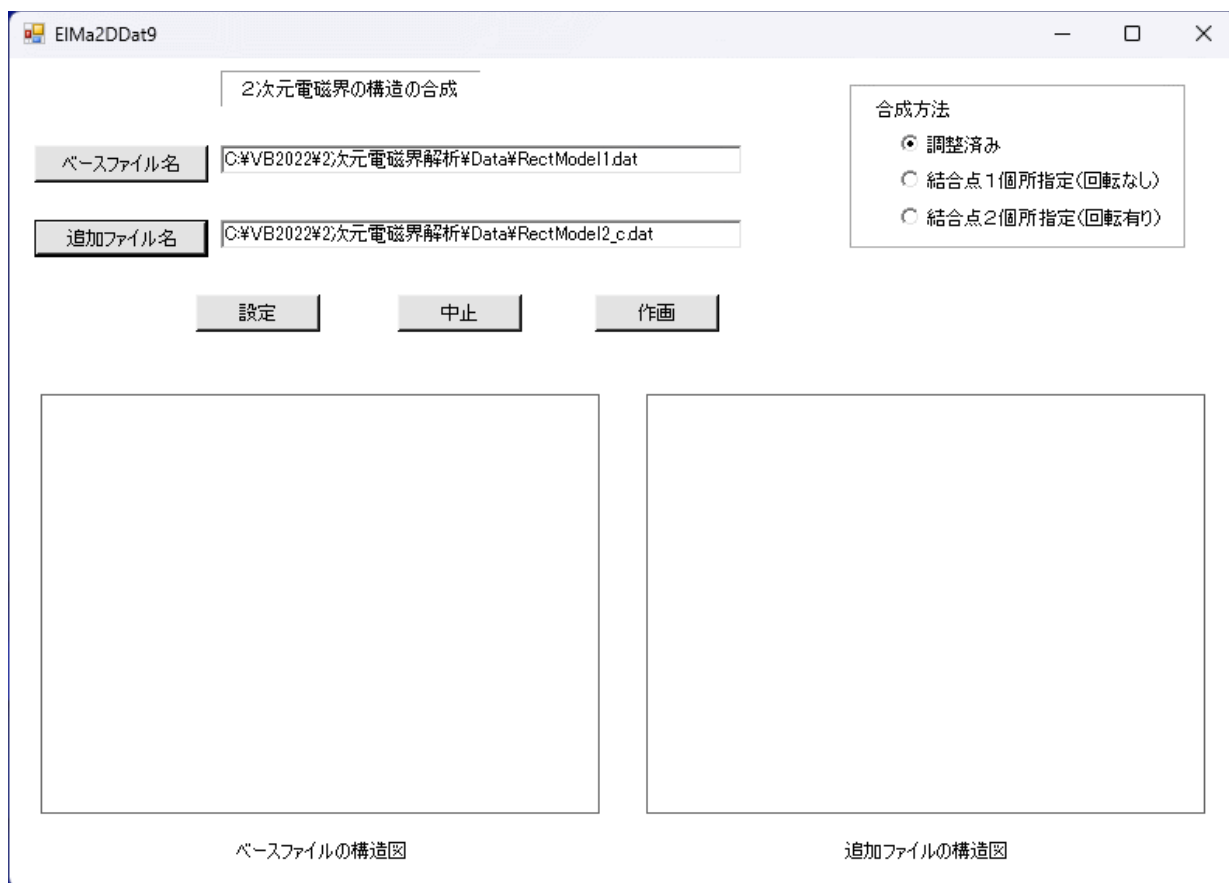


図5-28 合成ファイル設定画面（作画前）

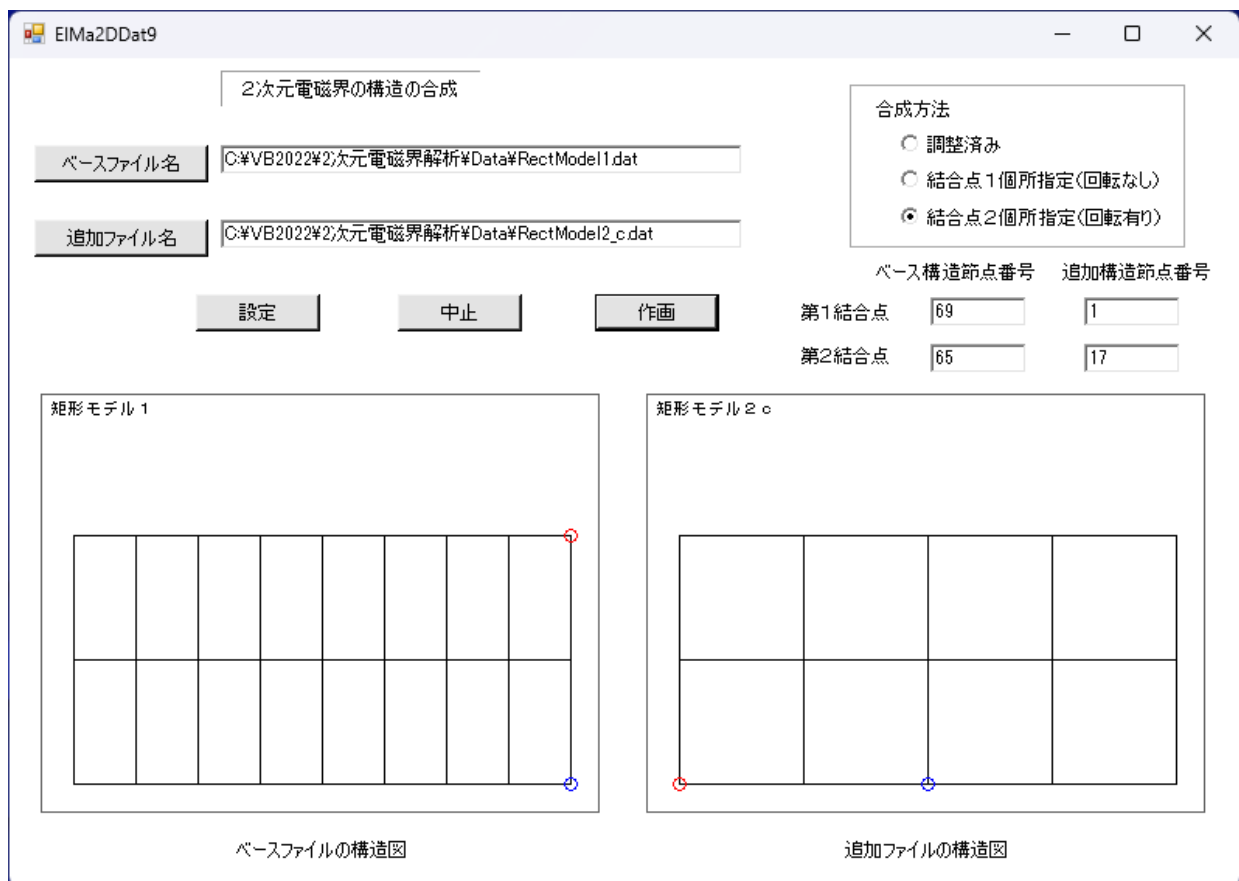


図5-29 合成ファイル設定画面（作画有り）

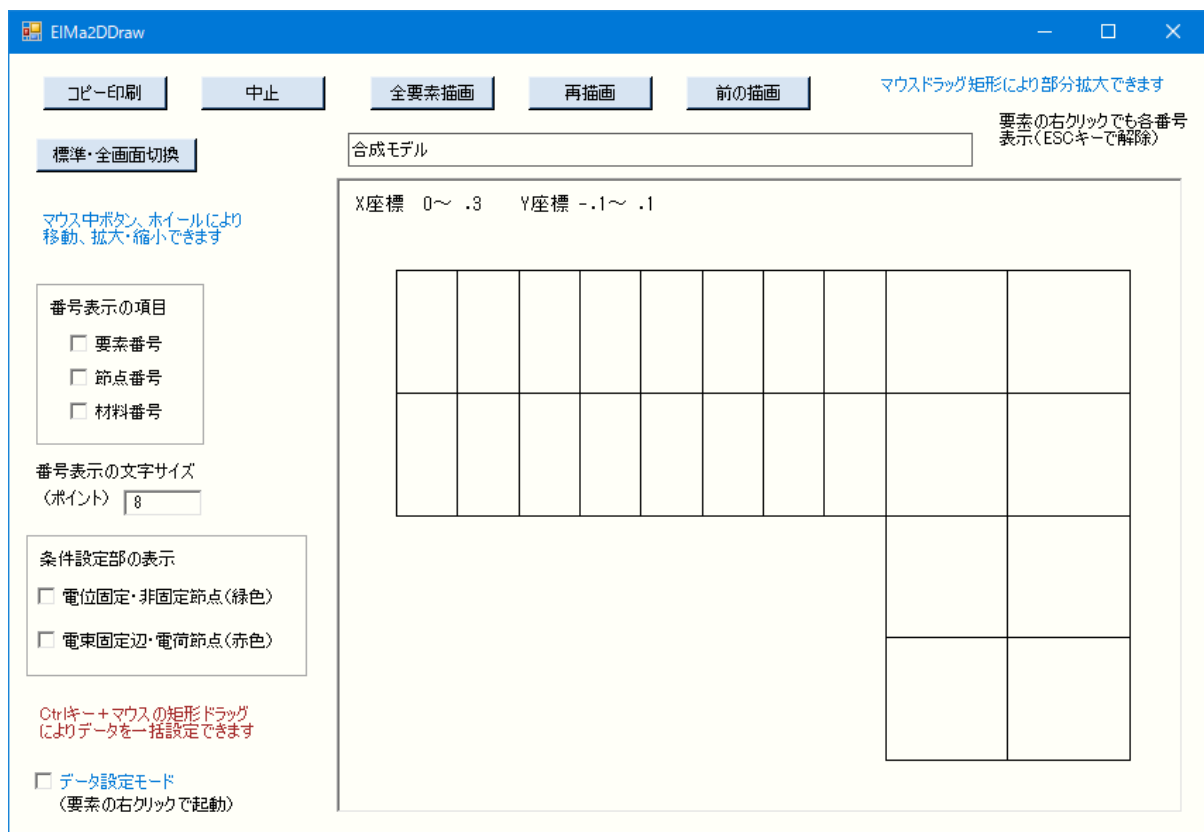


図5-30 合成されたモデルの構造図の画面例

5.16 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。

5.17 要素の削除

サブメニューの「要素の削除」を選択すると、図5-31の削除要素数入力画面となります。

- ①本画面で、削除要素数を入力します。
- ②本画面の「設定」ボタンをクリックすると、図5-32の削除要素番号入力画面に移ります。
- ③削除要素番号の入力画面が終了すると、本画面に戻るので、そこで「すべて確定」ボタンをクリックすると、要素の削除が実行されます。

◇境界条件の節点・辺は、要素削除による番号変更にも自動追従します。

図5-32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。

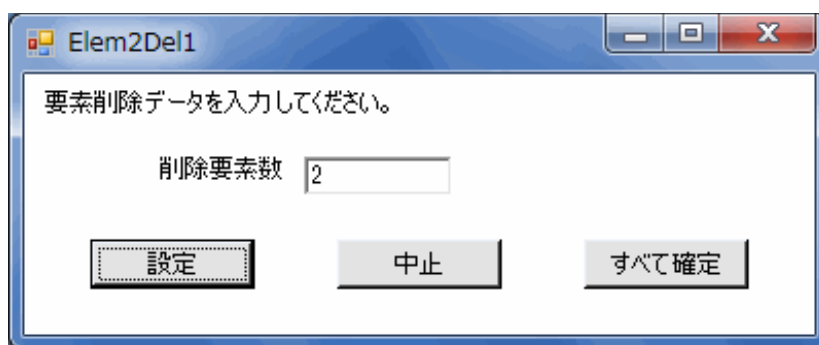


図5-31 削除要素数の入力画面

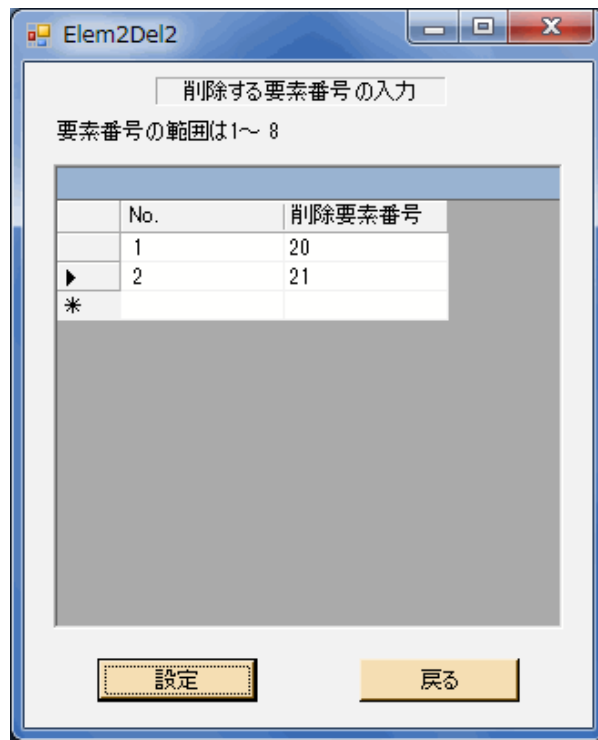


図5-32 削除要素番号の入力画面

5.18 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6章 「計算」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「計算」のサブメニュー画面を図6-1に示します。サブメニューは「解析計算の実行」と「体積計算の実行」の2つがあります。「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、「体積計算の実行」は補助機能であり、6.6節で説明します。

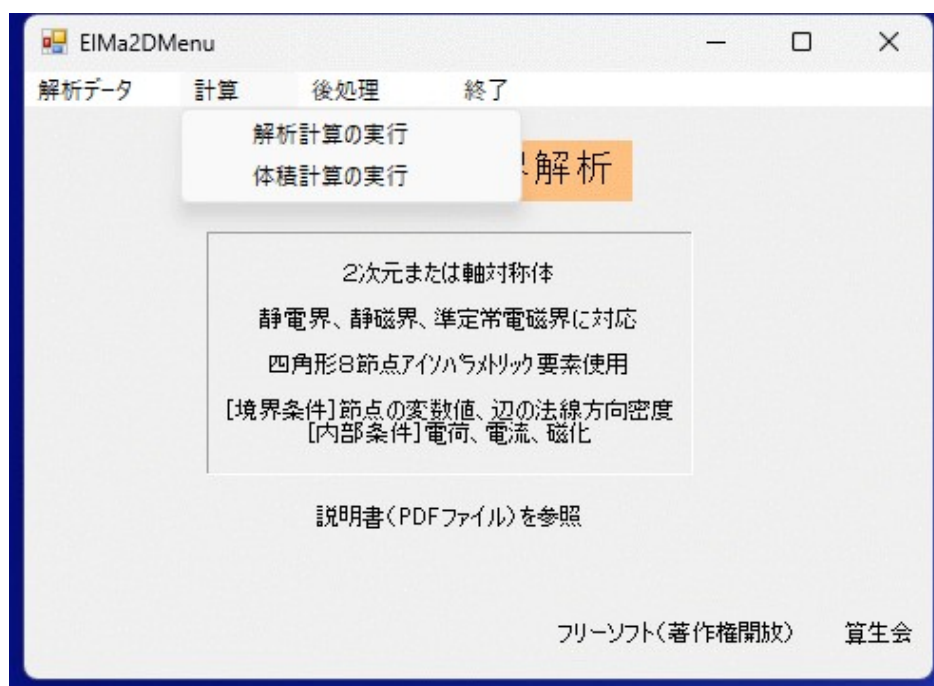


図6-1 「計算」サブメニュー画面

6.2 「計算」ファイル設定

図6-2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、静磁界解析で材料区分数が1以上または電流有りの場合は次の条件入力画面に移り、それ以外はすぐに計算が開始されます。

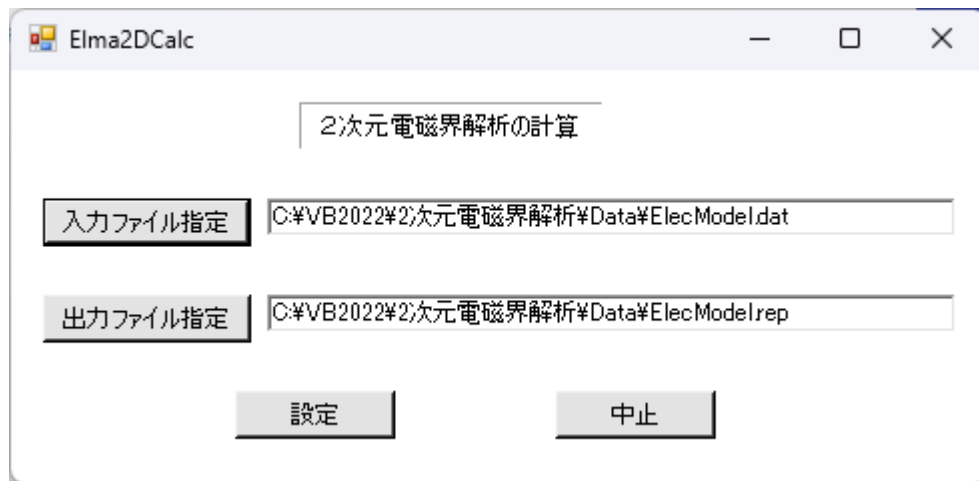


図6-2 「計算」ファイル設定画面

6.3 計算条件入力画面（静磁界で物性区分数が1以上または電流有りの場合）

静磁界で物性区分数が1以上の場合、収束するまで繰返し計算を行なうため、図6-3の計算条件入力画面となります。また、静磁界で電流有りの場合は図6-4の画面になります。先ず、図6-3の画面について説明します。

