



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



パーソナル・コンピュータによる有限要素解析 プ リ/ポスト処理システム

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-03-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 守山, 貴庸, 松田, 敏彦 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/589

パーソナル・コンピュータによる有限要素解析 プリ／ポスト処理システム

守山 貴庸, 松田 敏彦

A system of pre – and post – processing on personal computer for finite element analysis

Takatsune Moriyama*, Toshihiko Matsuda

Abstract

A small size system of pre – and post – processing for two – dimensional finite element analysis is presented. It is emphasized to be able to use easily by students with a personal computer. The processing functions of the system are structural drawing with a small size CAD; interactive mesh generation; optimization of node number; displaying of flux lines; evaluation of coil inductances; and so forth.

1. まえがき

有限要素法 (FEM) はその考え方の汎用性から構造力学, 流体力学, 電磁気学など, すなわち土木・建築, 機械, 電気・電子工学などの広い範囲に応用されている。また, 近年の汎用パーソナル・コンピューター, 更にエンジニアリング・ワークステーションの機能向上と普及に伴い, 大学院生, 学部卒業研究生の学習と研究における汎用解析手法の一つとして広く活用される動向にある。FEM解析計算における計算前後のデータ準備と処理, 特に分割図の作図とその諸条件を含む計算入力データの作成には多大な時間と労力が必要である。このFEMのプリ／ポスト処理問題については, 研究者グループなどが汎用大型FEMプログラム (市販品など) を準備したり, 個々の研究者が各自の研究問題向けの自作のプログラムを準備し対処しているのが一般であると思われる。

筆者らの研究室ではFEM解析を応用する回転電気機器に関する研究を行っており, 磁極片, 電機子の歯と溝などの比較的複雑な曲線形状体の電磁界FEM解析を行っている。そこで, 最近広く普及してきた汎用パーソナル・コンピューターにより簡便に使用できる事を目的とした2次元FEM用のプリ／ポスト処理システムを開発した。解析対象の構造図には汎用小型のCADプログラムを使用し, 要素分割法は自動分割アルゴリズムではなく, 対話型分割法であるが, これに

* 大学院工学研究科博士前期課程 (電気電子工学専攻)

より分割図と節点座標値データの作成などが気苦勞無く飛躍的な速さで、かつ正確に行えるようになった。ここに、その概要を紹介する。

2. システムの概要

開発したFEM解析プリ／ポスト処理システムの機能ブロックと作業流れの構成を図1に示す。各機能のプログラムモジュールの名称を各ブロックの右側に記してある。各プログラムの開発にはC言語を使用した。FEM解析計算プログラムは巨大な配列を用い、高速な演算を必要とするためワークステーション上で動作し、それ以外のプログラムはメモリー640KB実装の一般的な汎用パーソナル・コンピューター上で動作する。以下、本章では筆者らの取り扱っている磁界解析の場合を例として各プログラムの機能の概要を述べる。

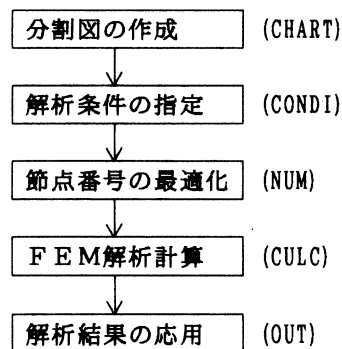


図-1 システム構成図

(1) 分割図作成プログラム (CHART)

節点位置をマウスにより指定して節点を作成した後、要素構成3節点をマウスにより指定して一次三角形要素を作成し、解析対象全体を三角形要素で分割した分割図を作成する。

(2) 解析条件入力プログラム (CONDI)

各種解析条件(要素の電流密度、固定境界条件、材料種類など)を分割図を見ながら入力する。要素・節点の指定はマウスによって行い、電流値・ポテンシャル値の入力はキーボードを用いて行う。入力した解析条件は分割図データの後ろに追加される。

(3) 節点番号最適化プログラム (NUM)

次のプログラム(CULC)で作成される連立一次方程式の全体係数マトリクスのバンド幅が小さくなるように、レベルストラクチャーを用いて節点番号を最適化する。

(4) 2次元FEM解析計算プログラム (CULC)

上記(1)(2)(3)を通して作成された入力データから連立一次方程式を作成し、その解を求め、節点のポテンシャルと要素の磁束密度を出力する。

(5) 解析結果応用プログラム (OUT)

