

## 4 節点アイソパラメトリック要素生成プログラム isop4mesh について

2025.06.01

### 1. 本プログラムの概要

本プログラム (isop4mesh.exe) は、メッシュ生成を行う領域をいくつかの小領域に分割し、その小領域を多数の四角形に分割して、4 節点アイソパラメトリック要素に基づく有限要素法 (FEM) プログラムに必要なメッシュデータを自動生成するものである。さらに、マウス操作で拘束節点や荷重節点を指定し、FEM 用ファイルを出力できる。このファイルを利用すれば、ただちに FEM 解析を行うことができる。

### 2. 本プログラムのアルゴリズムおよび特長

要素分割の基本的な考えは、L. J. Segerlind 著、川井監訳、「応用有限要素解析」、丸善 (1985) <sup>①</sup> に述べられている領域分割法 (subdivision method) に負っている。この著書に示されている FORTRAN のプログラムを基に、Visual Basic 2022 のインタラクティブ機能を追加して開発した。なお、同書は 3 角形要素の生成に関して述べているが、本プログラムは、そこで述べられているアルゴリズムを 4 角形生成に変更して作成したものである。

本プログラムが有する主な機能は、

- 1) 生成可能な要素数、節点数は 30000 節点まで。
- 2) マウスのクリック、ラバーバンドなどによって、変位条件や荷重条件を簡単に指定できる。
- 3) 対象とする図のマウスによる移動や拡大縮小が可能なので、境界条件の設定が容易。
- 4) 材料数は 300 個までとしており、複合材料に対しても利用可能。
- 5) R. J. Collins の提案したバンド幅縮小アルゴリズム<sup>②</sup>を本プログラムに組み込み、FEM による解析時間を減少させることが可能。
- 6) 本プログラムによって生成したファイルを、4 節点アイソパラメトリック要素に基づく平面弾性解析 FEM プログラム (isop4.exe) の入力ファイルとして利用可能。

などである。

### 3. 用意すべきデータとメッシュ分割の実行例

#### 3. 1 解析形状

メッシュ自動分割の例として、図 1(a)の円孔を有する帯板の引張りを取り上げてユーザーが準備すべきデータを説明する。この平板の材料は軟鋼とし、縦弾性係数は  $E=206 \times 10^9 \text{N/m}^2 = 206 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ 、ポアソン比は  $\nu=0.3$ 、板厚は、 $h=4 \text{ mm}$  とする。

ここで、問題の対称性を考慮して、図 1(a)の破線で示した左上の 1/4 の部分の領域を考えて要素分割を考える。

したがって、図 1(b)に示した領域が解析対象となる。さらに、この領域を、図 1(c)のように 3 個の 4 角形に分割し、各々の 4 角形の 4 つの頂点のほかに、各辺の中心付近 (必ずしも中心である必要はないが) にも節点を設ける。これらの節点については、1 から番号付けをしてそれらの (x, y) 座標をあらかじめ求めておく。番号付けは任意でよいが、規則性を与えるとわかりやすい。ここでは、図 1(b)の点 A を原点にすると、18 個の各節点の座標は

1, 0.0, 0.0	9, 60.0, 20.0
2, 10.0, 0.0	10, 60.0, 27.5
3, 20.0, 0.0	11, 60.0, 40.0
4, 30.0, 0.0	12, 40.0, 40.0
5, 40.0, 0.0	13, 20.0, 40.0
6, 41.52, 7.65	14, 37.0, 23.0
7, 45.85, 14.14	15, 10.0, 40.0
8, 52.35, 18.48	16, 0.0, 40.0

17, 0.0, 20.0

18, 20.0, 20.0

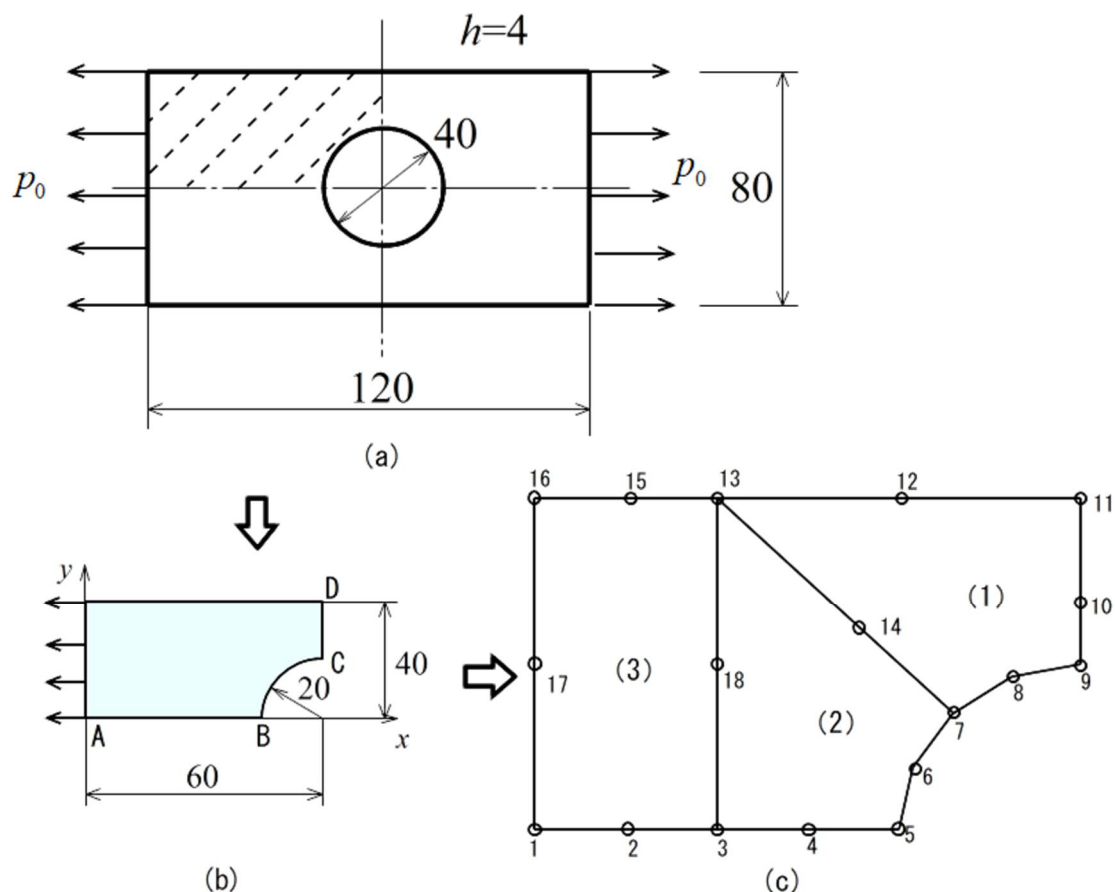


図 1 円孔を有する帯板の引張り

となる.