①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。

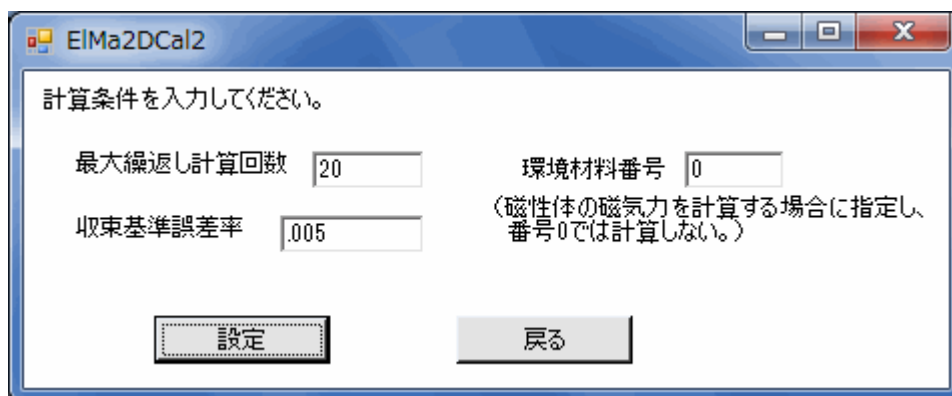


図6-3 計算条件入力画面（静磁界で物性区分数1以上、電流なしの場合）

次に、図6-4の画面について説明します。

- 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6-3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6-3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。

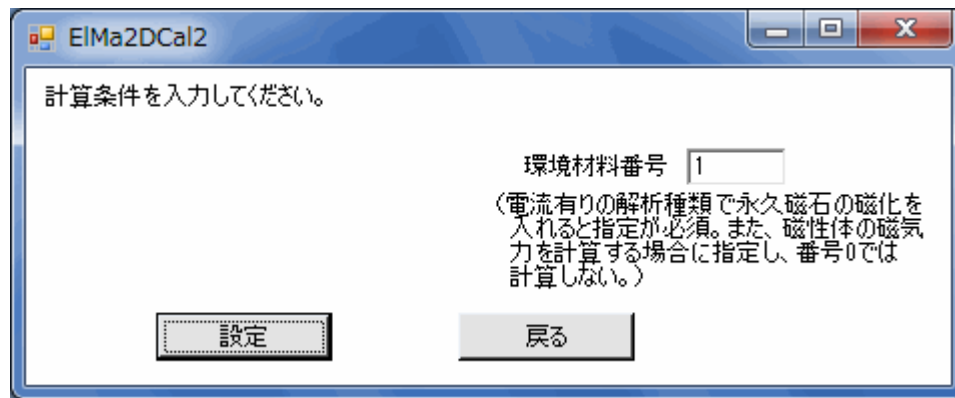


図6-4 計算条件入力画面（静磁界で電流有りの場合）

6.4 計算終了

図6-5に計算終了画面、図6-6に計算確認ダイアログ画面を示します。図6-5では、かかった計算時間も表示され、本例では0s（1s未満）となっています。また、図6-6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。

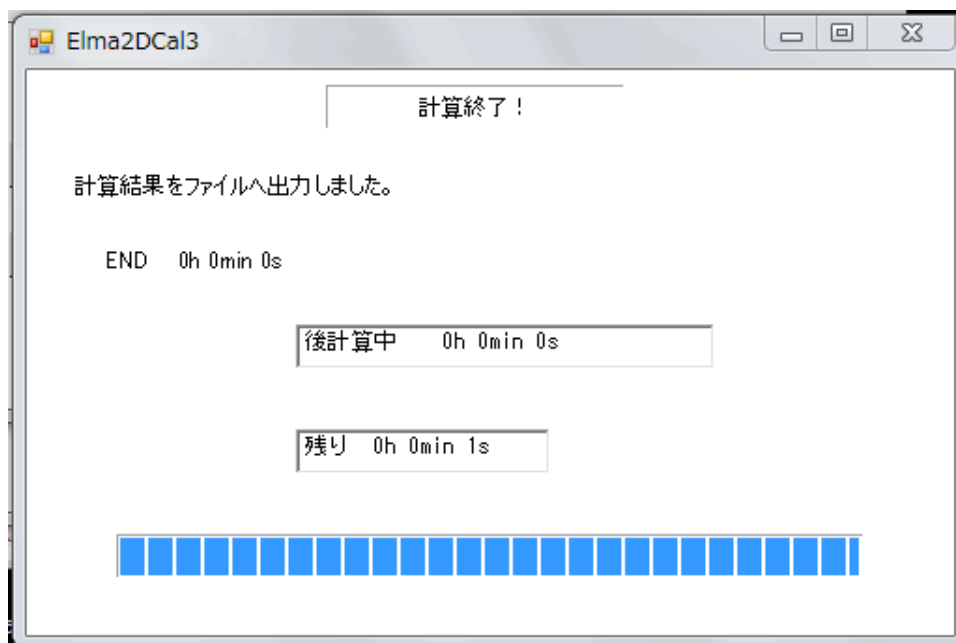


図6-5 計算終了画面

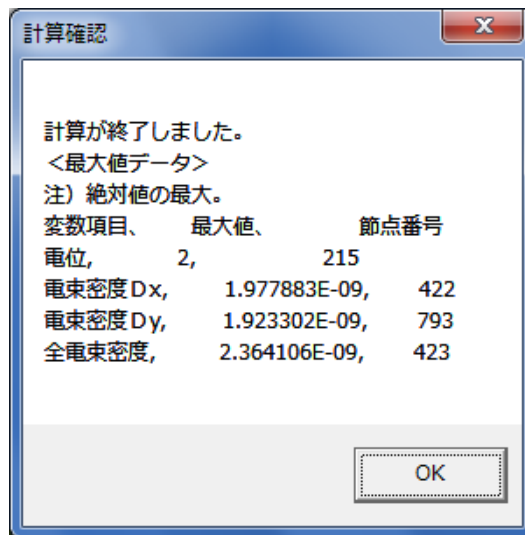


図6-6 計算確認ダイアログ画面（静電界の場合）

6.5 計算結果

上記6.2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6-7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6-7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計算マトリックスの変数個数等が出力されています。
- ③全節点について、節点番号、電位、電束密度 D_x 、電束密度 D_y 、全電束密度が出力されています。
- 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最後に計算時間も出力されます（本例では0s）。

<< 2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¥2次元電磁界解析¥Data¥ElecModel.dat

[解析種類] 静電界

①

*** 計算結果 ***

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

②

821, 46, 30178

** 節点の計算出力 **

<節点番号、電位、電束密度 Dx、電束密度 Dy、全電束密度>

③

1, 0, -5.88456E-18, -5.827675E-18, 8.281899E-18
2, 0, -1.201326E-11, 3.364269E-18, 1.201326E-11
3, 0, -2.39697E-11, -5.763041E-18, 2.39697E-11
4, 0, -3.578783E-11, 3.289037E-18, 3.578783E-11
5, 0, -4.740842E-11, -5.544008E-18, 4.740842E-11
6, 0, -5.870293E-11, 3.110185E-18, 5.870293E-11
7, 0, -6.958189E-11, -5.105239E-18, 6.958189E-11
8, 0, -7.987123E-11, 2.781893E-18, 7.987123E-11
9, 0, -8.942553E-11, -4.376063E-18, 8.942553E-11
10, 0, -9.807143E-11, 2.268045E-18, 9.807143E-11
11, 0, -2.317241E-10, -2.004339E-18, 2.317241E-10
12, 0, 3.399251E-18, -1.207053E-11, 1.207053E-11
13, .01356867, -2.408508E-11, -1.195818E-11, 2.689032E-11
14, .02685294, -4.769396E-11, -1.156674E-11, 4.90765E-11
.....
.....
955, 0, 2.568591E-10, 2.183503E-17, 2.568591E-10
956, 0, 2.122987E-10, -1.238849E-17, 2.122987E-10
957, 0, 1.686406E-10, 2.108441E-17, 1.686406E-10
958, 0, 1.257111E-10, -1.196746E-17, 1.257111E-10
959, 0, 8.344307E-11, 2.050444E-17, 8.344307E-11
960, 0, 4.160241E-11, -1.172245E-17, 4.160241E-11
961, 0, 2.005543E-17, 2.029128E-17, 2.852993E-17

<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
電位,	2,	215
電束密度 Dx,	1.977883E-09,	422
電束密度 Dy,	1.923302E-09,	793
全電束密度,	2.364106E-09,	423
END	0h 0min 0s	

⑤

図6-7 結果ファイルへの出力例 (静電界)

図6-8、6-9に材料が受ける力の出力例を示します。図6-8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6-9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, Fcall (絶対値) >
    1,   107,  -.0005080623,   .0001803943,   .0005391376
    2,   235,   .0002520144,  -8.730721E-06,   .0002521656
-----
* * 電荷部が受けるクーロン力 * *
<材料番号, Fcvx, Fcvy, Fcval (絶対値) >
    2,   1.970445,  -15.70752,   15.83063
    3,   2.706768,   8.296161,   8.726562
. . . . .
. . . . .

```

図6-8 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, Fr, Fz, Fall (絶対値) >
    2,   .01589871,   .0001648961,   .01589957
* * 磁性体が受ける磁気力 * *
<材料番号, Fmr, Fmz, Fmall (絶対値) >
    3,  -.0001063619,  -.0001213808,   .0001613882
. . . . .
. . . . .

```

図6-9 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）

6.6 体積計算

サブメニュー「体積計算」をクリックすると、図6-10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6-10 体積計算の実行画面

図6-11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。

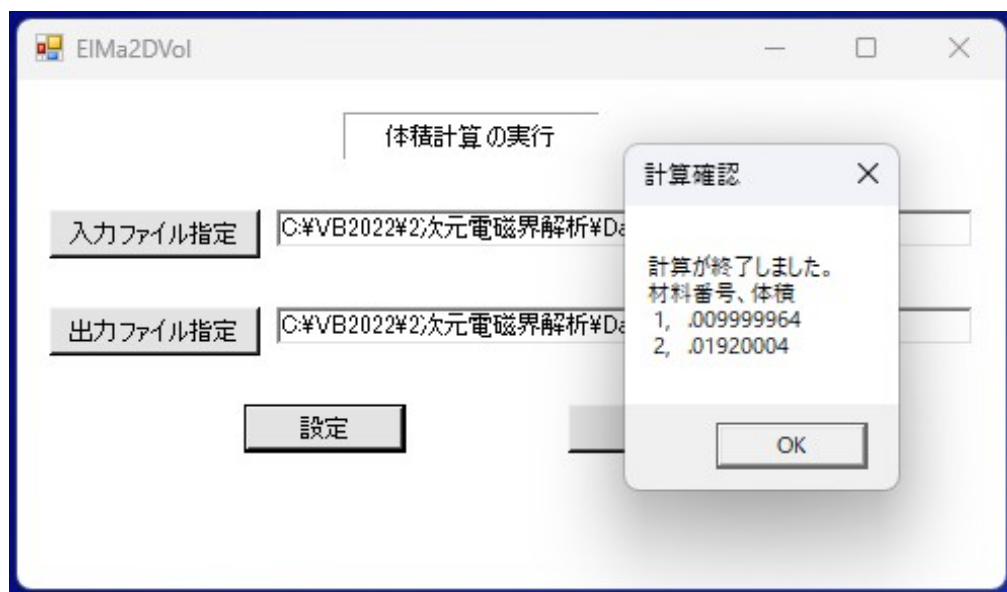


図6-8 体積計算の終了画面

さらに、上記の「出力ファイル指定」のファイルに計算結果が出力されます。図6-12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次元問題の場合、単位厚さで計算します。

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¥2次元電磁界解析¥Data¥ElecModel.dat
-----
材料番号、体積                                ①
1,      .0099999964
2,      .019200004
合計,    .0292                                ②
END

```

図6-12 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6-13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。

◇軸対称体問題の場合は、重心のR座標が0なので、重心のZ座標のみ出力されます。

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