FEM解析計算プログラム(4)の出力データを用いて解析目的諸量の算出、結果の図表示などを行う。すなわち磁束線図の表示、磁束密度分布の色分け表示、磁束密度ベクトル表示とこれらを紙面へ出力する機能が用意されている。指定した節点のポテンシャル及び指定した要素の磁束密度の表示や、それらの値が最小および最大となる要素・節点の探索と最大値、最小値、全体の平均値等の表示、任意コイル間のインダクタンス計算等を行うことが出来る。

3. 各プログラムの機能と特徴

3.1 分割図作成プログラム

本プログラムでは節点の配置と要素の作成をマウスにより対話形式で行い、分割図を作成する。

本プログラムを起動するとまず図2のような画面が表示される。左半面約2/3を作図画面として使用し、右半面約1/3を処理メニューなどの表示に当てている。右半面に表示されている内容は、①処理メニュー、②マウスの位置（CRT上の位置ではなく、分割図上の位置でデカルト座標値と極座標値で表示される）、③作成した節点数と要素数、④全体の縮小図などである。処理メニュー①の内容一覧を表1に示す。

・作図メニュー

ファイル	ロード セーブ
節点作成	追加・削除 移動
要素作成	追加 削除
補助線	表示 非表示 ファイル読み込み
データ チェック	節点チェック 要素チェック
1/4図面からの複写	
プロッターへの出力	

・画面制御メニュー

節点表示（非表示）
重心表示（非表示）
要素表示（非表示）
拡大
縮小

・目盛り線メニュー

方眼目盛り線粗く
方眼目盛り線細かく
方眼目盛り線表示
半径目盛り線表示
角度目盛り線表示
方眼目盛り線固定
半径目盛り線固定
角度目盛り線固定

表-1 分割図作成プログラムのメニュー一覧

分割図作成に必要な処理の選択、節点・要素・節点位置の指定などは全てマウスを用いて行う。すなわち、処理の選択は画面に表示されるメニューをマウスでクリック、またはキー入力することによりなされ、処理によってはサブメニューが表示される。次に、本プログラムを用いた分割図作成手順の概要を示す。

(1) 解析対象の構造線図の作図 解析対象が複雑な形状をもつ場合は、方眼または極座標型の目盛り線だけでは正確な分割図を作成するのは難しい為、市販CADプログラム等を用いて設計仕様どおりの構造線図を作成し、ベクタ形式で保存しておく。次に、分割図作成プログラムを起動して構造線図を読み込み、節点配置作業に進む。

(2) 既存データの読み込み 分割図を修正する時は「load」メニューを選択し、表示されるファイル一覧の中から、読み込みたい既存の分割図ファイルを指定して分割図を読み込む。

(3) 節点の作成 図2に解析対象構造線図と目盛り線を表示した節点作成時の表示画面の例を示す。

節点作成メニューを選択し、必要により画面の移動、拡大、縮小メニューの選択により表示範囲を調整した後、必要な位置でマウスを左クリックすると、その位置に節点を作成される。節点番号は作成順に自動的につけられる。また節点座標の単位は計算プログラム実行時に縮尺を指定