これらは、使い慣れたエディタ（ワードパッドや秀丸エディタなど）を利用して半角で入力し、データの区切りを半角のコンマ、また、見やすさのために、適当に半角の空白を入れて作成するとよい. あるいは Microsoft Word を用いて作成してもよく、その場合には、1)「ファイル」→「名前を付けて保存」、2) 保存先を選ぶ、3)「ファイル名」欄に、拡張子を含めた名前を入力（例：enkou.grd（独自拡張子））、4) 「ファイルの種類」欄は「すべてのファイル (.\*)」を選択、5)「保存」をクリック、とすればよい.

図 1 (c) の節点は、1 から始まる任意の番号を有していて、節点の総数は 18 個である. このとき、(1)、(2)、(3) と表された、4 角形から構成される各小領域は、角部に 4 個、辺の中間に 4 個の節点を有している.

たとえば、図 2 のように、領域 (1) は 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 と左回りの節点番号により囲まれている. また、はじめの 3 個の節点 7, 8, 9 を含む辺を辺番号 1 と数え、左回りに辺 2, 辺 3, 辺 4 と数える.

領域分割の際には、これらの辺がどの領域と接続しているのかも必要な情報である. たとえば、接続する

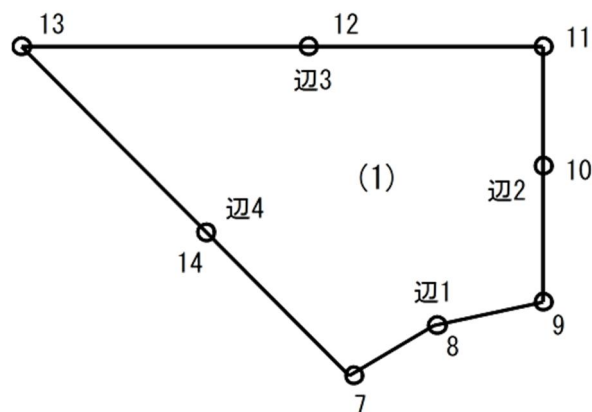


図 2 領域 (1) と辺番号

領域がない場合は0として、領域(1)の4つの辺の接続状況は

領域(1) 辺1→0, 辺2→0, 辺3→0, 辺4→2

と表すことができる. ほかの領域についても

領域(2) 辺1→0, 辺2→0, 辺3→1, 辺4→3

領域(3) 辺1→0, 辺2→2, 辺3→0, 辺4→0

となることがわかる.

次に, それぞれの領域(1), (2), (3)を基盤の目のように細分割することを考える. 図3は, 領域(1)を行方向に7本の分割線, 列方向に7本の分割線で分割した例を示す. このとき, 辺1と辺3に挟まれた方向を行(row)方向, 辺2と辺4に挟まれた方向を列(column)方向とよぶことにする.

行分割線数と列分割線数によって要素分割の粗密を調整することができる. なお, 図3の基盤の目の分割線は, 変数 $x$ の2次曲線によって表されている. この細分割によって, 領域(1)は49個の節点と36個の4角形要素に分割されたことになる. また, これらの各節点や要素には番号付けがなされている.

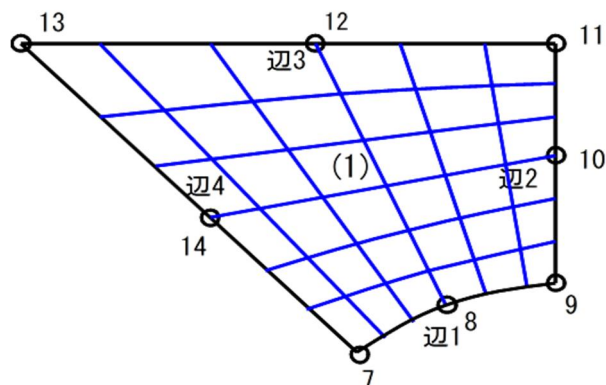


図3 領域(1)の細分割(7×7)

次に, 領域(2)の細分割の様子を図4(a), (b)に示す.