```

<<体積の計算結果>>
静磁界モデル（電流なし）
[入力データファイル] , C:\¥VB2022¥2次元電磁界解析¥Data¥Mag1Model.dat
-----
材料番号、体積
1,      .02880044
重心のX座標、Y座標                                ①
.09999856,    .075624
END

```

図6-13 体積計算の結果ファイルへの出力例（材料数が1の場合）

第7章 「後処理」プログラム

7.1 サブメニュー画面

「メニュー」プログラムにおける「後処理」のサブメニュー画面を図7-1に示します。同図のように4つのサブメニューがあります。いずれのサブメニューをクリックしても次の使用ファイル設定画面となります。なお、「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。

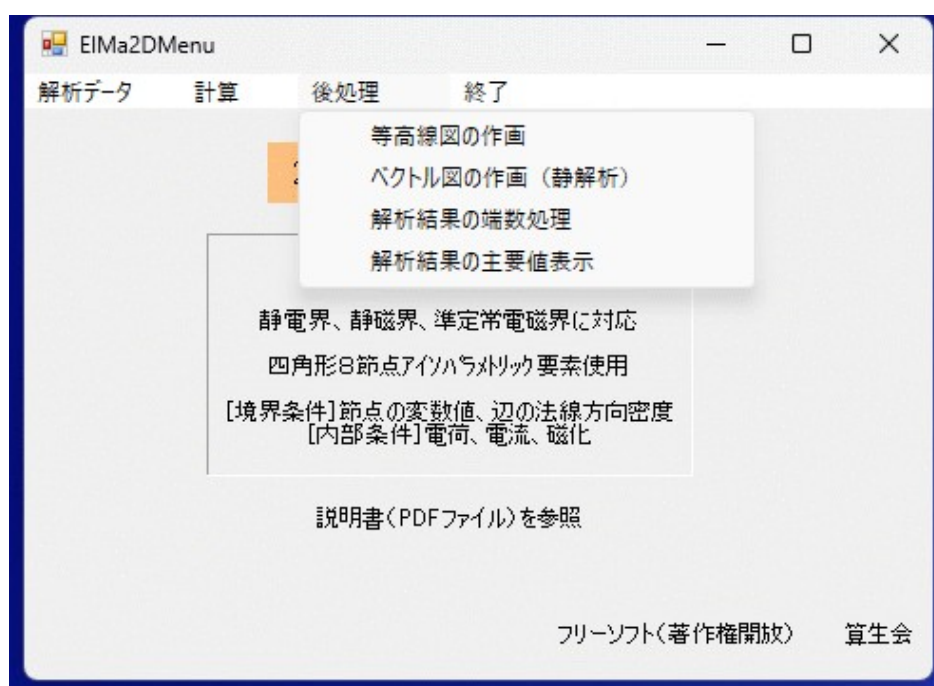


図7-1 「後処理」サブメニュー画面

7.2 使用ファイルの設定

図7-2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。

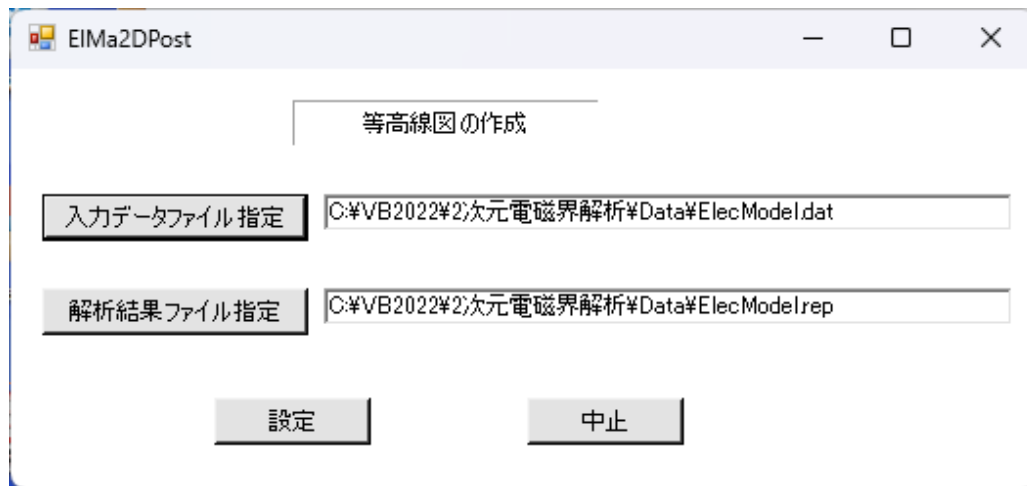


図7-2 使用ファイル設定画面

7.3 等高線の指定画面

図7-3、7-4に等高線指定画面を示します。図7-3は静電界の場合、図7-4は準定常電磁界（渦電流）の場合です。

- ①本画面で、作画したい変数項目を選択します。変数項目は解析種類によって異なります。

◇「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7-5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。

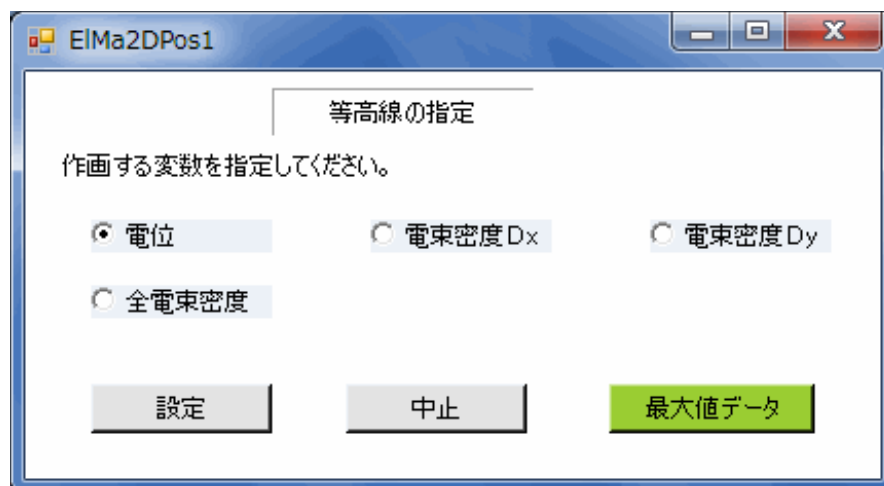


図7-3 等高線指定画面（静電界）

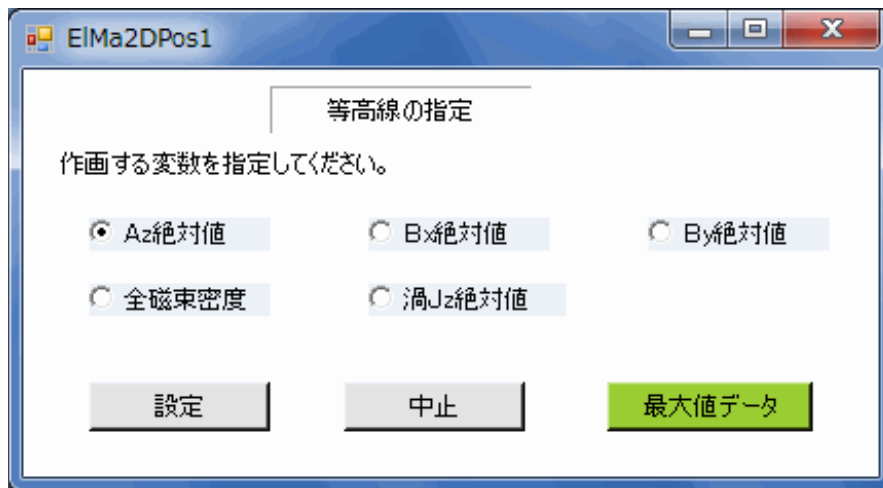


図7-4 等高線指定画面（準定常電磁界）

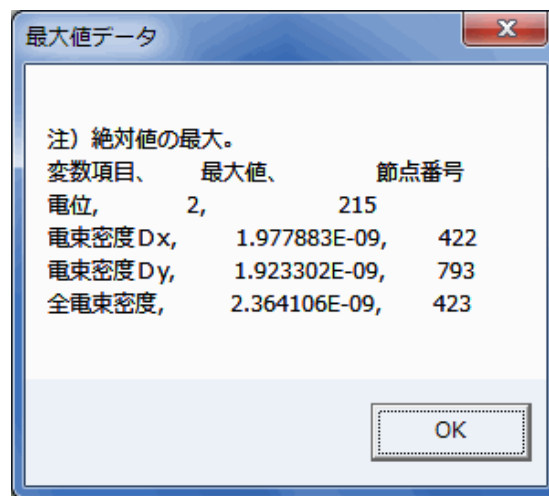


図7-5 最大値データの表示例（静電界）

7.4 等高線図の仕様設定画面

図7-6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 先ず、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、解析結果データの数値範囲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。

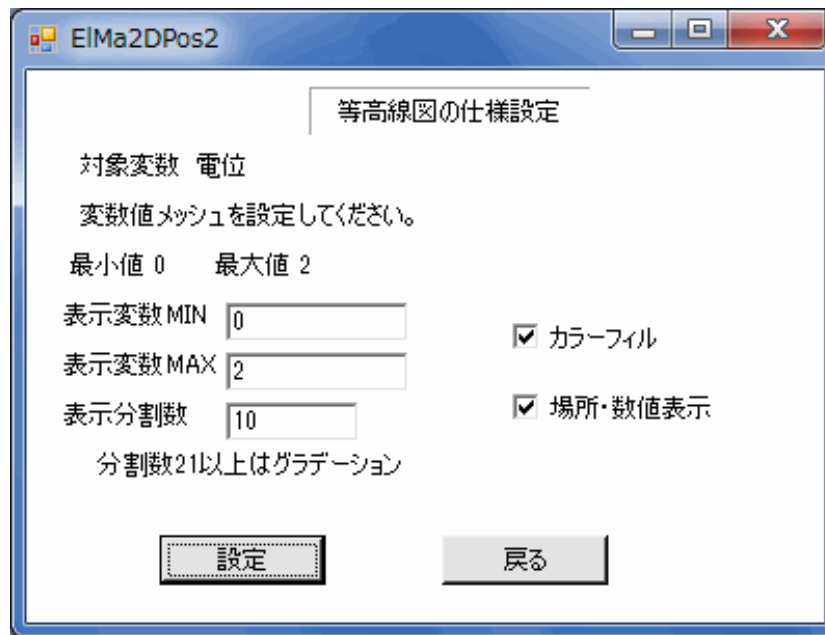


図7-6 等高線の仕様設定画面

7.5 等高線の作画画面

図7-7に等高線の作画画面を示します。

- ①同画面のように、等高線がカラー表示され、右欄には各等高線における変数値も明示してあります。
- ②本画面の左側の「要素辺の表示」は、「なし」か「有り」を選択できます。選択した後に「再描画」ボタンをクリックします。
◇「要素辺の表示」が「有り」の等高線図を図7-8に示します。同図では、各要素の辺がすべて表示されています。
- ③マウス右クリックで任意の節点を選択すると、図7-9のように同節点の変数値が表示されます。
◇ESCキーを押すと節点選択が解除されます。
- ④「標準・全画面切換」ボタンをクリックすると、標準画面と全画面を切り換えることができます。また、画面Formの右下コーナー等をマウ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。
- ⑤マウス中ボタン、ホイールにより移動、拡大・縮小を行なうことができます。中ボタンを押したまま動かせば図形を移動できます。また、ホイールの回転により拡大・縮小ができます。