出来る為、任意の単位を用いれば良い。

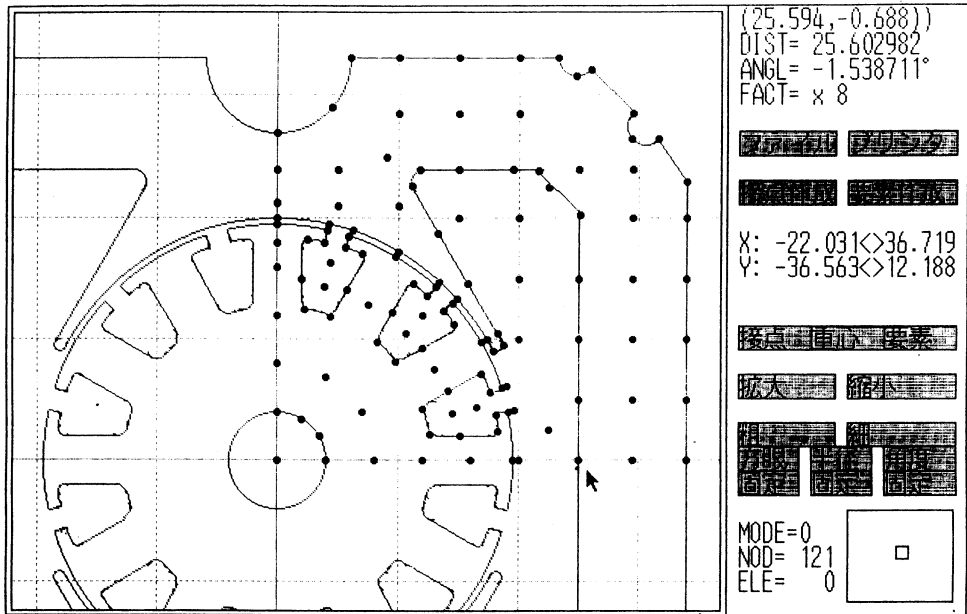


図-2 分割図作成プログラムの表示画面（節点作成時）

図2に示すように、(1)で表示した構造線図上に節点を作成していく事により複雑な形状を持つ物体の分割図も正確に作成できる。直線状に節点を作成したいときは、方眼型目盛り線を表示し、「目盛り線固定」メニューを選択する事により目盛り線からずれた位置を指定していても指定した位置に最も近い目盛り線交点上に節点を作成される。回転機のように円形の境界線が存在するときは同心円型・放射線型の目盛り線を用いる。これらの機能により正確な位置に節点を作成できる。また節点の移動・削除等も行なう事が出来る。

(4) 要素の作成 図3に要素作成段階の表示画面の例を示す。要素作成のメニューを選択し、要素を構成する3つの節点をマウスで順に指定すると、図3の様に指定した3節点を頂点とする一次三角形要素が作成される。要素構成節点は自動的に左回りに並び変えられ記憶される。また要素の削除も行なう事が出来る。

(5) 分割図の複写 回転電気機器など原点对称な物体の場合は節点・要素を第1象現のみに作成しておき、「1/4複写」メニューを選択する事により第2, 第3, 第4象現に対称な分割図が複写される。これにより1/4の労力で分割図が作成できる。

(6) 分割図の出力 必要により、XYプロッターやプリンターへの分割図の出力が可能である。

(7) 分割図の保存 「save」メニューを選択し、ファイル名とコメントを入力すると分割図がファイルに保存される。

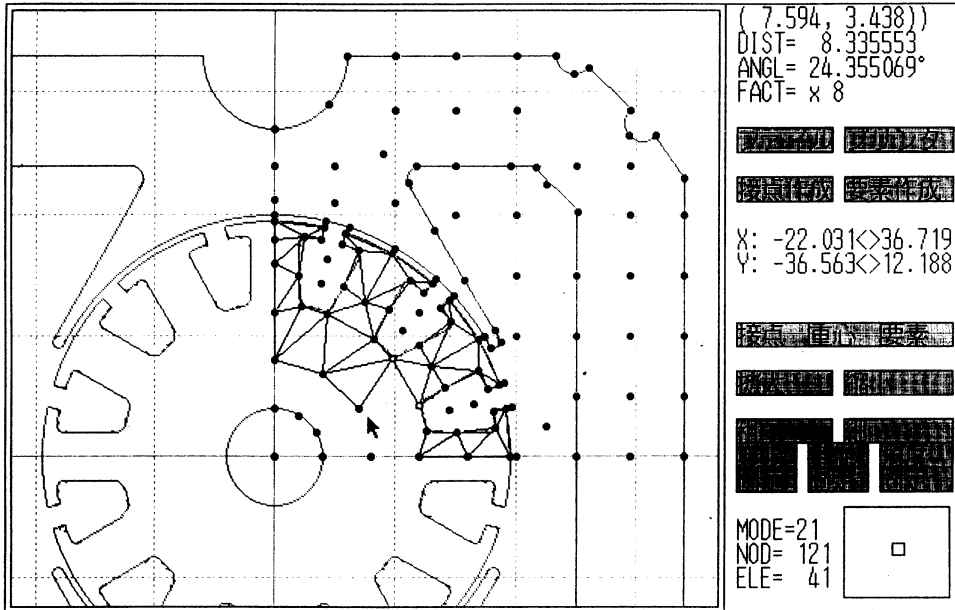


図-3 分割図作成プログラムの表示画面 (要素作成時)

3.2 解析条件入力プログラム

本プログラムでは、3.1で作成した分割図データに既知節点ポテンシャル、要素電流及び要素材料定数の3種の解析条件を付加する。以下、解析条件が付加された分割図データを「条件付きデータ」と呼ぶ。