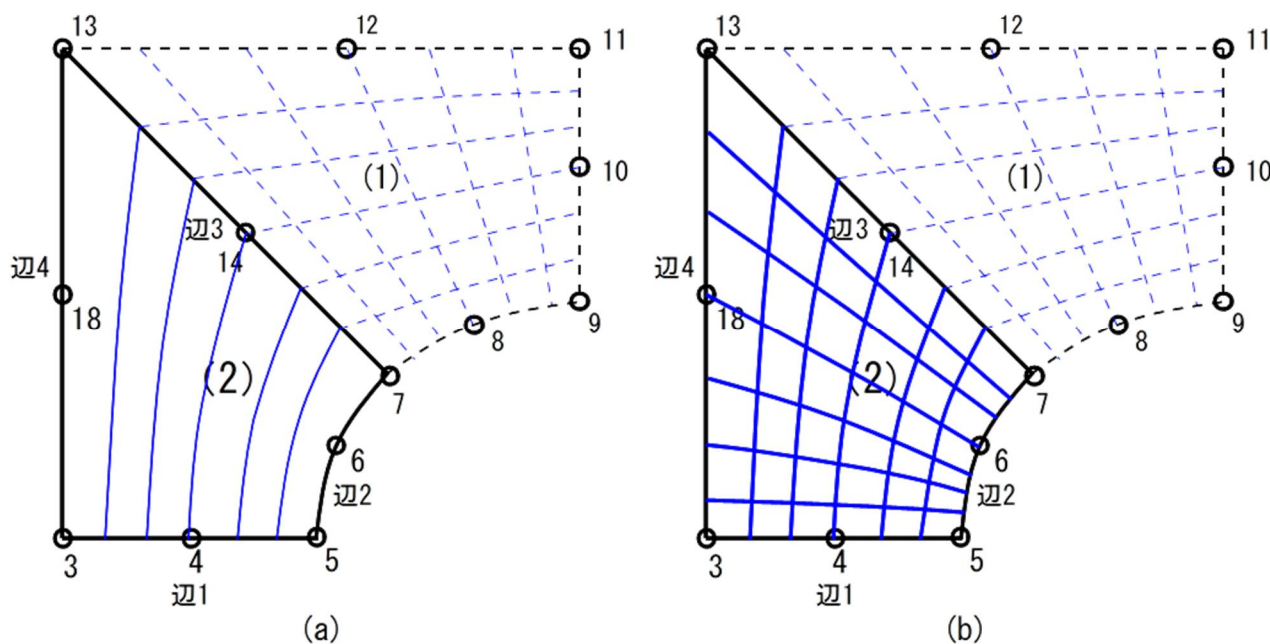


図4 領域(2)の細分割(8×7)

図4(a)は, 節点3, 4, 5を辺1と定め, 領域(2)の辺2と辺4とで挟まれた列方向を7分割した様子を示す. この場合の分割線数7は, 領域(1)の行分割線数7と同数である必要がある(そうでないと基盤の目の数に食い違いが生じて要素分割が正しく行われない). 一方, 図4(b)は, 節点3, 4, 5の辺1と節点7, 14, 13の辺3とで挟まれた行方向を8分割した様子を示す. この行方向の分割数には制約はないが, 次に説明する領域(3)の分割数の設定に影響を与える. 以上により, 領域(2)は56個の節点(ただし7個の節点は領域(1)と重複している)と42個の4角形要素に分割される.

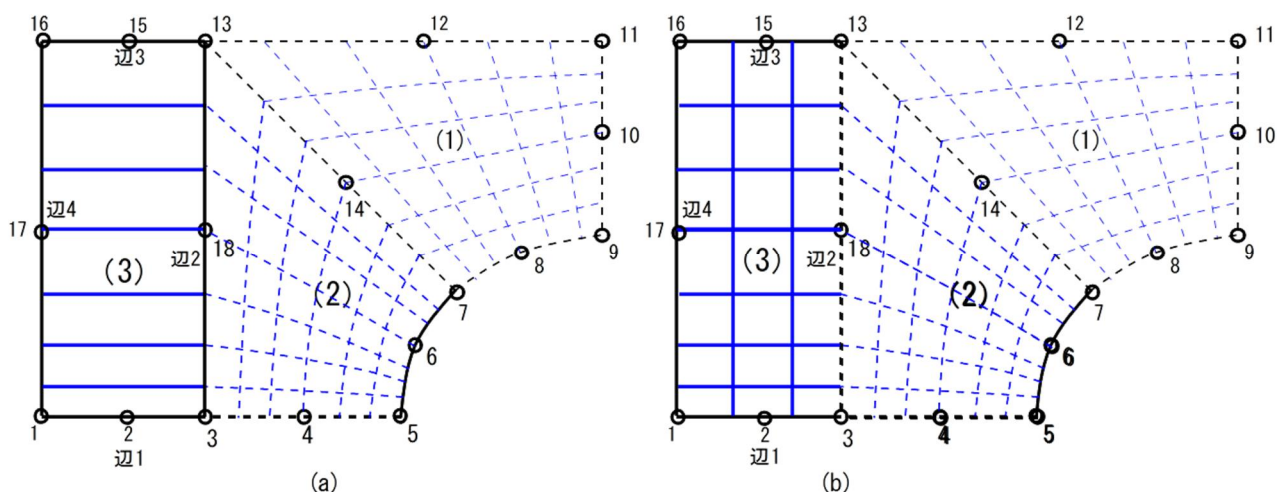


図 5 領域 (3) の細分割 (8×4)

図 5(a) は、節点 1, 2, 3 を辺 1 と定め、領域 (3) の行方向を 8 本の分割線で分割した様子を示す。この場合の分割線数 8 は、先の領域 (2) での説明と同様、領域 (2) の行分割線数 8 と同数である必要がある。一方、図 5(b) は、節点 3, 18, 13 の辺 2 と節点 16, 17, 1 の辺 4 との間の列方向を 4 分割した様子を示す。この列方向の分割数に対する制約はないが、なるべく正方形に近い 4 角形を生成するように決めるとよい。

以上の手順により、3 個の小領域を基盤の目のように 4 角形要素に分割し、その結果、領域全体を小さな 4 角形要素で覆うことになる。これが領域分割法の基本的な考え方である。したがって、正しい分割を得るには、接続する領域の整合性（隣り合う辺上では、縦分割数あるいは横分割数を合致させること）に対する配慮が重要である。

図 5(b) からわかるように、これまで示した分割法では総節点数が 122、総要素数 99 となることがわかる。これらの節点には、当初は、図 6 に示すように網の目の規則性に応じた番号付けがなされている。しかし、このままでは、要素を囲む 4 節点の番号差が大きい要素（たとえば、領域 (3) の右上の要素では、104, 50, 43, 101 の節点番号となっていて番号差が 61 となっている）があつて、連立一次方程式