- ⑥マウสดラッグ矩形により、等高線図の一部を拡大できます。操作方法は5.13節の構造図と同じです。
- ⑦本画面で「コピー印刷」ボタンをクリックすると、プリンターで画面コピーを印刷できます。
◇「通常画面」の作画が印刷されます。
- ⑧本画面を終了するには、「戻る」ボタンをクリックして、仕様設定画面に戻ります。また、もし等高線図の出来栄えに不満があれば、「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。

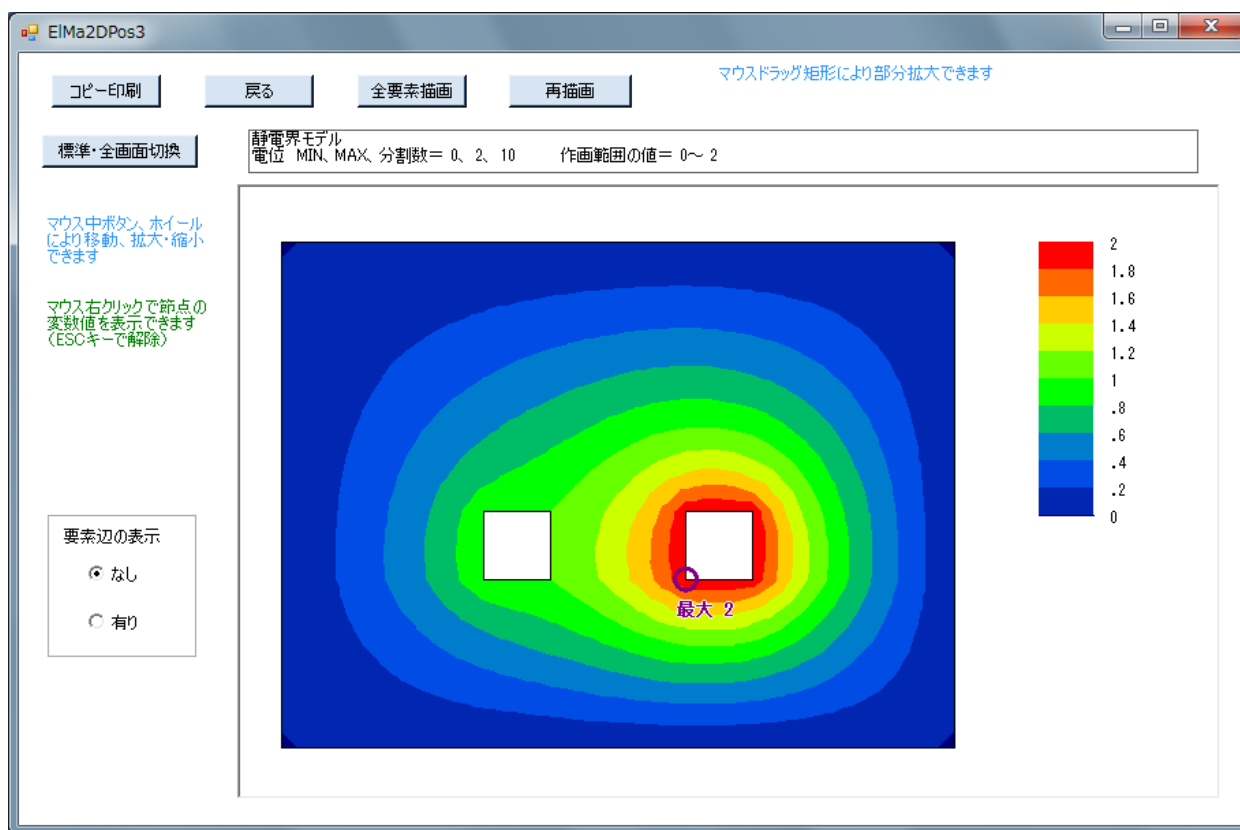


図7-7 等高線図の作画画面

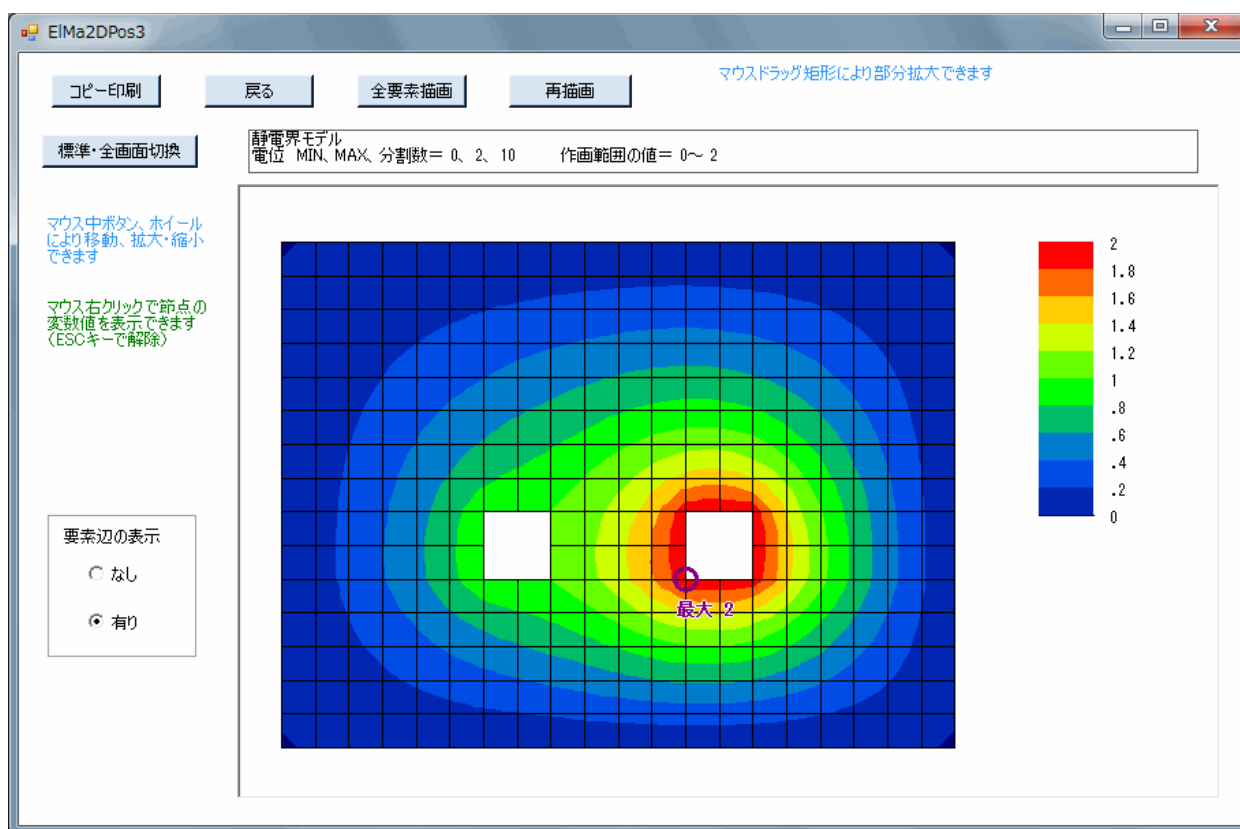


図7-8 等高線図の作画画面（要素辺の表示有り）

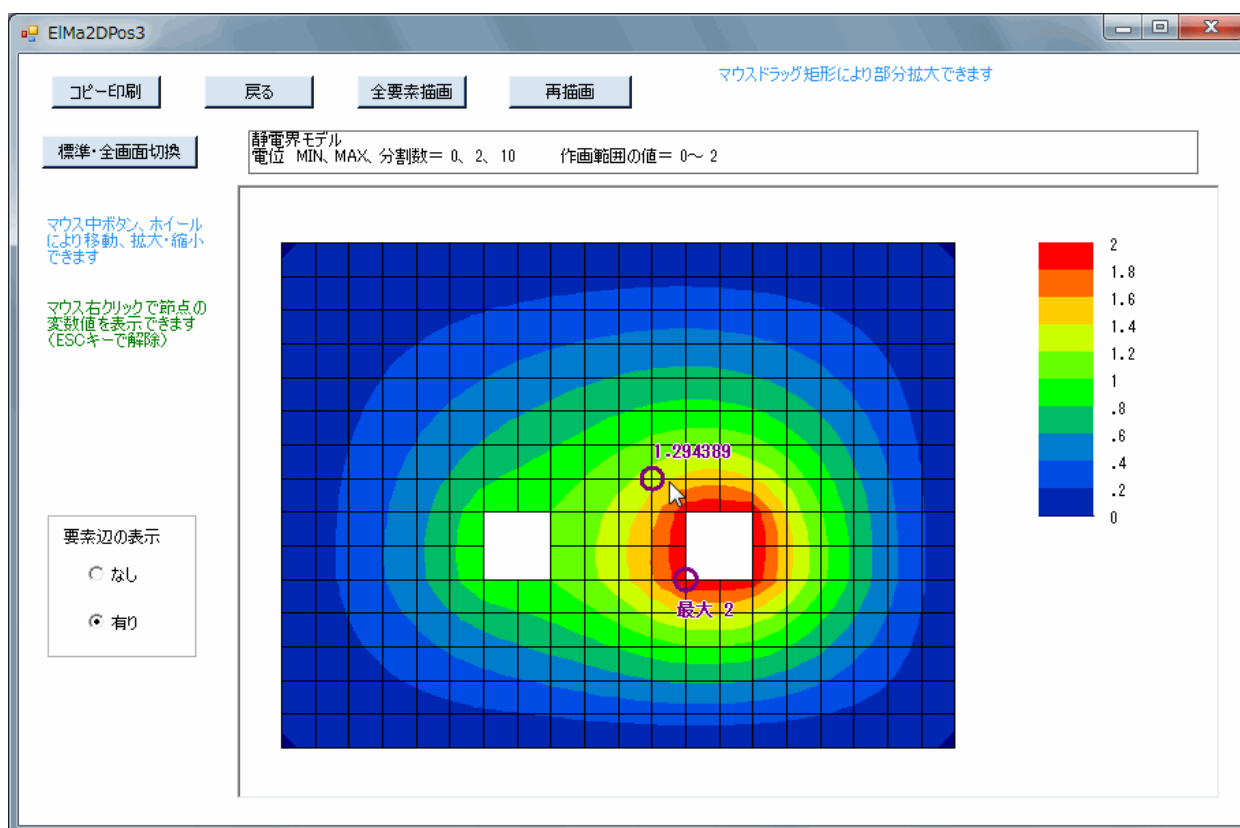


図7-9 等高線図の作画画面（マウス右クリックの節点の変数値表示）

また、図7-10にグラデーションの等高線図の画面例を示します。グラデーションの場合、画面右側のカラーゲージに4等分の5つの変数値が示されます。

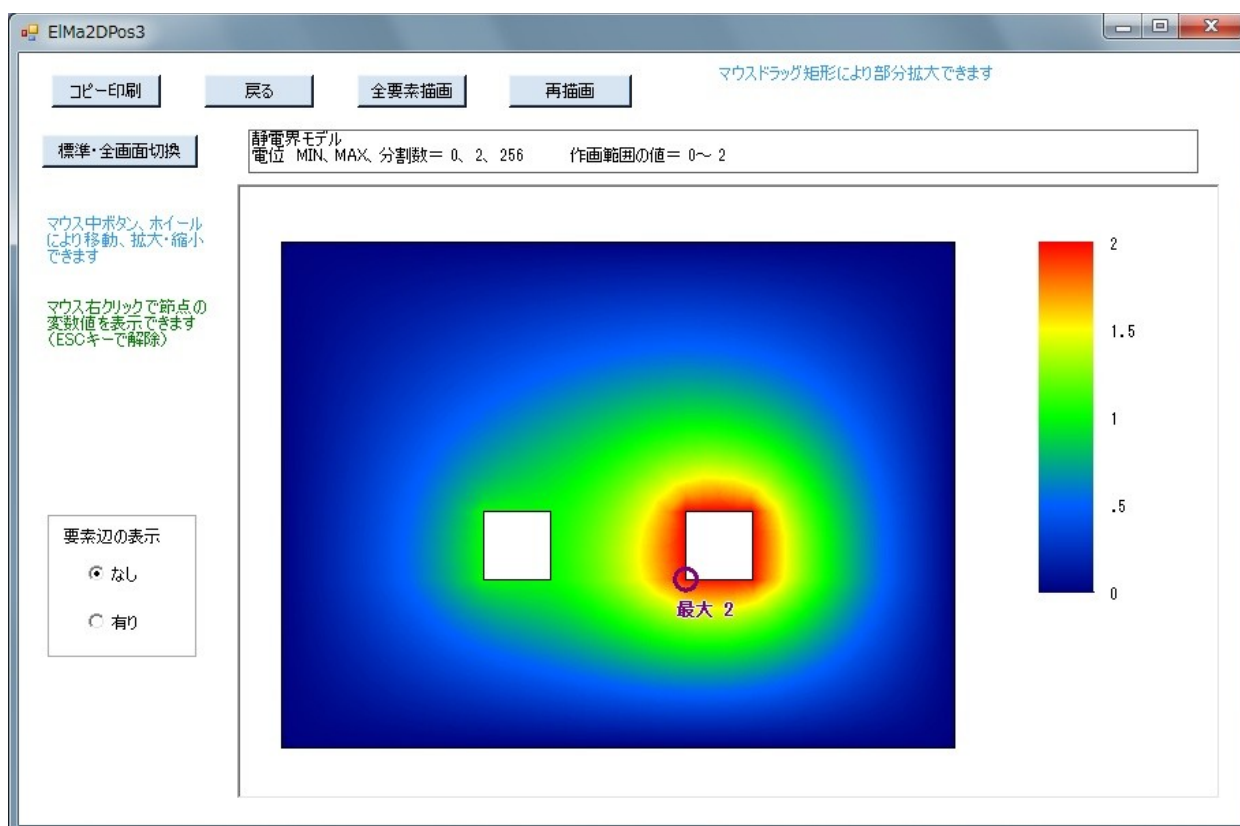


図7-10 等高線図の作画画面（グラデーション）

7.6 ベクトル図の作画画面

図7-11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（静磁界では磁束密度ベクトル）。

- ①同画面のように、各節点における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つのパラメータを表示してあります。それらのパラメータ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「標準・全画面切換」ボタンをクリックすると、標準画面と全画面を切り換えることができます。また、画面Formの右下コーナー等をマウสดラッグすることにより、標準画面と全画面の間で自由に拡大・縮小できます。
- ④マウス中ボタン、ホイールにより移動、拡大・縮小を行なうことができます。中ボタンを押したまま動かせば図形を移動できます。また、ホイールの回転により拡大・縮小ができます。
- ⑤マウสดラッグ矩形により、ベクトル図の一部分を拡大できます。操作方法は5.13節の構造図と同じです。
 - ◇図7-11の中心部を拡大したベクトル図を図7-12に示します。
- ⑥マウス右クリックで任意の節点を選択すると、図7-13のように同節点のベクトル値が表示されます。
 - ◇ESCキーを押すと節点選択が解除されます。
- ⑦本画面で「コピー印刷」ボタンをクリックすると、プリンターで画面コピーを印刷できます。
 - ◇「通常画面」の作画が印刷されます。
- ⑧本画面を終了するには、「中止」ボタンをクリックします。

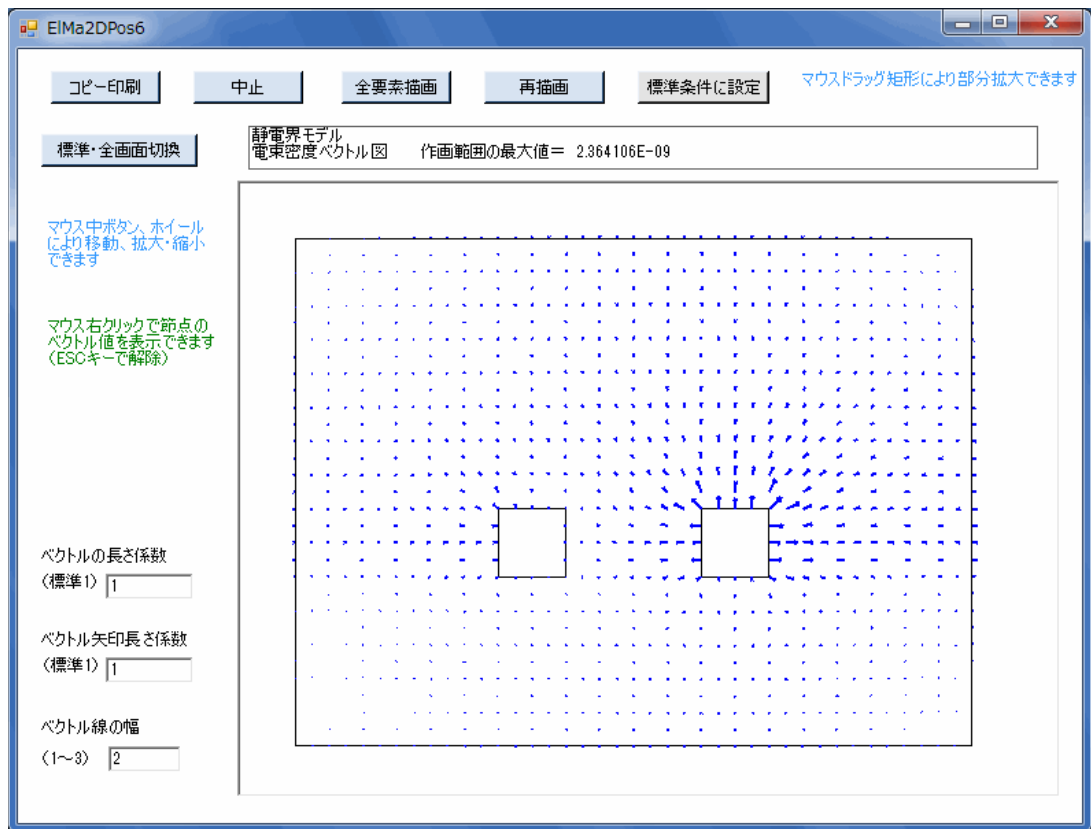


図7-11 ベクトル図の作画画面（静電界の電束密度ベクトル）

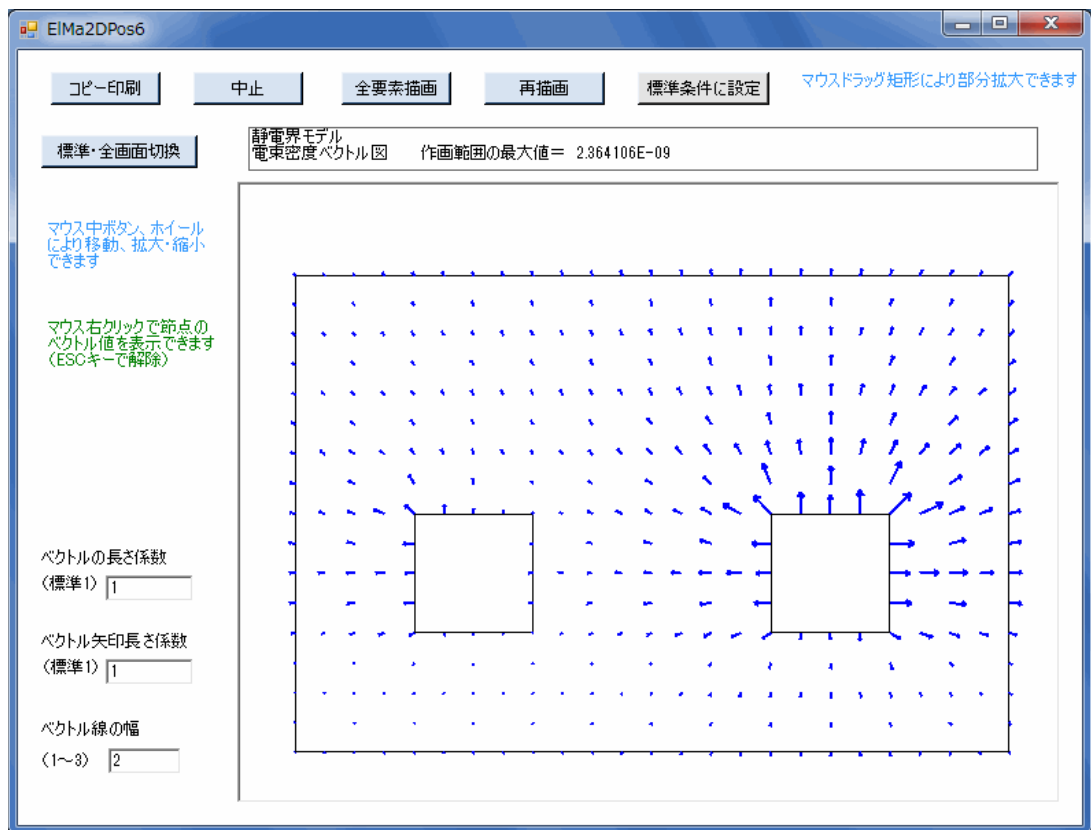


図7-12 ベクトル図作画の部分拡大例（静電界の電束密度ベクトル）

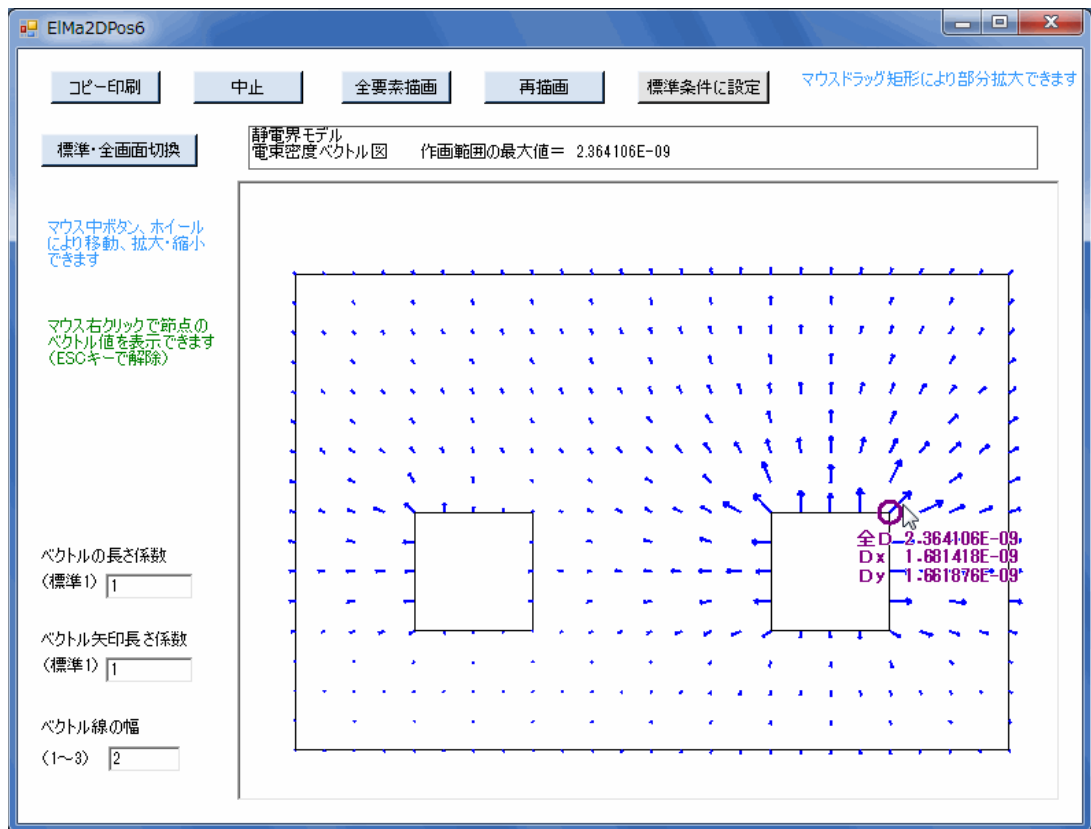


図7-13 ベクトル図の作画画面（マウス右クリックの節点のベクトル値表示）

7.7 解析結果の主要値表示

図7-14に主要値表示の画面を示します。主要値データをクリップボードにコピーするかどうかは、「はい」または「いいえ」をクリックします。その後は立ち上げ時のメニュー画面に戻ります。

◇クリップボードにコピーされたデータは、他のソフトで貼り付け利用できます。

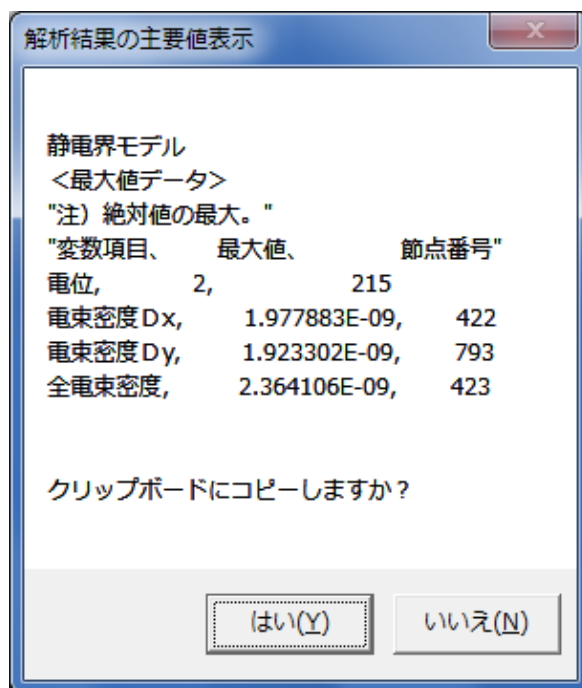