本プログラムを起動すると、分割図作成プログラムと同様に右半面約1/3にメニューの並んだ画面が表示される。メニューの選択はマウスまたはキー入力によりなされる。メニューの項目一覧を表2に、表示画面の例を図4に示す。解析条件の入手順を以下に示す。

・入力条件選択メニュー

既知節点指定
電流条件指定
エアギャップ指定

・ファイルメニュー

ロード
更新
セーブ

・画面制御メニュー

拡大
縮小

表-2 解析条件入力プログラムのメニュー一覧

(1) 分割図データの読み込み 「load」メニューを選択し、表示されるファイル一覧の中から読み込む分割図データを指定する。解析条件変更の場合は「更新」メニューを選択し、既存の条件付きデータを指定する。

(2) 固定境界条件の入力 入力する条件の種類メニューから「既知節点」を指定する。同じポテンシャル値を持つ既知節点はグループとして取り扱う事が出来るため、必要により、これから指定する既知節点のグループ番号を指定し、そのグループの節点をマウスで指定していく。指定

された節点は赤丸で、別グループの既知節点は図4の内縁や外縁の節点のように緑丸で表示される。リターンキーを押すとグループのポテンシャル値を聞いてくるので入力する。

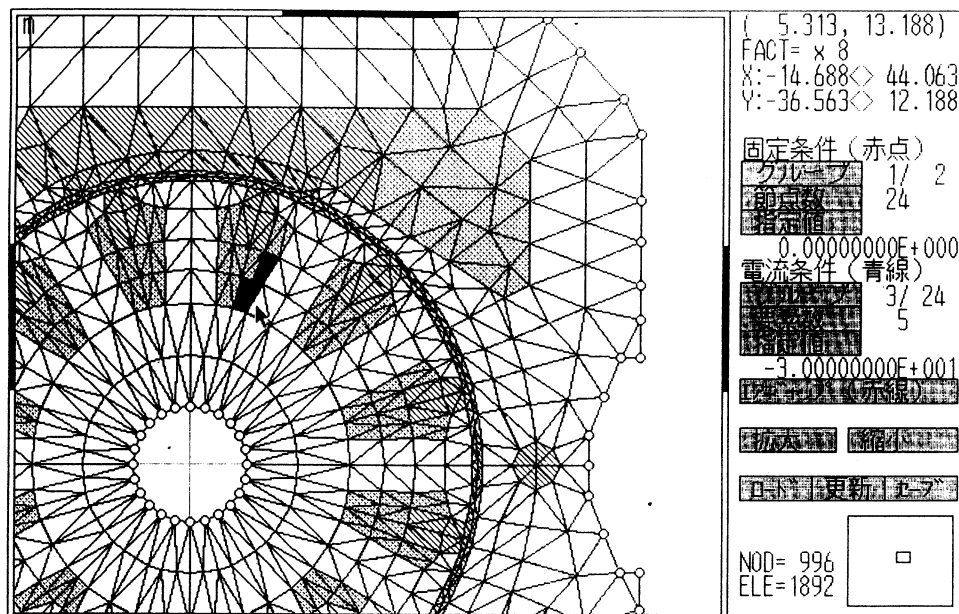


図-4 解析条件入力プログラムの表示画面

(3) 電流条件の入力 入力する条件の種類メニューから「電流条件」を指定する。通電要素は1コイルを構成する要素を1グループとして取り扱う事が出来る為、これから指定する通電要素のグループ番号を指定し、そのグループの要素をマウスで指定していく。指定した要素は図4のように塗りつぶし表示され、別グループの通電要素は青斜線で表示される。リターンキーを押すとアンペアターンが聞かれるので、グループ全体（通常は1コイル当たり）のアンペアターンを入力する。1要素当たりのアンペアターンはFEM解析計算プログラム内で面積配分により計算される。

(4) エアギャップ要素の指定 入力する条件の種類メニューから「エアギャップ」を指定し、マウスによりエアギャップ部分の要素を指定する。指定した要素は赤斜線表示される。

3.3 節点番号最適化プログラム

本プログラムは、連立方程式の全体係数マトリクスのバンド幅を小さくするため、レベルストラクチャーを利用して節点番号の最適化を行う。

プログラムを立ち上げるとファイル一覧が表示されるので、節点番号を最適化したい条件付きデータファイルを選択する。次にレベル1の節点番号（レベルストラクチャーを求める際の起点となる節点の番号で、端の節点を指定すると比較的良好な結果が得られる）とセーブファイル名を