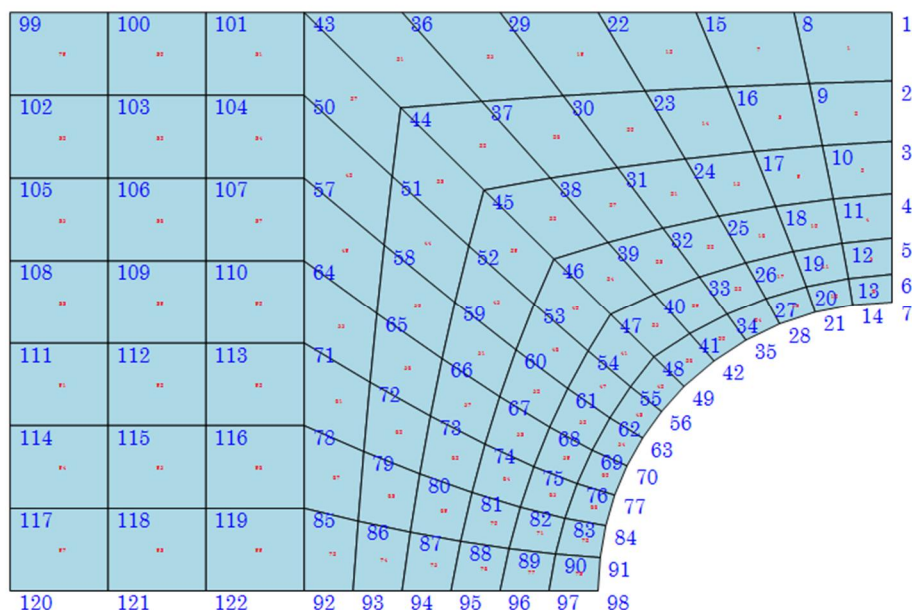


図 6 バンド幅最小化処理前の節点番号

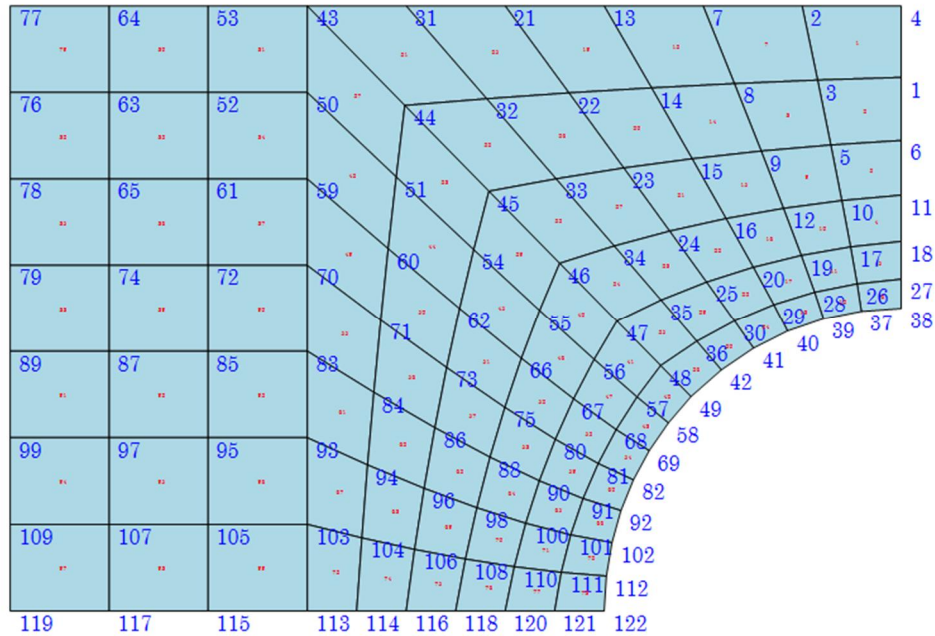


図 7 バンド幅が最小化された節点番号

を解くには適切とはいえない．そこで，本プログラムではCollins のバンド幅最小化アルゴリズム<sup>(2)</sup>によって節点番号のつけ替えを行うようにしている．その実行結果を図 7 に示す．これにより節点番号差が縮小されていることがわかる．なお，この節点番号最適化処理は，ユーザーには見えない形で処理されているのでユーザーは特別に何かをする必要はない．

Collins のアルゴリズムは，簡単に言えば，「節点番号が  $i$  番目まで決定した場合，その次の節点番号  $i+1$  は，番号づけのされていない節点から， $i$  番目の節点より最も近い距離にある節点を選ぶ」という考え方である．この考えに従えば，各々の要素を囲む 4 節点の番号差が小さくなるが見込まれる．これは，FEM の全体剛性方程式の係数マトリックスの非対角成分が対角成分の近くに寄り集まってくることを意味し，結局は，連立一次方程式を効率的に解くことにつながる．

### 3. 2 要素分割のためのデータ

以上に示した内容に沿った，メッシュ生成のためのデータ（ファイル名を `enkou.grd` とする．ここで `.grd` はファイル拡張子を表す）の内容を以下に示す．なお，以下のデータは半角で入力する必要があり，コンマでデータの区切りを表す．

enkou.grd の内容

Tension of a strip with a hole	9, 60.0, 20.0
3, 18, 1	10, 60.0, 27.5
1, 0.0, 0.0	11, 60.0, 40.0
2, 10.0, 0.0	12, 40.0, 40.0
3, 20.0, 0.0	13, 20.0, 40.0
4, 30.0, 0.0	14, 37.0, 23.0
5, 40.0, 0.0	15, 10.0, 40.0
6, 41.52, 7.65	16, 0.0, 40.0
7, 45.85, 14.14	17, 0.0, 20.0
8, 52.35, 18.48	18, 20.0, 20.0



1, 2, 0, 0, 0	2, 1, 8, 7, 3, 4, 5, 6, 7, 14, 13, 18
2, 0, 0, 1, 3	3, 1, 8, 4, 1, 2, 3, 18, 13, 15, 16, 17
3, 0, 2, 0, 0	1, 206e3, 0.3, 4.0
1, 1, 7, 7, 13, 14, 7, 8, 9, 10, 11, 12	

最初の行の

Tension of a strip with a hole

は、データの内容を表すコメント文である。次の

3, 18, 1

はそれぞれ、領域数、総節点数および材料数を表す。続く

1, 0.0, 0.0

.....

18, 20.0, 20.0

は、各節点の番号と(x,y)座標であり、節点の数だけ入力する。ここでは、長さの単位として mm を用いている。

次の

1, 2, 0, 0, 0

2, 0, 0, 1, 3

3, 0, 2, 0, 0

は、3. 2 節で述べた各辺の接続状況を表すデータであり、これに基づいて、生成される要素番号や節点番号の連続性を維持する。

次の

1, 1, 7, 7, 13, 14, 7, 8, 9, 10, 11, 12

2, 1, 8, 7, 3, 4, 5, 6, 7, 14, 13, 18

3, 1, 8, 4, 1, 2, 3, 18, 13, 15, 16, 17

は、各領域の領域番号、材料番号、分割する行方向の分割線数、列方向の分割線の数、および各領域を左回りに囲む 8 個の節点番号である。これらは、領域の数だけ準備する必要がある。分割する行方向の線の数および列方向の線数を調整することによって要素分割の細かさを指定できる。