図7-14 解析結果の主要値表示の画面（静電界の場合）

第8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。

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、中央の長方形ABCDが磁石に相当し、解析モデルでは長方形穴となり、その4辺に磁束密度境界を設定します。長方形両端の辺AC、BDでは境界流出、流入の1mTの一定磁束密度です。また、長辺AB、CDでは図のように-0.1mT～0.1mTの線形の磁束密度です。ただし、入力データでは辺AB、CDをそれぞれ6分割した要素辺とし、各要素辺で一定の平均磁束密度に近似しています。

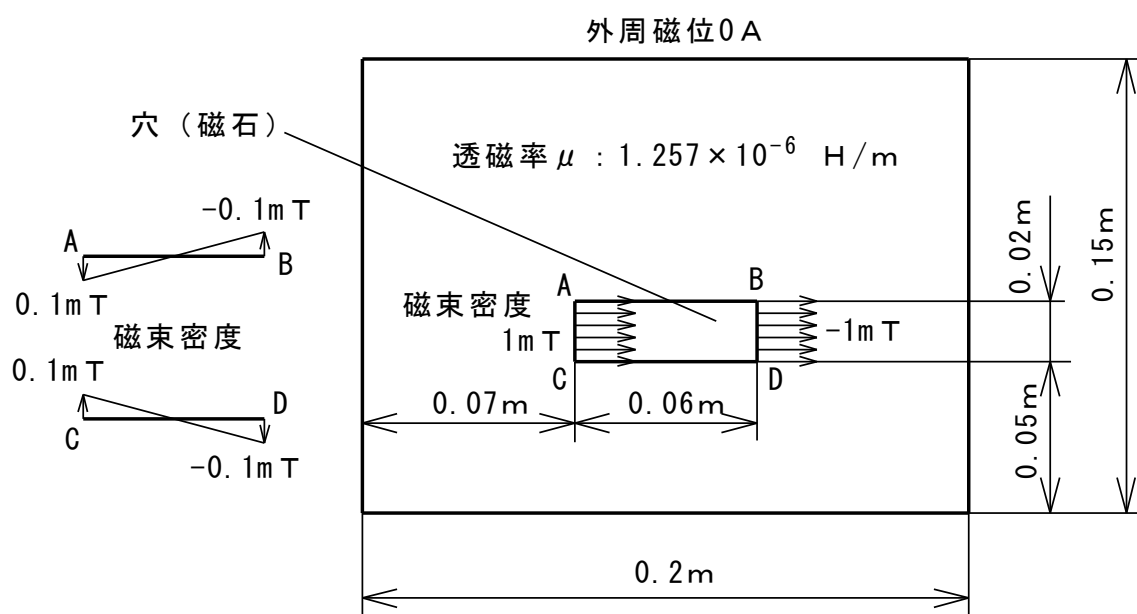


図8-1 静磁界（電流なし）計算例のモデル図

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は、それぞれ894、52、35726です。
- ②各変数の最大値データが出力されています。
- ③計算時間は0秒台です。

8.4 等高線図

図8-5、図8-6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。

8.5 ベクトル図

図8-7に中心部分の磁束密度ベクトル図を示します。

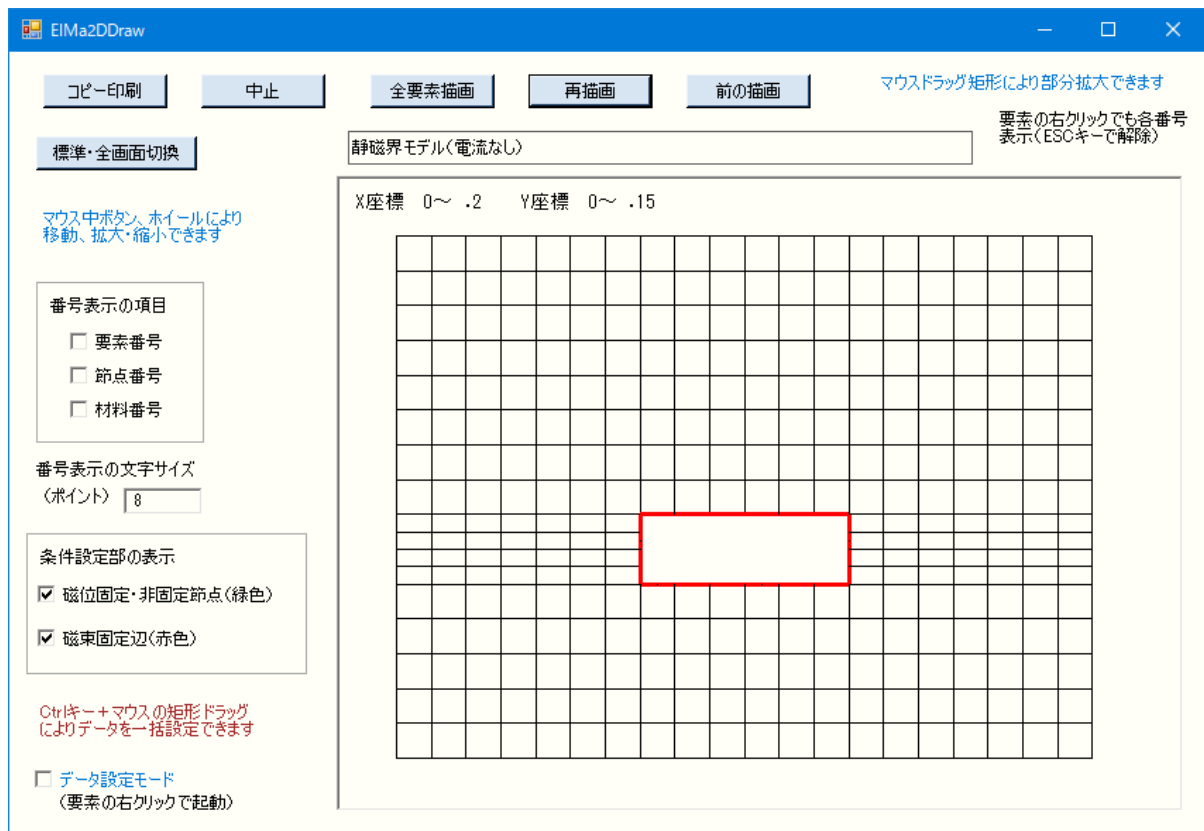


図8-2 静磁界（電流なし）計算例の構造図

プログラム名, EleMag2D									
静磁界モデル（電流なし）									
問題のタイプ(2: 2次元、4: 軸対称体), 2									
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, 1042									
要素数, 316									
材料データ数, 1									
磁位固定・非固定の節点数, 0									
磁束固定境界の辺の数, 20									
ガウス積分点数, 3									
1 節点当り変数の数, 1									
材料データの成分数, 1									
要素データ（要素番号、材料番号、8節点番号）									
1,	1,	1,	12,	18,	19,	20,	13,	3,	2
2,	1,	3,	13,	20,	21,	22,	14,	5,	4
3,	1,	5,	14,	22,	23,	24,	15,	7,	6
4,	1,	7,	15,	24,	25,	26,	16,	9,	8
5,	1,	9,	16,	26,	27,	28,	17,	11,	10
6,	1,	18,	29,	35,	36,	37,	30,	20,	19
7,	1,	20,	30,	37,	38,	39,	31,	22,	21
8,	1,	22,	31,	39,	40,	41,	32,	24,	23
9,	1,	24,	32,	41,	42,	43,	33,	26,	25
10,	1,	26,	33,	43,	44,	45,	34,	28,	27
.....									
.....									
312,	1,	1008,	1021,	1032,	1033,	1034,	1022,	1010,	1009
313,	1,	1010,	1022,	1034,	1035,	1036,	1023,	1012,	1011
314,	1,	1012,	1023,	1036,	1037,	1038,	1024,	1014,	1013
315,	1,	1014,	1024,	1038,	1039,	1040,	1025,	1016,	1015
316,	1,	1016,	1025,	1040,	1041,	1042,	1026,	1018,	1017

図8-3（1/2） 静磁界（電流なし）計算例の入力データファイル

節点データ（節点番号、X座標、Y座標）