入力すると最適化が行われる。例えば、我々が解析しているモーターでは未知節点862個に対しバンド幅85が得られた。以下3.1, 3.2, 3.3を通して作成されたデータを入力データと呼ぶ。

3.4 FEM解析計算プログラム

本プログラムは3.1, 3.2, 3.3の処理により作成された入力データから、連立一次方程式を作成して解を求め、その結果として得られる節点のポテンシャルと要素の磁束密度の値などを出力する。計算にあたり、計算条件として節点座標に乗ずる縮尺値、線形・非線形解析の選択、誤差判定の有無、繰り返し回数、鉄心の材料定数等を入力する。尚、本プログラムはワークステーション上で実行される。

3.5 解析結果応用プログラム

本プログラムでは、FEM解析計算プログラム用の入力データと解析結果データを用いて種々の後処理を行う。

プログラムを起動すると、分割図作成プログラ

・画面制御メニュー ・解析結果処理メニュー

拡大
縮小
任意倍率
要素指定ジャンプ
節点番号表示
要素番号表示
解析条件表示

解析結果表示
等ポテンシャル線図
磁束密度ベクトル
磁束密度色分け

・その他のメニュー

ロード	分割図ファイル
	分割図+解析条件ファイル
	ポテンシャルファイル
	ポテンシャル+磁束密度ファイル
プロッターへの出力	

表-3 解析結果応用プログラムのメニュー一覧

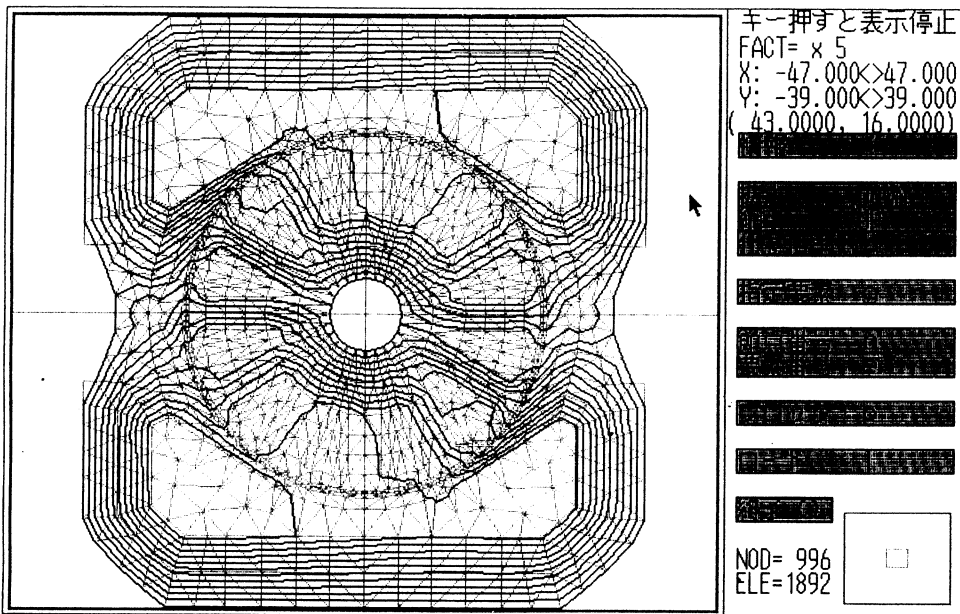


図-5 解析結果応用プログラムの表示画面 (磁束線図表示時)

ムと同様に右半面約1/3にメニューの並んだ画面が表示される。メニューの項目一覧を表3に示す。

そこで、[load]メニューを選択し、3.1、3.2、3.3を通して作成した入力データと、FEM解析計算プログラムの解析結果データを読み込む。分割図が表示され、「解析条件表示」メニューを選択するとエアギャップ要素は青斜線表示で、既知節点は緑丸で、通電要素は赤斜線で表示される。必要により、任意節点のポテンシャル値と要素の磁束密度値の表示、それらの最小値と最大値および平均値の表示、磁束線図表示、磁束密度による色分け表示、磁束密度ベクトル表示、これらの画面のモノクロプリンタによる濃淡印字、分割図のXYプロッターへの出力、任意節点間の磁束鎖交数計算などを行う事が出来る。図5に磁束線図表示の例を示した。