最後の

1, 206e3, 0.3, 4.0

は、材料番号、縦弾性係数、ポアソン比、板厚（平面応力の場合は板厚寸法を指定し、平面ひずみの場合は板厚を 0.0 とする）を表し、材料の数だけ準備する。なお、ここで与えた縦弾性係数  $E=206e3[N/mm^2]=206 \times 10^3 N/mm^2$  は、力の単位として N（ニュートン）、長さの単位として mm（ミリメートル）の次元を有している。これは、本問題に作用させる力はニュートン単位で与え、節点の座標の単位ミリメートルで与えたことに適合させるためである。同様に、材料の板厚  $h=4.0$  は、ミリメートル単位である。ユーザーは、長さおよび力にどのような単位を用いているかを意識して縦弾性係数の値を与える必要がある。なお、ポアソン比は無次元なので単位への配慮は不要である。

### 3. 3 要素分割

ファイル **enkou.grd** を作成したのち，本プログラムを起動すると図 6 のような起動画面が現れる．続けてツールメニュー「ファイル」→読み込み とたどって，ファイル **enkou.grd** を読み込むと，図 7 のような小領域の分割図が描かれる．



図 6 起動画面

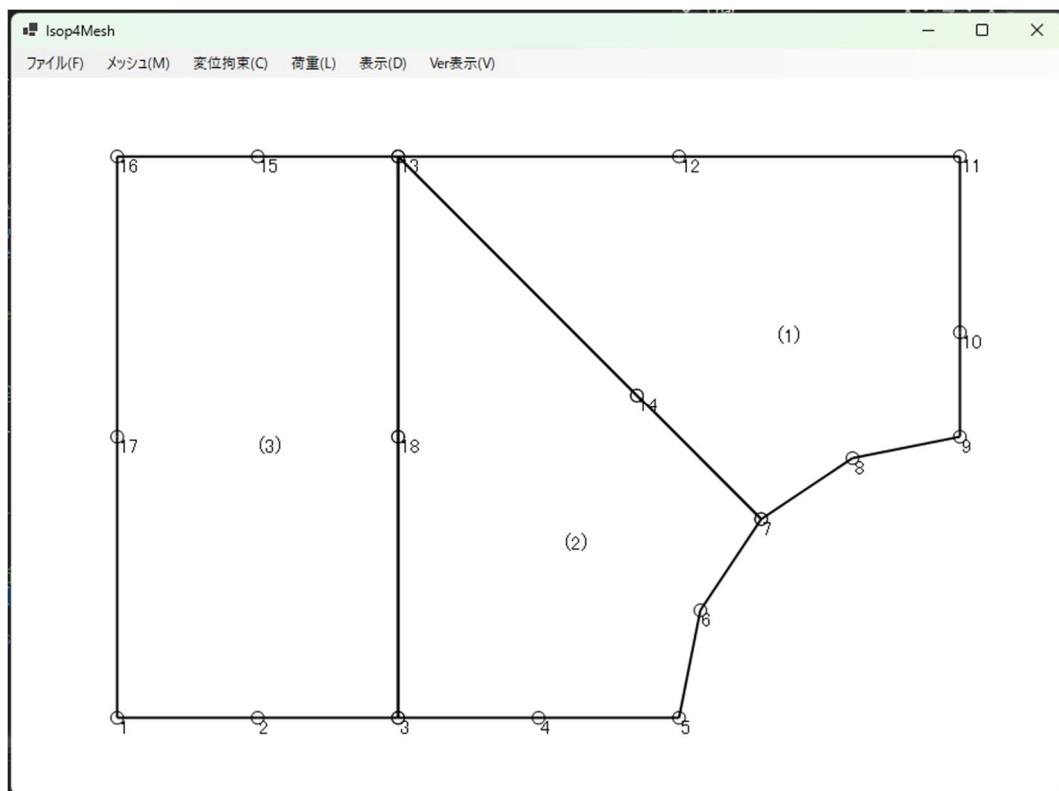


図 7 小領域の分割図

この画面は，図 1(c)に示したような，領域をいくつかの小領域に分割した状態を表示している．この画面によって，データミスをチェックすることもできる．

次に，ツールメニューの「メッシュ」→「メッシュ分割」を選択すると，図 8 のようなメッシュ分割

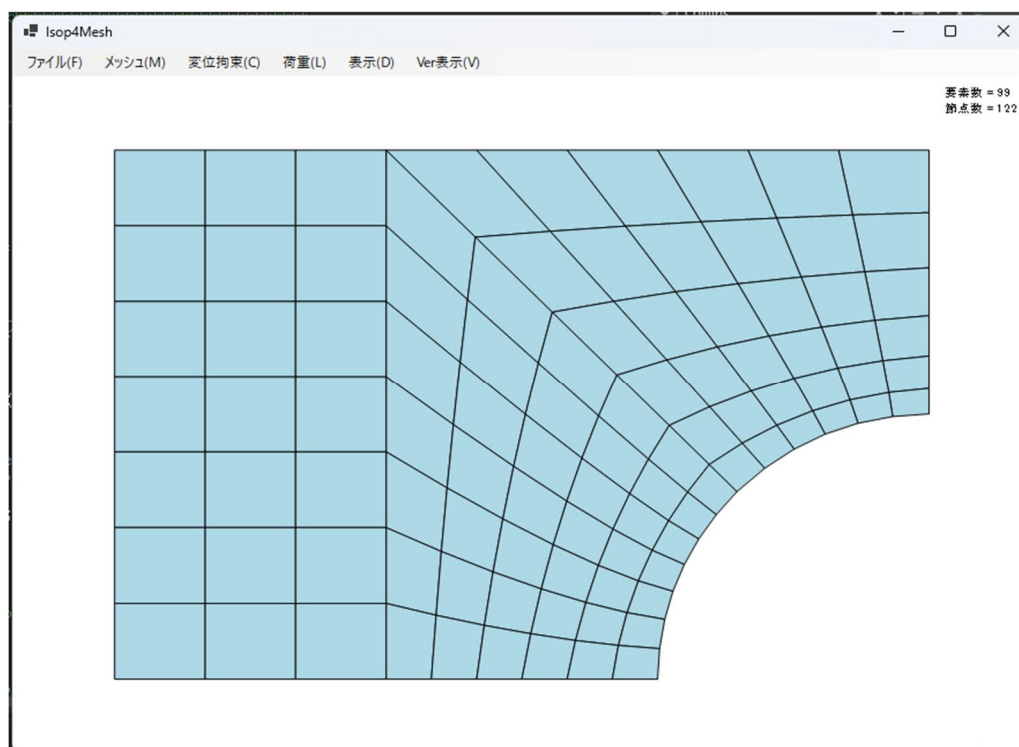


図 8 円孔問題の要素分割

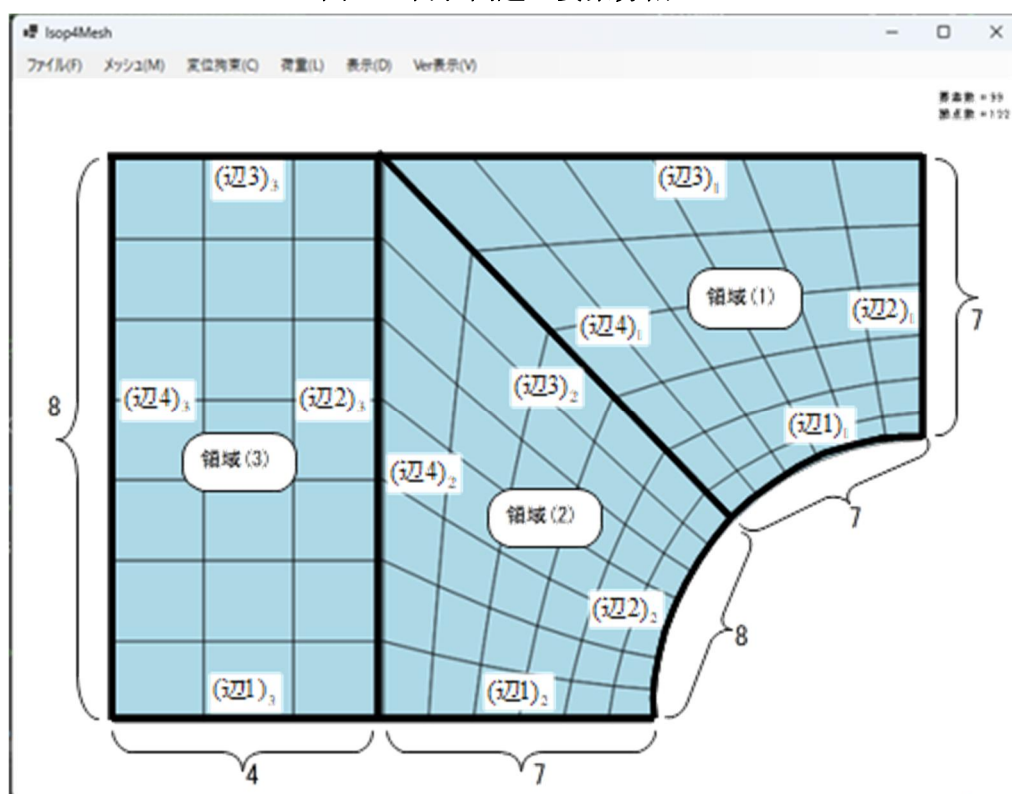


図 9 各領域の格子線による分割

画面が表示される。



これは、図 9 に示すように、領域 (1) を 7 行 7 列、領域 (2) を 8 行 7 列、領域 (3) を 8 行 4 列の格子状に分割して得られた要素分割図で、全体で 122 節点、99 要素となっている。