```
1, 0, 0
2, 0, .005
3, 0, .01
4, 0, .015
5, 0, .02
. . . . .
. . . . .
1038, .2, .13
1039, .2, .135
1040, .2, .14
1041, .2, .145
1042, .2, .15
```

各材料の透磁率区分数（材料番号、区分数）

```
1, 0
```

各材料の物性データ

材料番号, 1

区分番号、磁束密度、透磁率

```
0, 0, 1.257E-06
```

磁束密度境界（境界番号、辺の3節点番号、磁束密度 q （単位面積当り））

```
1, 130, 436, 437, .001
2, 437, 438, 439, .001
3, 439, 440, 441, .001
4, 441, 442, 443, .001
5, 451, 450, 449, -.001
6, 449, 448, 447, -.001
7, 447, 446, 445, -.001
8, 445, 444, 232, -.001
9, 232, 221, 215, -8.33E-05
10, 215, 204, 198, -5E-05
11, 198, 187, 181, -1.67E-05
12, 181, 170, 164, 1.67E-05
13, 164, 153, 147, 5E-05
14, 147, 136, 130, 8.33E-05
15, 443, 720, 729, 8.33E-05
16, 729, 746, 755, 5E-05
17, 755, 772, 781, 1.67E-05
18, 781, 798, 807, -1.67E-05
19, 807, 824, 833, -5E-05
20, 833, 850, 451, -8.33E-05
```

図8-3（2/2） 静磁界（電流なし）計算例の入力データファイル

<<2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¥2次元電磁界解析¥Data¥Mag1Model.dat

[解析種類] 静磁界（電流なし）

*** 計算結果 ***

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

894, 52, 35726

** 節点の計算出力 **

<節点番号、磁位、磁束密度 Bx、磁束密度 By、全磁束密度>

1, 0, 3.914157E-12, 3.889948E-12, 5.518362E-12

2, 0, 8.010503E-06, -2.24565E-12, 8.010503E-06

3, 0, 1.599744E-05, 3.850824E-12, 1.599744E-05

4, 0, 2.389544E-05, -2.199702E-12, 2.389544E-05

5, 0, 3.167579E-05, 3.693527E-12, 3.167579E-05

6, 0, 3.919996E-05, -2.062208E-12, 3.919996E-05

7, 0, 4.638817E-05, 3.317773E-12, 4.638817E-05

8, 0, 5.303616E-05, -1.763909E-12, 5.303616E-05

9, 0, 5.898727E-05, 2.622574E-12, 5.898727E-05

10, 0, 6.405158E-05, -1.261414E-12, 6.405158E-05

.....

.....

444, 9.403765, .0005705088, -.001061838, .001205396

445, 11.0756, .0009743659, -.0005208152, .001104825

446, 11.68577, .00098124, -.0001913099, .0009997155

447, 11.83658, .0009479118, -5.72526E-06, .0009479291

.....

.....

1036, 0, 2.513384E-05, 2.29992E-12, 2.513384E-05

1037, 0, 2.051177E-05, -1.266687E-12, 2.051177E-05

1038, 0, 1.611683E-05, 2.101797E-12, 1.611683E-05

1039, 0, 1.190469E-05, -1.161956E-12, 1.190469E-05

1040, 0, 7.849684E-06, 1.959973E-12, 7.849684E-06

1041, 0, 3.897133E-06, -1.103567E-12, 3.897133E-06

1042, 0, 1.854338E-12, 1.909243E-12, 2.661537E-12

<最大値データ>

注) 絶対値の最大。

変数項目、 最大値、 節点番号

磁位、 -11.83658, 439

磁束密度 Bx, .0009812409, 438

磁束密度 By, -.001061838, 444

全磁束密度, .001205397, 436

END 0h 0min 0s

図8-4 静磁界（電流なし）計算例の計算結果データファイル

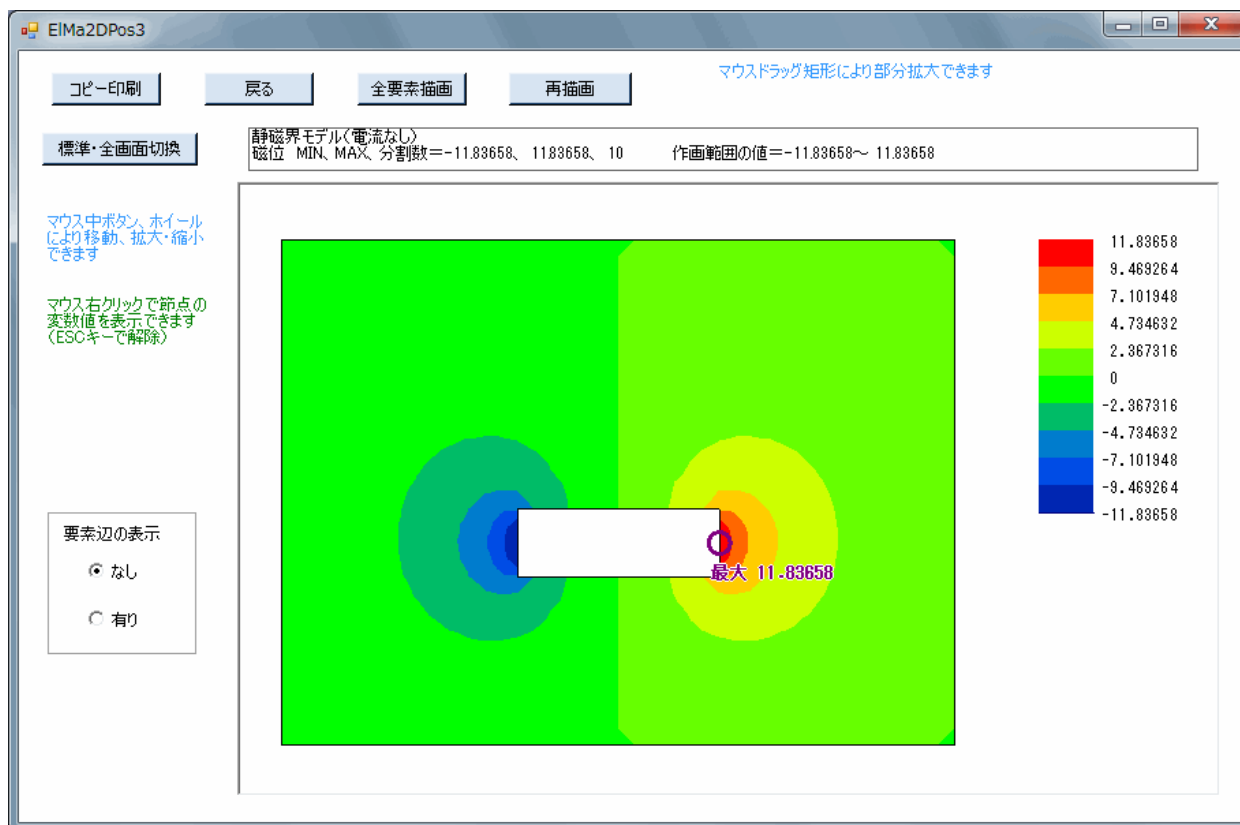


図8-5 静磁界（電流なし）計算例の磁位の等高線図

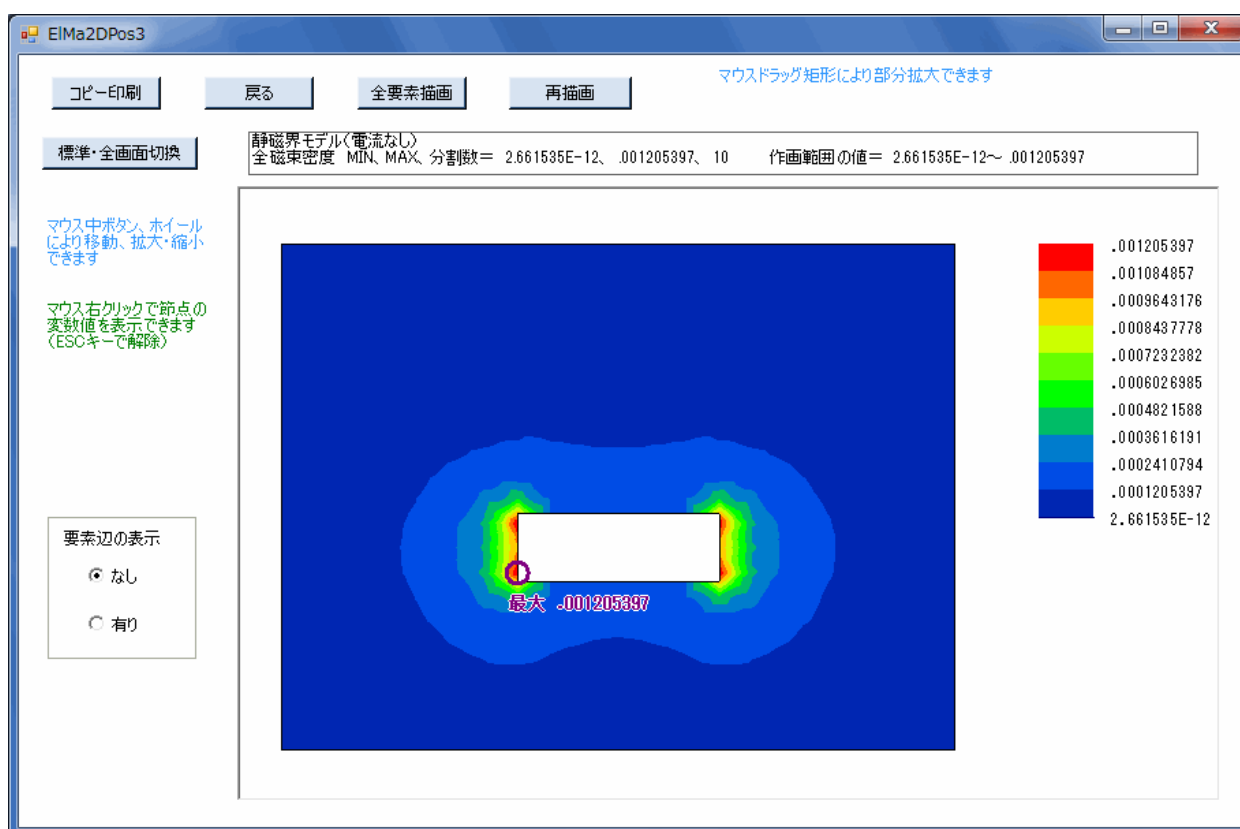


図8-6 静磁界（電流なし）計算例の全磁束密度の等高線図

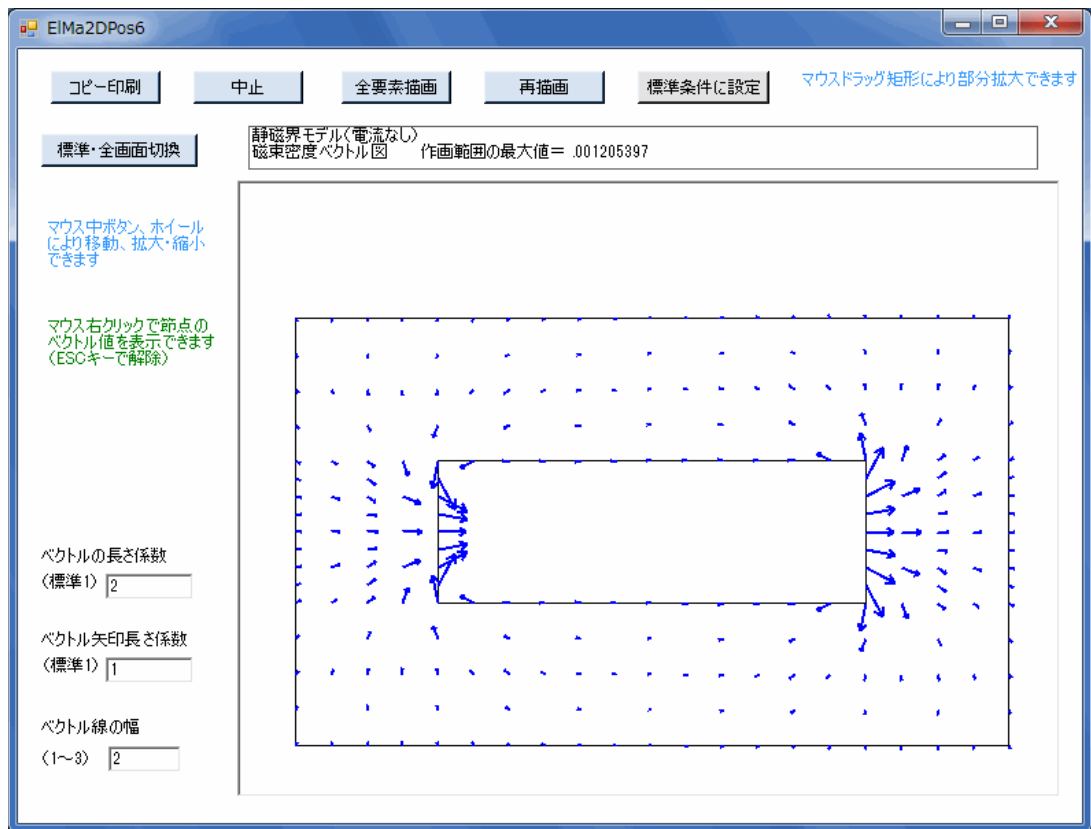


図8-7 静磁界（電流なし）計算例の磁束密度ベクトル図（中心部分）

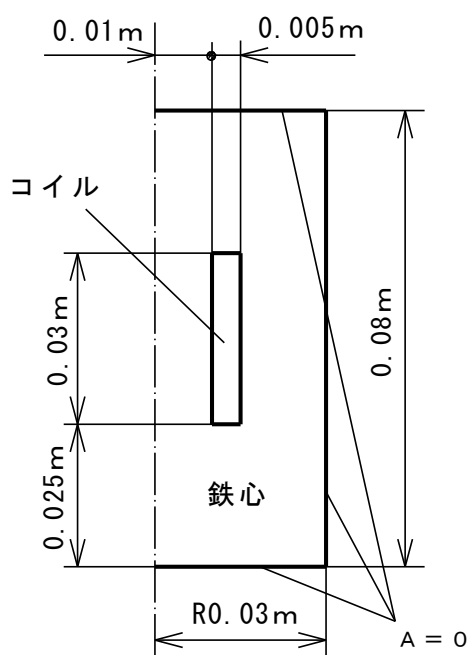
第9章 静磁界（電流有り）の計算例

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。

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、軸対称体でリング状コイルと鉄心とから成ります。軸対称体なので、軸断面の右半分を使用します。コイルには断面垂直方向の電流150 Aが流れ、その電流密度 J_p 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。

境界条件として、周囲の境界では $A=0$ とします。



[コイル材料物性]

透磁率 μ : $1.257 \times 10^{-6} \text{ H/m}$

垂直電流 : 150 A

電流密度 J_p : $1 \times 10^6 \text{ A/m}^2$

[鉄心材料物性]

透磁率 μ : 磁束密度で変化（下記グラフ）

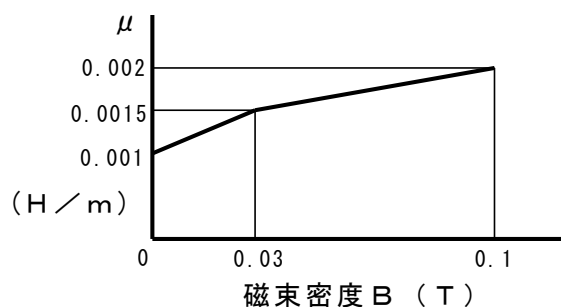


図9-1 静磁界（電流有り）計算例のモデル図

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の構造図では、中央の青色の部分がコイルに相当します。

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繰返し計算の条件が示されています。
- ②環境材料番号が指定されている場合は、同番号が示されます。
- 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は、それぞれ1128、39、36262です。

- ④繰返し計算回数は4回です。
- ⑤電流部が受けるローレンツ力が出力されています。
- ⑥各変数の最大値データが出力されています。
- ⑦計算時間は0sです。

9.4 等高線図

図9-5、図9-6に磁気ベクトルポテンシャル A_p 、全磁束密度の等高線図（カラーフィル有り）を示します。

9.5 ベクトル図

図9-7にコイル周囲の磁束密度ベクトル図を示します。

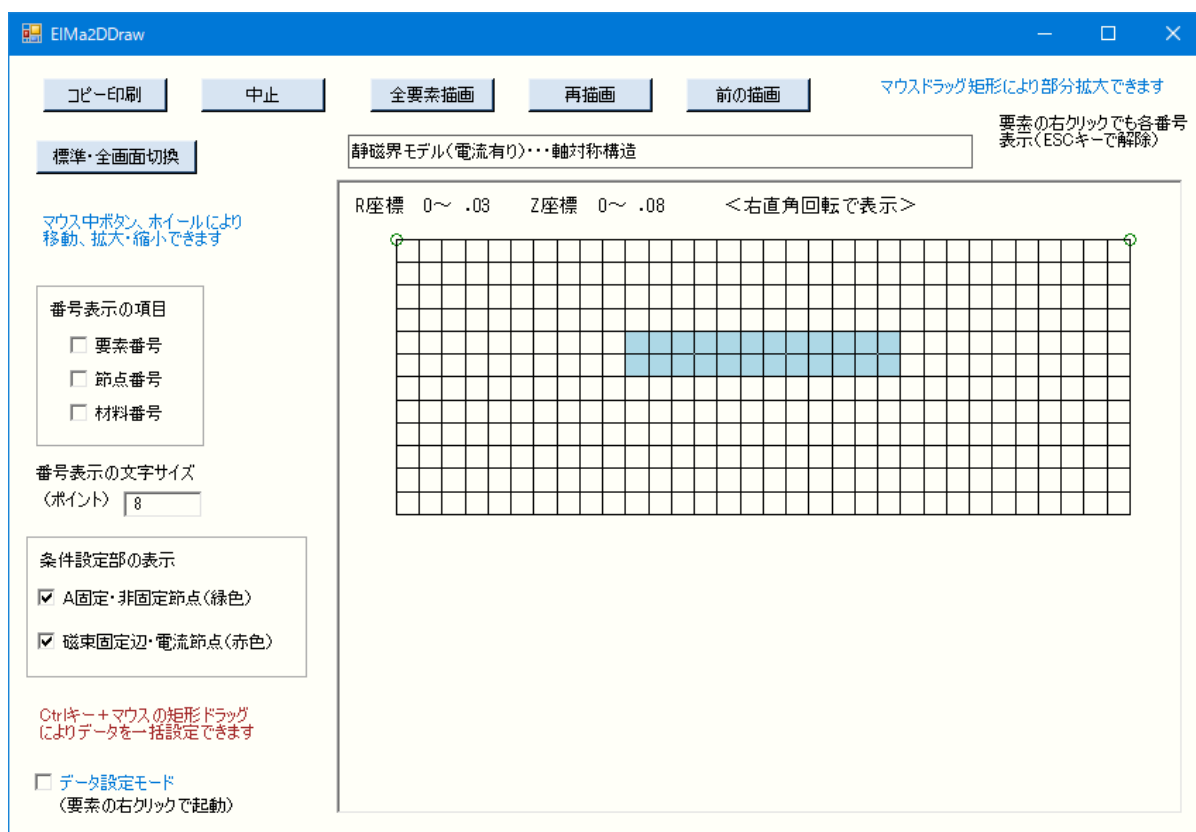


図9-2 静磁界（電流有り）計算例の構造図

```

プログラム名, EleMag2D
静磁界モデル（電流有り）・・・軸対称構造
問題のタイプ(2: 2次元、4: 軸対称体), 4
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, 1241
要素数, 384
材料データ数, 2
Ap固定・非固定の節点数, 2
流束 q 固定境界の辺の数, 0
電流の節点数, 0
ガウス積分点数, 3
1 節点当り変数の数, 1
材料データの成分数, 3
要素データ（要素番号、材料番号、8節点番号）
1, 1, 1, 2, 3, 27, 41, 40, 39, 26
2, 1, 3, 4, 5, 28, 43, 42, 41, 27
3, 1, 5, 6, 7, 29, 45, 44, 43, 28
4, 1, 7, 8, 9, 30, 47, 46, 45, 29
5, 1, 9, 10, 11, 31, 49, 48, 47, 30
6, 1, 11, 12, 13, 32, 51, 50, 49, 31
7, 1, 13, 14, 15, 33, 53, 52, 51, 32
8, 1, 15, 16, 17, 34, 55, 54, 53, 33
9, 1, 17, 18, 19, 35, 57, 56, 55, 34
10, 1, 19, 20, 21, 36, 59, 58, 57, 35
.....
.....
381, 1, 1195, 1196, 1197, 1213, 1235, 1234, 1233, 1212
382, 1, 1197, 1198, 1199, 1214, 1237, 1236, 1235, 1213
383, 1, 1199, 1200, 1201, 1215, 1239, 1238, 1237, 1214
384, 1, 1201, 1202, 1203, 1216, 1241, 1240, 1239, 1215
節点データ（節点番号、R座標、Z座標）
1, 0, 0
2, .00125, 0
3, .0025, 0
4, .00375, 0
5, .005, 0
6, .00625, 0
7, .0075, 0
8, .00875, 0
9, .01, 0
10, .01125, 0
.....
.....

```

図9-3（1/2） 静磁界（電流有り）計算例の入力データファイル

```

1232, .01875, .08
1233, .02, .08
1234, .02125, .08
1235, .0225, .08
1236, .02375, .08
1237, .025, .08
1238, .02625, .08
1239, .0275, .08
1240, .02875, .08
1241, .03, .08

```

各材料の透磁率区分数（材料番号、区分数）

```

1, 2
2, 0

```

各材料の物性データ

材料番号, 1

垂直電流密度、磁化Mr、磁化Mz

```

0, 0, 0

```

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

垂直電流密度、磁化Mr、磁化Mz