4. 各プログラムの構成

4.1 分割図作成プログラム (CHART)

分割図作成プログラムは、マウスやキー入力があると、マウス位置や入力キーに応じたサブルーチンが呼ばれる構造になっている。図6の様に、節点の座標はdouble型の配列として定義されており、精度は15桁である。作成する節点の位置は、マウスにより指定するためCRT画面上で640×400

```
struct xy {
    double x
    double y
} NOD[i]
int ELE[i][j]
int NODNUM
int ELENUM
```

xおよびy座標に対応する2つのdouble型のメンバを持つ構造体。
節点iの座標
要素iのj番目の構成節点の番号
全節点数
全要素数

図-6 分割図データの内部形式

の解像度しかない。従って正確な分割図を作成するには表示画面を拡大した状態で座標指定を行うか、さきに述べた目盛り線固定機能により指定座標値を目盛り線上に変換する必要がある。要素構成節点番号はint型の配列として定義されている。要素および節点数の上限はメモリ上の制限から2000節点、2000要素程度である。節点座標をfloat型に変更したり、OS2などのOSを用いれば、これ以上のデータを作成する事も可能である。

4.2 解析条件入力プログラム (CONDI)

条件入力プログラムは、マウスやキー入力があると、マウス位置や入力キーに応じたサブルーチンが呼ばれる構造になっている。既知節点、要素電流、要素材料の3種類の解析条件はそれぞれいくつかのグループに分けて指定する。節点及び要素構成節点番号はプログラム

```
int TERMGN[m]
int NTERM[m][g]
int TERMG[m][n]
double TERN[m][g]
```

条件の種類mにおける全グループ数
条件の種類mにおいて、グループgに属する節点(要素)の総数
条件の種類mにおいて、節点(要素)nが属するグループの番号
条件の種類mにおいて、グループgに設定されている条件値
(m=1:既知節点、m=2:通電要素、m=3:要素材料)

図-7 解析条件入力プログラムにおける解析条件データの内部形式

CHARTと同じ形式で記憶され、既知節点・要素の電流・要素の材料種類は図7のようにint型の配列とdouble型の配列を用いてグループ毎に記憶される。

4.3 節点番号最適化プログラム (NUM)

節点番号最適化プログラムは、レベルストラクチャーによりバンド幅が小さくなるように節点番号を最適化する。レベル1の節点番号(起点となる節点の番号)を入力し、その節点の隣接節点をレベル2の節点とする。更にレベル2の各節点の隣接節点をレベル3とし、以下全ての節点のレベルを求める。レベル1の節点から順に番号をつけてゆけばバンド幅が小さくなるように節点番号を最適化する事が出来る。

4.4 解析結果応用プログラム (OUT)

解析結果出力プログラムは、マウスやキー入力があると、マウス位置や入力キーに応じたサブルーチンが呼ばれる構造になっている。FEM解析計算プログラム用の入力データと解析結果データを読み込み各種の処理を行う。節点座標および要素構成節点はCHARTと同じ形式で記憶され、解析条件は図-8のように、int型の配列を用いて指定された節点と要素番号が記憶される。

```
int DIRI [n]  節点nの属する既知節点グループの番号
int CURR [n]  要素nの属する通電要素グループの番号
int AIR [n]   要素nの材料を示す数値(空気= 1, 鉄=-1)
```

図-8 解析結果応用プログラムにおける
解析条件データの内部形式

5. データファイルの書式

5.1 解析計算プログラム用入力データの書式

プリ処理プログラム(CHARTからNUM)を通して作成されたFEM解析計算プログラム用の入力データはMS-DOSのテキスト形式のデータで一般のエディタでの編集が可能である。データの1行目はコメント行である。既知節点は混乱を防ぐためにいくつかのブロックに分けて記述する。通電要素は通常1コイルを1グループとして記述し、グループ全体のアンペアターンを記述する。1要素当たりのアンペアターンはFEM解析計算プログラム内でグループ内の各要素の面積から算出される。入力データの一例を図9に示す。