### 3. 5 要素分割に必要なデータ

要素分割プログラム isop4mesh.exe が必要とする入力データを以下のようにまとめておく。再度、enkou.grd と照らし合わせながら理解してほしい。

(1) コメント (1 行)

データに対するコメント

(2) 基本データ (1 行)

領域の総数、境界点の総数、材料数

(3) 各領域の境界点データ (境界点の数だけ用意する)

境界点の番号,  $x$  座標,  $y$  座標

(4) 連結データ (領域の数だけ用意する)

領域番号, 辺番号 1 から 4 までの連結データ (4 個)。

(5) 領域データ (領域の数だけ用意する)

領域番号, 材料番号, 領域の行分割数, 領域の列分割数,

四角形を定義する全体節点番号 (8 個) (辺 1 より始めて反時計回り)

(6) 材料データ (材料の数だけ用意する)

材料番号, 縦弾性係数, ポアソン比, 板厚 (平面ひずみ問題の場合は 0.0 を入力)

## 4. 変位拘束および荷重の指定, ファイル出力

### 4.1 変位拘束および荷重の指定

以上の処理により、小領域が多数の要素に分割された。続いて、変位が拘束された節点や荷重が作用する節点を指定する処理に移る。

まず、図 1(b)の辺 CD は  $x$  方向の変位がゼロ、辺 AB は  $y$  方向の変位がゼロとなることに注意する。そこで、ツールメニューの「変位拘束」→「 $x$  方向変位拘束」とたどり、「OK」をクリックして、右ボタンで  $x$  方向変位を拘束したい節点をラバーバンドで囲むと図 10 のような画面になる。これにより、8 個の節点を選ばれ、 $x$  方向の拘束変位量 (ゼロがデフォルト) を 0 のまま「OK」をクリックすればよい。同様に、辺 AB についても  $y$  方向変位拘束量をゼロと指定する。

荷重を指定するには、以下のように考えればよい。図 1(a)の帯板を左右から 9800 N (1000 kgf) で引張る場合を想定する。すると、図 11(a)の左側の垂直な辺 AE には 4900 N の力が作用する。これを垂直辺の面積あたりの力  $p_0$  で考えると

$$p_0 = \frac{P}{A} = \frac{4900}{40 \times 4} = 30.625 \text{ N/mm}^2 \quad (1)$$