```

1000000, 0, 0

```

区分番号、磁束密度、透磁率

```

0, 0, 1.257E-06

```

< Ap固定・非固定の境界 >

固定番号、節点番号、Ap拘束、Ap値

```

1, 1, 1, 0
2, 1217, 1, 0

```

図9-3 (2/2) 静磁界（電流有り）計算例の入力データファイル

```

<< 2次元電磁界解析の計算結果>>
静磁界モデル（電流有り）・・・軸対称構造
[入力データファイル] , G:\VB2022\2次元電磁界解析\Data\Mag2Model.dat
[解析種類] 静磁界（電流有り）
最大繰返し計算回数, 20
収束基準誤差率, .005
環境材料番号, 1
-----
*** 計算結果 ***
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
    1128,    39,    36262
繰返し計算回数, 4
** 節点の計算出力 **
<節点番号、Ap、磁束密度Br、磁束密度Bz、全磁束密度>
1,    0,   -5.250473E-07,    6.156056E-08,    5.286439E-07
2,    0,    .0001832823,   -4.105818E-08,    .0001832823
3,    0,    .0003625533,    3.743549E-08,    .0003625533
4,    0,    .0005349995,   -8.890583E-09,    .0005349995
5,    0,    .0006958303,    1.145496E-08,    .0006958303
. . . . .
. . . . .
620,    .0001928125,   -2.181359E-12,   -.01438104,    .01438104
621,    .0001930582,   -2.21021E-12,   -.00253427,    .00253427
. . . . .
. . . . .
1238,    0,   -.0004041696,   -1.012658E-09,    .0004041696
1239,    0,   -.0002674906,    1.33465E-09,    .0002674906
1240,    0,   -.0001320065,   -7.520194E-10,    .0001320065
1241,    0,    1.558346E-11,    1.13923E-09,    1.139337E-09
** 電流部が受けるローレンツ力 **
<材料番号、Fr、Fz、Fall（絶対値）>
2,    .1798184,    2.912351E-10,    .1798184
** 磁性体が受ける磁気力 **
<材料番号、Fmr、Fmz、Fmall（絶対値）>
1,    7.341654E-12,    2.68395E-11,    2.78255E-11
-----
<最大値データ>
注) 絶対値の最大。
変数項目、      最大値、      節点番号
Ap,            .0001930582,      621
磁束密度Br,    .03377,          374
磁束密度Bz,    -.04661689,        388
全磁束密度,    .04915122,        388
END    0h 0min 0s

```

図9-4 静磁界（電流有り）計算例の計算結果データファイル

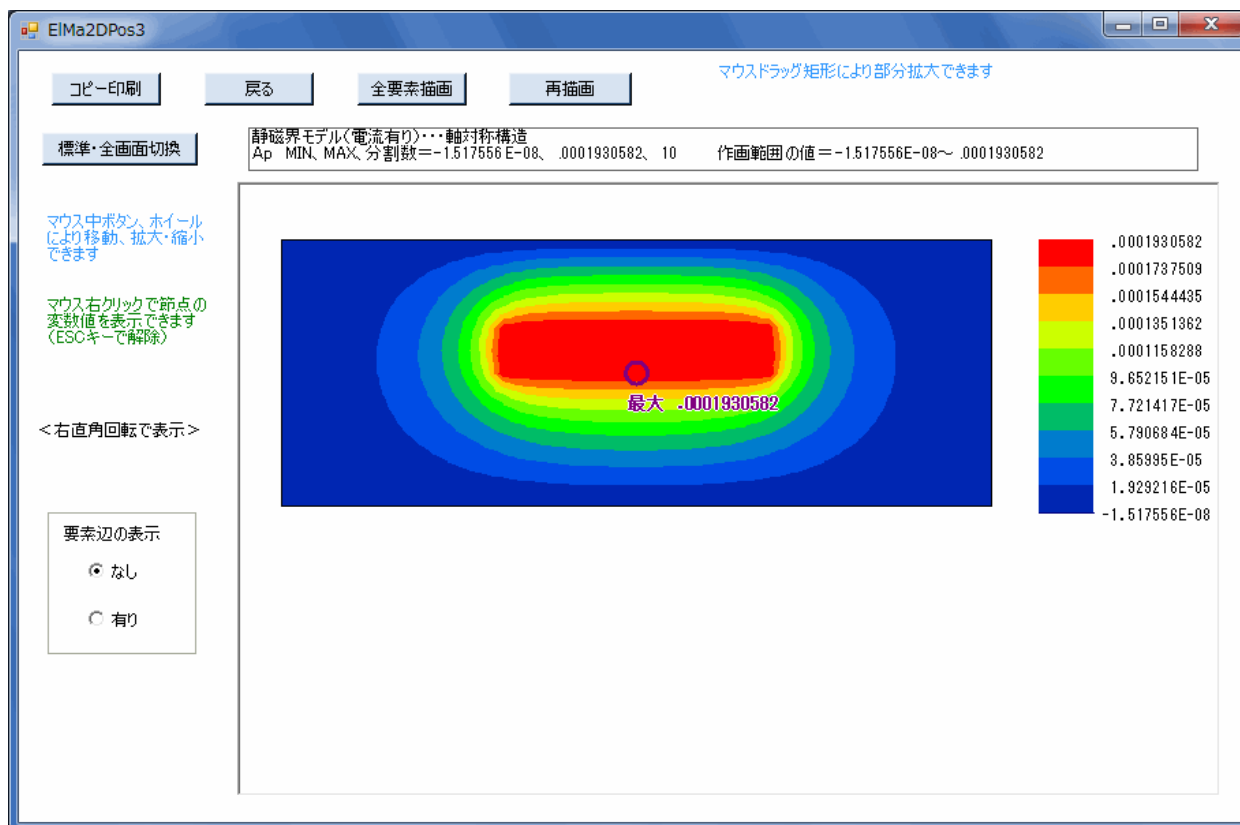


図9-5 静磁界（電流有り）計算例の A_p の等高線図

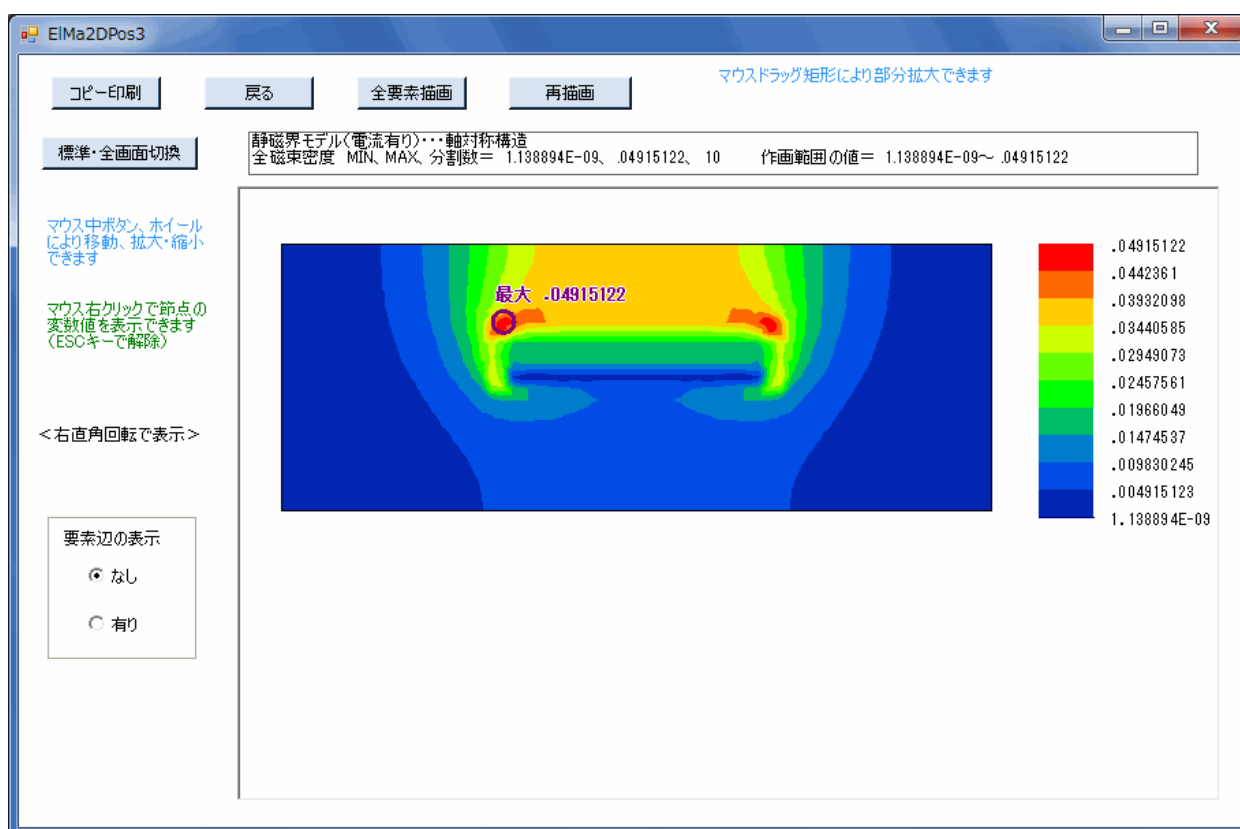


図9-6 静磁界（電流有り）計算例の全磁束密度の等高線図

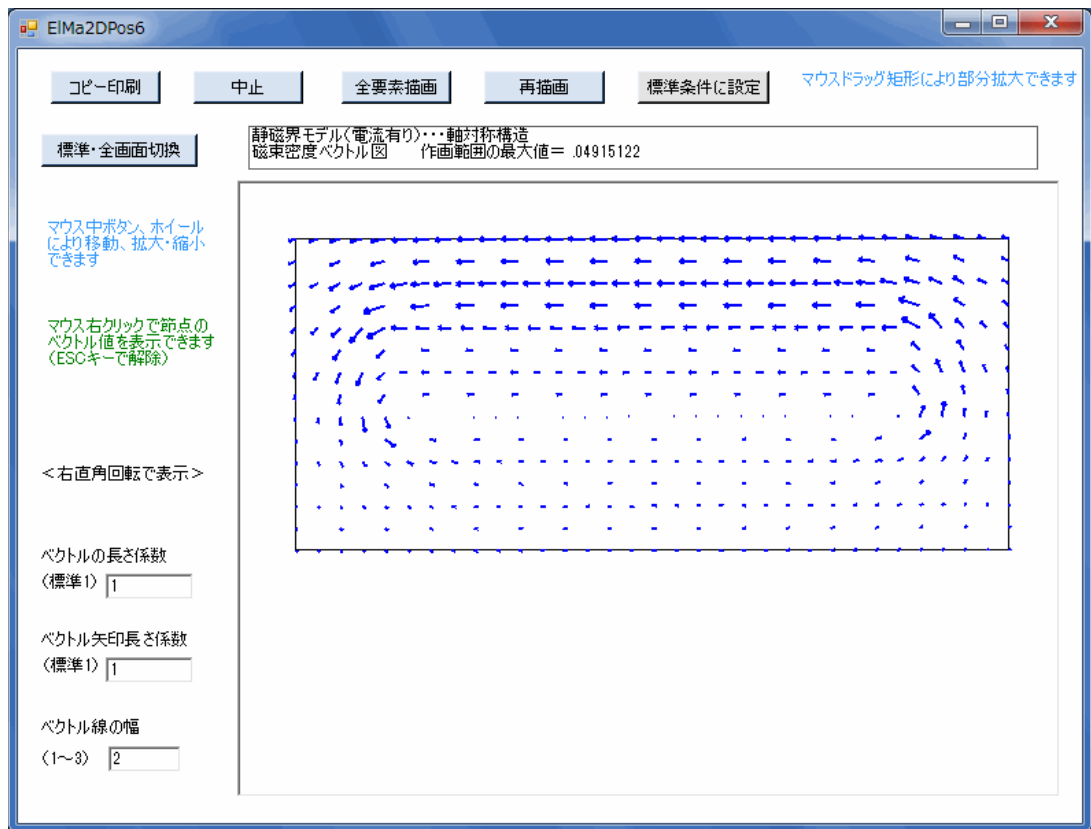


図9-7 静磁界（電流有り）計算例の磁束密度ベクトル図（コイル周囲）

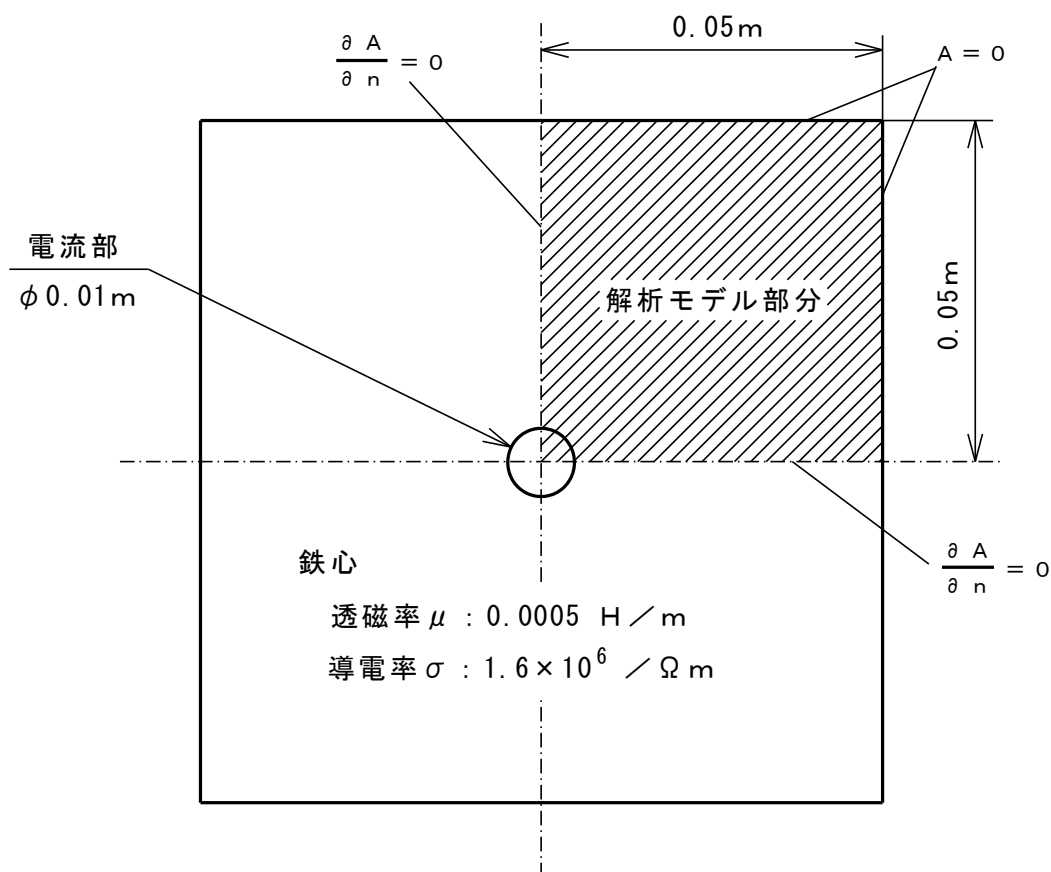
第10章 準定常電磁界（渦電流）の計算例

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、渦電流、インピーダンスも算出されます。

10.1 構造モデル

図10-1にモデル図を示します。同図のように、正方形の鉄心とその中心に電流部がある構造で、対称性から右上の1/4部分を解析モデルに使用します。そして、電流部には円断面全体で断面垂直方向の交流60Hz電流10Aが流れ、その電流密度 J_z を材料物性データとして与えます。

境界条件として、対称中心軸の境界では磁気ベクトルポテンシャル A の対称条件 $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ とし、その他の周囲の境界では $A = 0$ とします。



[電流部材料物性]

透磁率 $\mu : 1.257 \times 10^{-6} \text{ H/m}$

垂直電流 : 10 A (於 $\phi 0.01 \text{ m}$ 全体) 60Hz

電流密度 $J_z : 1.273 \times 10^5 \text{ A/m}^2$

図10-1 準定常電磁界（渦電流）計算例のモデル図

注) 第6章で説明したように、入力の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。

10.2 入力データ

図10-2に構造図の画面、図10-3に入力データファイルの内容を示します。

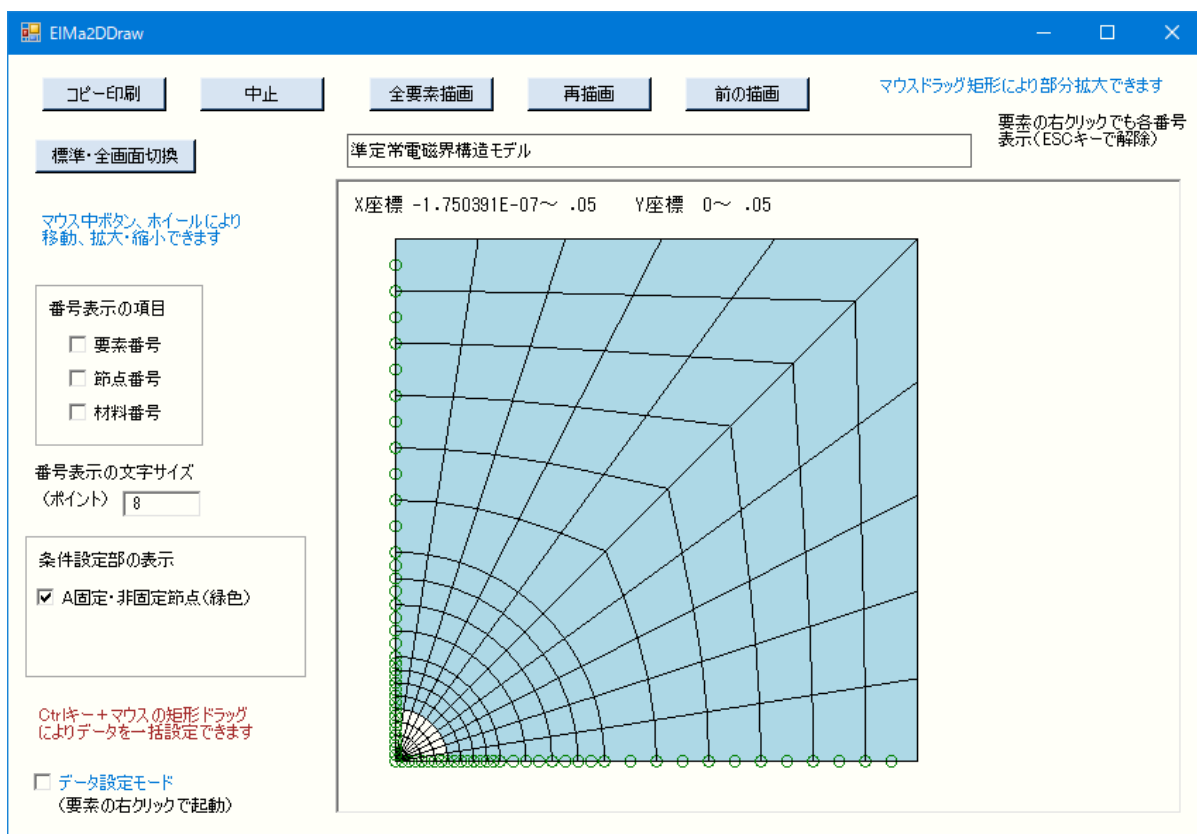


図10-2 準定常電磁界（渦電流）計算例の構造図

```

プログラム名, EleMag2D
準定常電磁界構造モデル
問題のタイプ (2: 2次元、4: 軸対称体), 2
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, 587
要素数, 180
材料データ数, 2
Az固定・非固定の節点数, 71
正弦波周波数 (Hz), 60
ガウス積分点数, 3
1 節点当り変数の数, 2
材料データの成分数, 3
要素データ (要素番号、材料番号、8節点番号)
1, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 7, 6, 4
2, 1, 3, 9, 10, 11, 13, 12, 8, 5
3, 1, 10, 14, 15, 16, 18, 17, 13, 11
4, 1, 15, 19, 20, 21, 23, 22, 18, 16
5, 1, 1, 4, 6, 7, 8, 26, 25, 24
6, 1, 8, 12, 13, 27, 29, 28, 25, 26
7, 1, 13, 17, 18, 30, 32, 31, 29, 27
8, 1, 18, 22, 23, 33, 35, 34, 32, 30
9, 1, 1, 24, 25, 37, 40, 39, 38, 36
10, 1, 25, 28, 29, 41, 43, 42, 40, 37
. . . . .
. . . . .
176, 2, 554, 556, 557, 573, 575, 574, 572, 570
177, 2, 557, 559, 560, 576, 578, 577, 575, 573
178, 2, 560, 562, 563, 579, 581, 580, 578, 576
179, 2, 563, 565, 566, 582, 584, 583, 581, 579
180, 2, 566, 568, 569, 585, 587, 586, 584, 582

```

図10-3 (1/2) 準定常電磁界（渦電流）計算例の入力データファイル

節点データ（節点番号、X座標、Y座標）

```

1,    0,    0
2,    .000625,    0
3,    .00125,    0
4,    .0003086526,    4.888588E-05
5,    .001242305,    9.777176E-05
6,    .0006173052,    9.777176E-05
7,    .0009259577,    .0001466576
8,    .00123461,    .0001955435
9,    .001875,    0
10,    .0025,    0

```

.....