5.2 解析結果データの書式

FEM解析計算プログラム(CULC)の出力データもMS-DOSのテキスト形式のデータである。1行目はコメント文であり、その後に計算に用いた磁化特性曲線の種類が付加される。全節点のポテンシャル値の後に入力ファイル名、演算時間、鉄心の材料定数、計算に用いるポテンシャル修正値(増分 δA)の最大値(最大誤差)が出力される。また、指定により全要素の磁束密度、磁気抵抗率、全節点のポテンシャル修正値(増分 δA)が出力される。出力データの一例を図10に示す。

```

#サンプルデータ
00010 00009
      3 8 6 2 6 5 3 6 2
      4 3 2 1 2 5 7 1 5
      9 2 1 4 2 9 9 10 4
      ←コメント
      ←総節点数，総要素数
      ←各要素の構成節点
      要素1は節点3，8，6
      を頂点とする要素である。

-4.750000 -7.500000 4.500000 8.250000 ←各節点の座標
16.500000 18.000000 18.500000 6.750000
-14.000000 8.500000 -5.000000 20.250000
-22.500000 -6.500000 6.500000 31.250000
15.750000 -9.250000 30.750000 -10.250000

00002 ←既知節点の総グループ数
00004 0.000000e+000 ←グループ1の節点数，ポテンシャル値
      5 6 7 8 ←グループ1に属する節点の番号
00002 3.000000e+000 ←グループ2
      9 10 ←グループ2

00002 ←通電要素の総グループ数
00003 2.000000e+000 ←グループ1の要素数，アンペアターン値
      1 2 3 ←グループ1に属する要素の番号
00002 -2.000000e+000 ←グループ2
      8 9 ←グループ2

00001 ←形式的な値で必ず1が書き込まれる。
00003 1.000000e+000 ←エアギャップ要素の要素数，1は形式的な値
      1 2 3 ←エアギャップ部分の要素番号
    
```

図-9 入力データの一例

```

#サンプルデータ.. [CULC4-1].. 35H440近似 ←コメント及び磁気特性近似種類
1.21697549177e+000 1.50818628401e+000 2.03086109146e+000 ←各節点の
2.18412492581e+000 0.00000000000e+000 0.00000000000e+000 ポテンシャル
0.00000000000e+000 0.00000000000e+000 3.00000000000e+000 の値
3.00000000000e+000

-8.90134446947e+001 -8.51432949254e+001 ←各要素の
-6.18030577396e+001 -8.06873253823e+001 磁束密度値
-5.54987827567e+001 -8.86506453608e+001 (x, y成分)
-5.13771129407e+000 -4.77322910474e+001
-2.91585732138e+001 -8.11284670651e+001
-3.76498332305e+001 -6.64408821714e+001
-3.10372437539e+001 -8.43272844711e+001
-5.82186840804e+001 -4.20450439632e+001
-5.04145257088e+001 3.36096838059e+000

----- 計算結果 ( CULC4-1 1992.3/18 ) ----- ←その他の情報
load-file [h:%sample.opt] :縮尺 = 0.001
(サンプルデータ)
TIME=1 [sec] / cul 5 times
ERROR CHECK = ON ( 3.103624e-016 < 1.000000e-010 )
ERROR [ 1]=1.730427e+000
ERROR [ 2]=3.142107e-001
ERROR [ 3]=3.127578e-003
ERROR [ 4]=2.111383e-010
ERROR [ 5]=3.103624e-016
    
```

図-10 出力データの一例

6. あとがき

大型コンピューターやワークステーション上で動作するプリ／ポスト処理を含む有限要素法解析プログラムは存在するが、これを研究室レベルで使用するのには難しい。筆者らはシステム環境としてパソコンを使用する事により、グラフィック画面やプロッター等の外部機器を活用しうるプログラムの作成を容易に行うことが出来た。これらのプログラムにより、特に入力データ作成段階で、分割図や入力した解析条件を視覚的に確認しながら作業を行う事ができ、信頼性の高いデータを飛躍的な速さで作成・変更できる様になった。また計算部分に限りワークステーションを使用する事により、演算時間やデータ転送を含め全体として十分実用的なシステムを構築する事ができ、作業能率が大幅に向上した。回転電気機器以外の解析に於いても、プリ／ポスト処理システムの構築をパソコン上で行う事により、少ない労力でシステムを作成し、作業の大幅な能率化、簡便化が図れると思われる。また、要素分割数が600程度の場合、あるいはOS2等を使用するならばパーソナル・コンピューター上で行列計算を含めた全処理を行える様になり、試算的な解析利用や教育用への利用が可能になるとと思われる。