が左辺に作用することになる。

また、辺 AE には同じ大きさの 7 個の要素が縦に並んでいるので、一つの要素には、左方に

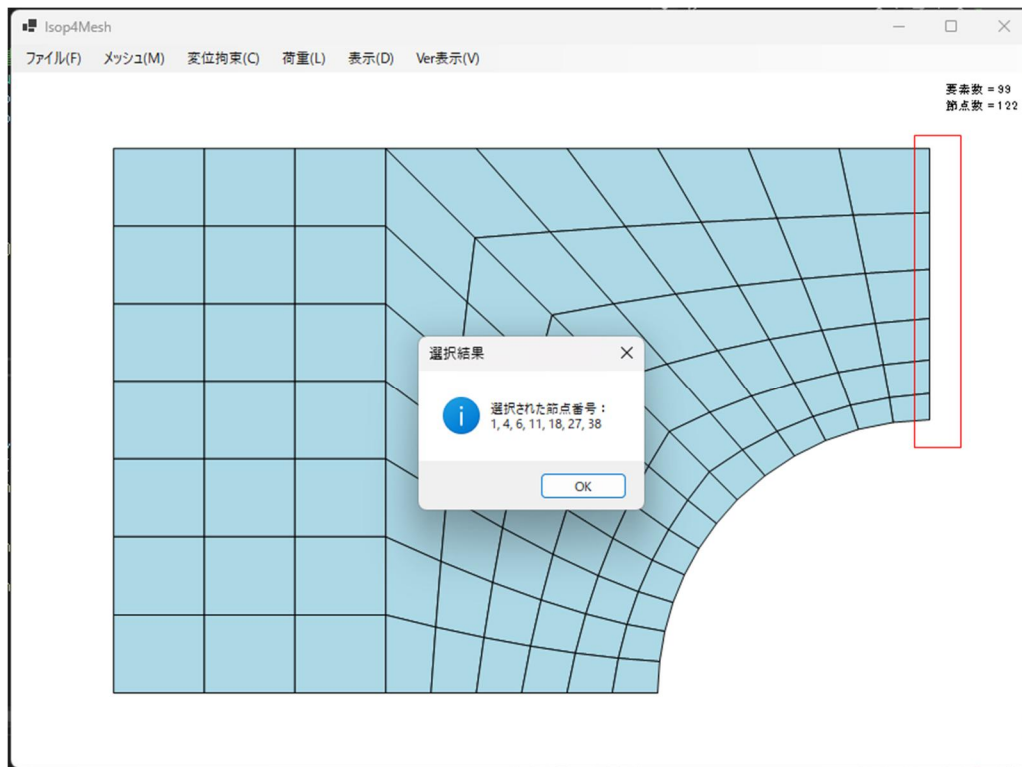


図 10 ラバーバンドによる変位拘束の指定

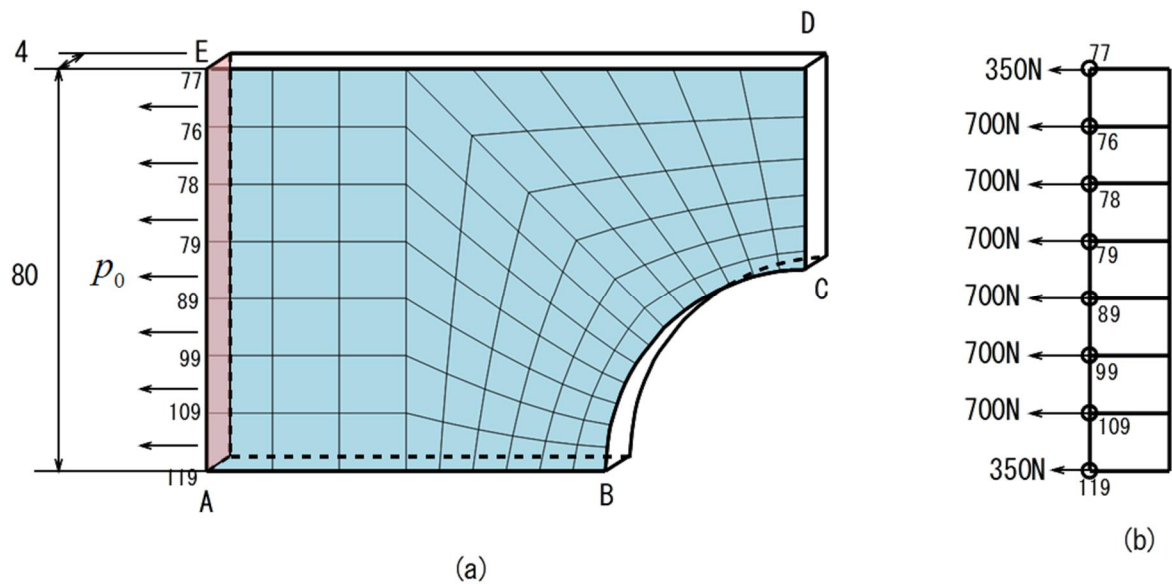


図 11 外力の節点荷重への振り分け

$$F = p_0 \frac{A}{7} = \frac{P}{7} = \frac{4900}{7} = 700 \text{ N} \quad (2)$$

の力が作用する。荷重が作用する要素の荷重面には 2 つの節点が配置されているので、最終的には一つの節点あたりに 350 N の節点力が作用することになる。これらの力をそれぞれの節点に加えると図 11(b)

のような節点力の配分となる。

以上の節点荷重値をもとに、ツールメニューから、「荷重」→「 $x$ 方向荷重」とたどり、図 11(b)の 700 N が作用する節点をラバーバンドで囲んで、 $x$  方向荷重値として「-700」を入力すればよい（負号を忘れないこと）。同様に、350 N の作用する節点を選んで  $x$  方向荷重値として「-350」を入力する（この操作は、節点 77 と節点 119 に対して 2 回繰り返す）