```

583,    -1.312793E-07,    .0425
584,    -1.458659E-07,    .045
585,    .003959442,    .05
586,    -1.604525E-07,    .0475
587,    -1.750391E-07,    .05

```

材料データ（材料番号、透磁率、導電率、垂直電流密度）

```

1,    1.257E-06,    0,    127300
2,    .005,    1600000,    0

```

< Az固定・非固定の境界 >

固定番号、節点番号、Az拘束、Az値

```

1,    1,    0,    0
2,    2,    0,    0
3,    3,    0,    0
4,    9,    0,    0
5,    10,    0,    0
6,    14,    0,    0
7,    15,    0,    0
8,    19,    0,    0
9,    20,    0,    0
10,    140,    0,    0

```

.....

```

67,    580,    0,    0
68,    581,    0,    0
69,    583,    0,    0
70,    584,    0,    0
71,    586,    0,    0

```

図10-3 (2/2) 準定常電磁界（渦電流）計算例の入力データファイル

10.3 計算結果データ

図10-4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は、それぞれ1132、683、177320です。

②節点の計算出力として、各節点の A_z 絶対値、 A_z 複素角、 B_x 絶対値、 B_y 絶対値、全磁束密度が出力されています。

③渦電流密度として、各節点の渦 J_z 絶対値、渦 J_z 複素角が出力されています。

◇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。

④材料別の渦電流として、電流部以外の材料について、断面積、渦 I_z 絶対値、渦 I_z 複素角、渦電力(単位厚さ当り)が合計出力されています。

◇渦電力は、2次元問題では単位厚さ当り、軸対称問題では全周の値となります。

次項のインピーダンスも同様です。

⑤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。

⑥各変数の最大値データが出力されています。

⑦計算時間は0sです。

<<2次元電磁界解析の計算結果>>

準定常電磁界構造モデル

[入力データファイル] , C:\¥VB2022¥2次元電磁界解析¥Data¥Mag3Model.dat

[解析種類] 準定常電磁界(渦電流)

*** 計算結果 ***

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

1132, 683, 177320

** 節点の計算出力 **

②

<節点番号、 A_z 絶対値、 A_z 複素角(°)、 B_x 絶対値、 B_y 絶対値、全磁束密度>

1, .000892183, -43.35967, 6.958966E-06, 6.958953E-06, 9.841455E-06

2, .0008921691, -43.36052, 1.839885E-05, 5.251723E-05, 5.56469E-05

3, .0008921361, -43.36252, 1.526588E-05, 9.677472E-05, 9.797139E-05

4, .0008921784, -43.35995, 4.536839E-06, 2.86443E-05, 2.900136E-05

5, .0008921358, -43.36253, 7.688543E-06, 9.867277E-05, 9.897186E-05

.....

.....

図10-4 (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

583,	5. 220874E-14,	15. 18645,	3. 392502E-11,	4. 769946E-11,	5. 853329E-11	
584,	3. 127852E-14,	199. 359,	1. 350928E-11,	2. 681476E-11,	3. 002553E-11	
585,	0,	0,	2. 895831E-12,	1. 049693E-15,	2. 895831E-12	
586,	1. 620902E-14,	197. 0003,	6. 250948E-12,	1. 278214E-11,	1. 422876E-11	
587,	0,	0,	6. 685981E-12,	1. 255471E-14,	6. 685992E-12	
** 渦電流密度 **						③
<節点番号, 渦 J z絶対値, 渦 J z複素角(°)>						
1,	0,	0				
2,	0,	0				
3,	0,	0				
4,	0,	0				
5,	0,	0				
.						
.						
583,	3. 149157E-05,	-74. 81355				
584,	1. 886675E-05,	109. 359				
585,	0,	0				
586,	9. 777052E-06,	107. 0003				
587,	0,	0				
** 材料別の渦電流 **						④
<材料番号, 断面積, 渦 I z絶対値, 渦 I z複素角(°), 渦電力(単位厚さ当り)>						
2,	. 002480367,	2. 499527,	180,	. 5772068		
** インピーダンス **						⑤
単位厚さ当りの値を示す						
<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>						
1,	1. 963493E-05,	2. 499527,	. 3362073,	. 1345084,	226. 6181	

<最大値データ>						⑥
注) 絶対値の最大。						
変数項目、	最大値、	節点番号				
A z絶対値,	. 0008921831,	1				
B x絶対値,	. 7255125,	257				
B y絶対値,	. 7255124,	140				
全磁束密度,	. 7258553,	140				
渦 J z絶対値,	537712. 8,	21				
END	0h 0min 0s					⑦

図10-4 (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

10.4 等高線図

図10-5～図10-7に A_z 絶対値、全磁束密度および渦 J_z 絶対値の等高線図（カラーフィル有り）を示します。ただし、図10-7の渦 J_z 絶対値については、電流部周囲の拡大図を示しています。

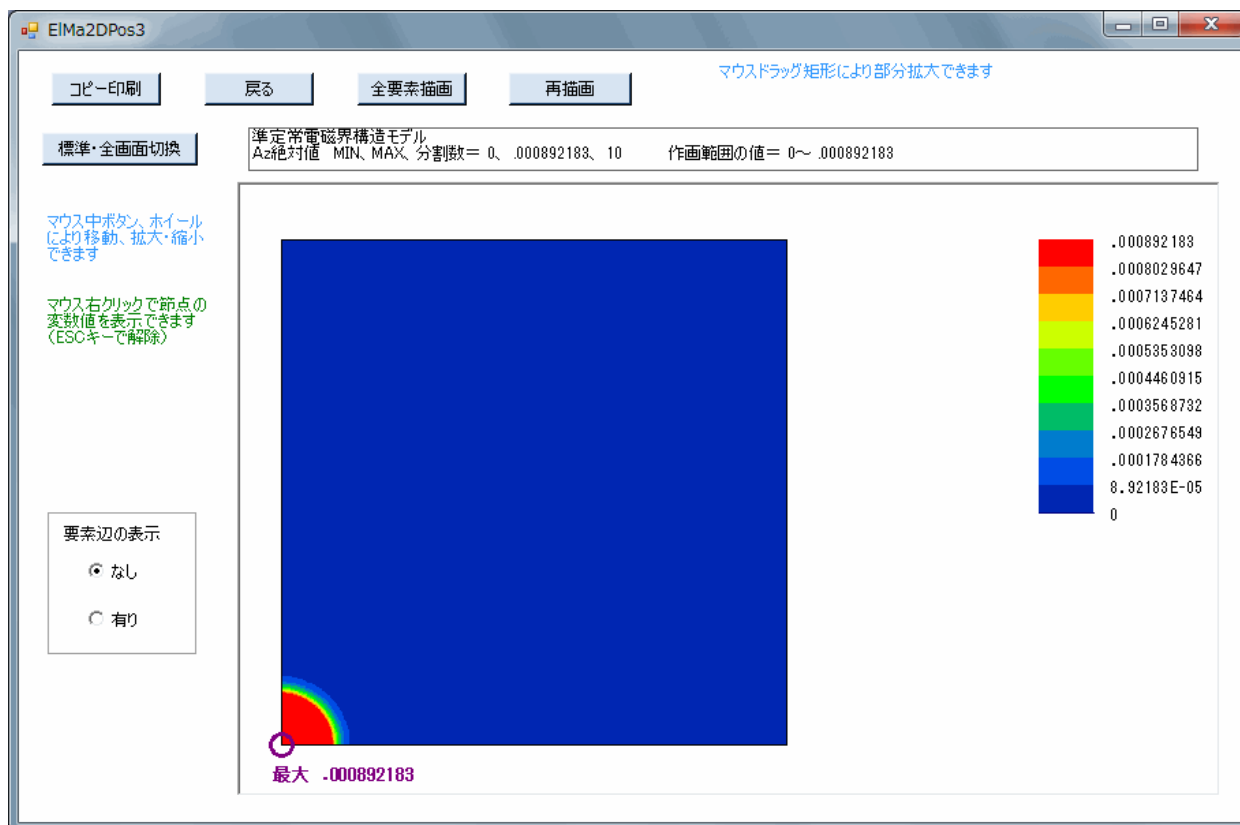


図10-5 準定常電磁界（渦電流）計算例の A_z の等高線図

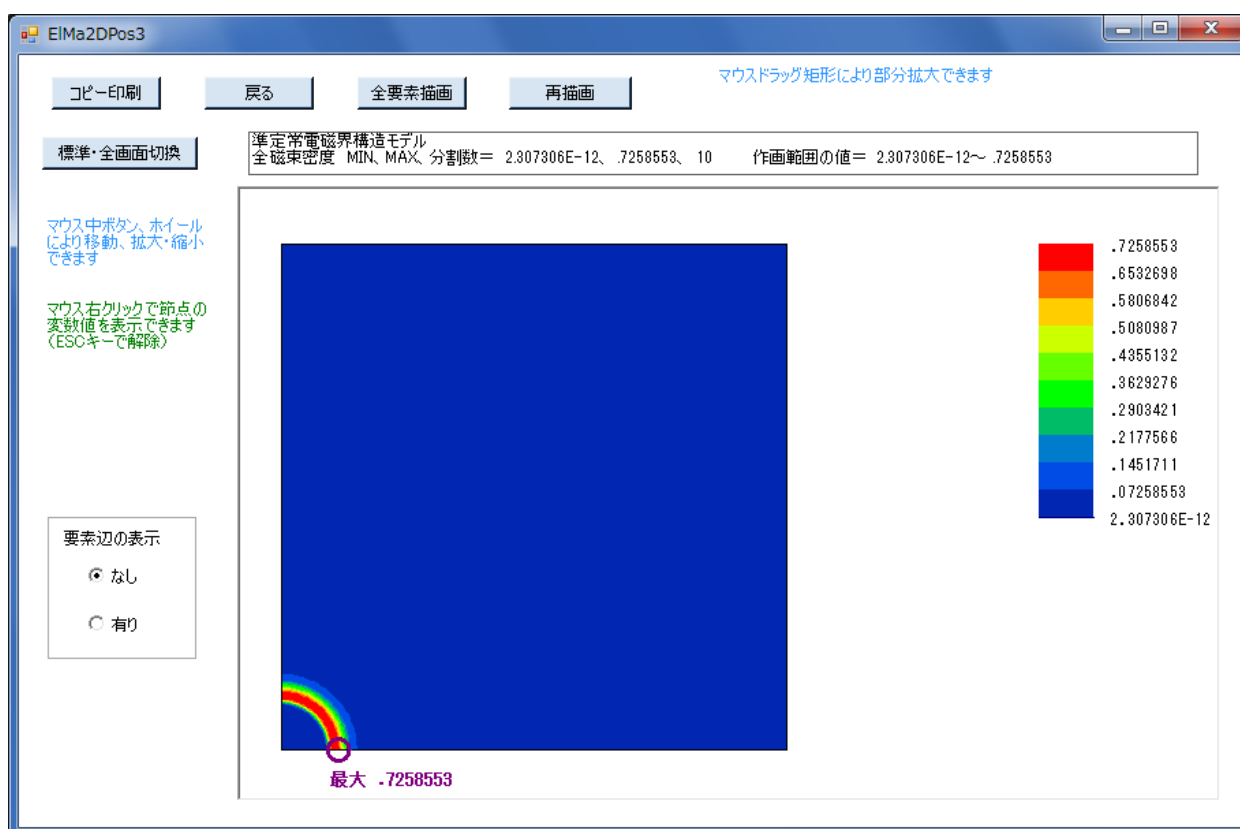


図10-6 準定常電磁界（渦電流）計算例の全磁束密度の等高線図

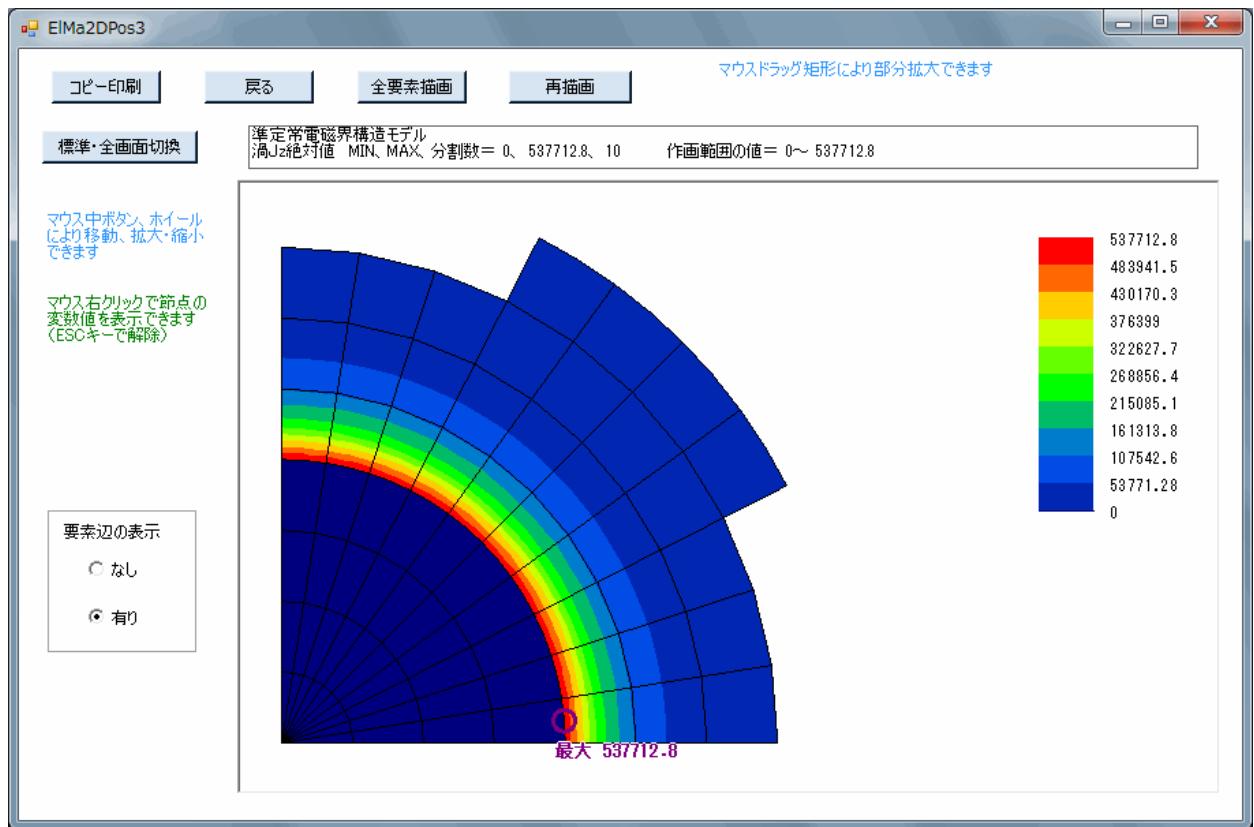


図10-7 準定常電磁界（渦電流）計算例の電流部周囲の渦 J_z 絶対値の等高線図（要素辺の表示有り）

[参考文献]

<A> BASIC言語

- A1) 「Microsoft Visual Basic プログラミング ガイド」、
マイクロソフト (株)、1997
- A2) 「実力アップ Visual Basic.NET 基礎編」、川口 輝久、
(株) 技術評論社、2003
- A3) 「Visual Basic 応用プログラミング」、林 晴比古、
ソフトバンク (株)、1997
- A4) 「Visual Basic for Windows プログラミング・パーツ」、河西 朝雄、
(株) ナツメ社、1994
- A5) 「かんたんプログラミング Visual Basic.NET 応用編」、田中 亨、
(株) オーム社、2002
- A6) 「Visual Basic リファレンス・ブック」、相沢 文雄、
(株) ナツメ社、1994
- A7) 「プログラミング Visual Basic.Net Vol.2 活用編」、Francesco Balena、
(株) ドキュメントシステム 訳、日経BPソフトプレス、2002
- A8) 「Visual Basic 2005 [実践] プログラミングテクニック」、谷尻 かおり、
技術評論社、2007

 数値計算・統計解析・グラフィックス

- B1) 「数学公式・数表ハンドブック」、スピーゲル 著、氏家 勝巳 訳、
マグローヒル ブック (株)、1984
- B2) 「数値解析とその応用」、名取 亮、
コロナ社、1992
- B3) 「Visual Basicによる工学計算プログラム」、黒田 英夫、
CQ出版社、2001
- B4) 「Visual Basicによる数値解析プログラム」、黒田 英夫、
CQ出版社、2002
- B5) 「コンピュータグラフィックス講義」、青木 由直、
コロナ社、2000
- B6) 「線形計算」、名取 亮、
朝倉書店、1993

<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