「表示」→「境界条件」とたどれば、図 12 のような拘束記号や荷重ベクトルを確認することができる。

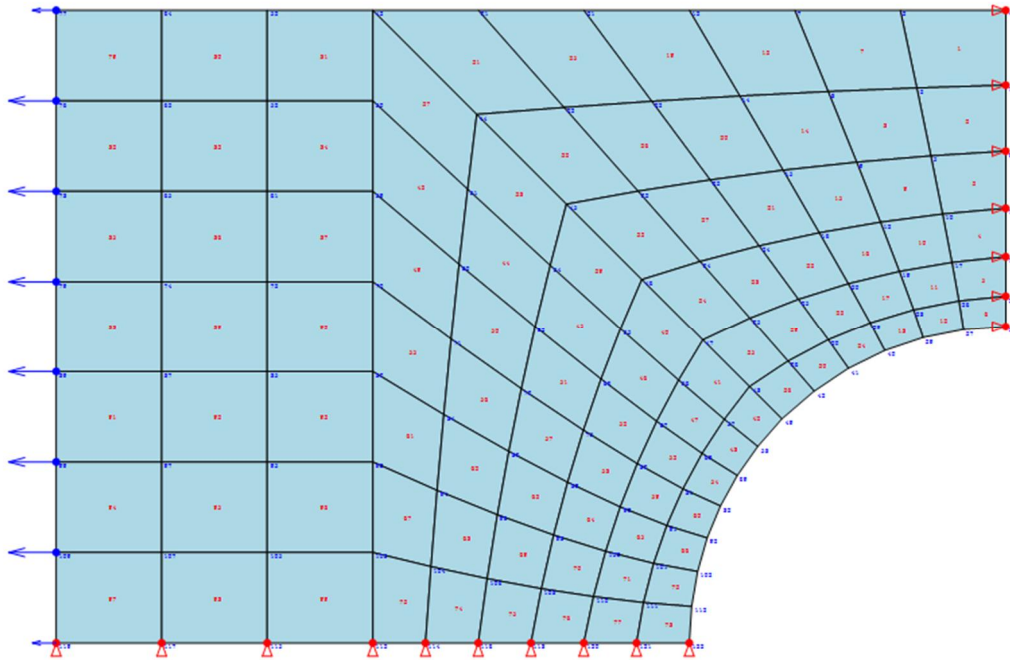


図 12 拘束，荷重条件の表示

もしも、設定をやり直したい場合には、ツールメニューから「変位拘束」→「変位拘束全解除」や「荷重」→「荷重全解除」と選んで、改めて設定し直せばよい。

## 4.2 ファイル出力

以上により、要素分割や拘束節点および荷重節点の指定を終えた。次は、ツールメニューの「ファイル」→「出力」とたどって、要素分割から荷重設定までのこれまでの結果を FEM 解析が必要とする形式でファイルとして出力する。ファイルのダイアログボックスからファイル名（たとえば enkou122.dat）を入力してリターンキーを押すと

基本データ（ただし、総節点数，総要素数，材料数，拘束節点数，荷重節点数）

節点データ（節点番号， $x$ ， $y$ 座標）

材料データ（ヤング率，ポアソン比，板厚（平面応力の場合には実際の厚さ，平面ひずみの場合には

0 が与えられる)

要素データ (要素番号, 左回りに要素を囲む節点番号, 材料番号)

拘束データ (拘束節点番号, x 拘束(0 or 1), x 拘束量, y 拘束(0 or 1), y 拘束量)

荷重データ (荷重節点番号, x 方向荷重, y 方向荷重)

が指定したファイル名で出力される. このファイルは, ただちに, 4 節点アイソパラメトリック要素を用いた平面弾性解析プログラム isop4.exe から読み込むことができ, FEM 解析を実行できる.

以下に, 参考までに enkou122.dat の内容を示す.

```
122 , 1 , 99 , 17 , 8
  1 , 6e+01 , 3.5278e+01
  2 , 5.3333e+01 , 4e+01
  3 , 5.4375e+01 , 3.51e+01
..... (途中省略).....
 118 , 3e+01 , 0e+00
 119 , 0e+00 , 0e+00
 120 , 3.3333e+01 , 0e+00
 121 , 3.6667e+01 , 0e+00
 122 , 4e+01 , 0e+00
1 , 206000 , 0.3 , 4
  1 , 2 , 3 , 1 , 4 , 1
  2 , 3 , 5 , 6 , 1 , 1
  3 , 5 , 10 , 11 , 6 , 1
..... (途中省略).....
94 , 109 , 107 , 97 , 99 , 1
95 , 107 , 105 , 95 , 97 , 1
96 , 105 , 103 , 93 , 95 , 1
97 , 119 , 117 , 107 , 109 , 1
98 , 117 , 115 , 105 , 107 , 1
99 , 115 , 113 , 103 , 105 , 1
1 , 1 , 0 , 0 , 0
4 , 1 , 0 , 0 , 0
6 , 1 , 0 , 0 , 0
11 , 1 , 0 , 0 , 0
18 , 1 , 0 , 0 , 0
27 , 1 , 0 , 0 , 0
38 , 1 , 0 , 0 , 0
113 , 0 , 0 , 1 , 0
```

```

114, 0, 0, 1, 0
115, 0, 0, 1, 0
116, 0, 0, 1, 0
117, 0, 0, 1, 0
118, 0, 0, 1, 0
119, 0, 0, 1, 0
120, 0, 0, 1, 0
121, 0, 0, 1, 0
122, 0, 0, 1, 0
76, -700, 0
78, -700, 0
79, -700, 0
89, -700, 0
99, -700, 0
109, -700, 0
77, -350, 0
119, -350, 0

```

2D FEM analysis by isop4

以下の図 13 は，データ enkou122.dat を isop4.exe が読み込んで，Mises 応力のコンター図の出力を得た例である．円孔周辺の応力集中の様子が正しく表現されていることがわかる．

なお，ここまでの取り上げた例の要素数（99 要素）や節点数（122 節点）は，説明の便宜上，やや少ない分割数であったが，解析精度を高めたい場合にはより細かな要素分割が好ましい．図 14(a)は図 1 (c) を 1000 要素，1071 節点まで細かく分割した場合である．また，この細かな分割に基づいて解析して得た Mises 応力のコンター図を図 14(b)に示す．図 13 よりも滑らかな Mises 応力分布が得られていることがわかる．

図 14 の解析結果から，円孔部の最大応力  $(\sigma_x)_{\max}$  は  $140.7 \text{ N/mm}^2$ （図 14(b)の凡例に示されている Mises 応力の最大値  $139.2 \text{ N/mm}^2$  よりわずかに大きい）と得られる．そこで，左端の辺に作用させた表面力  $p_0=30.625 \text{ N/mm}^2$  と  $(\sigma_x)_{\max}$  との比，すなわち応力集中係数  $K$  を求めると

$$K = \frac{(\sigma_x)_{\max}}{p_0} = \frac{140.7}{30.625} = 4.59 \quad (3)$$

と得られる．一方で，弾性理論から得られる理論値は  $K = 4.60$  であることがわかっているから，式 (3) は理論値と非常によく一致していることがわかる．

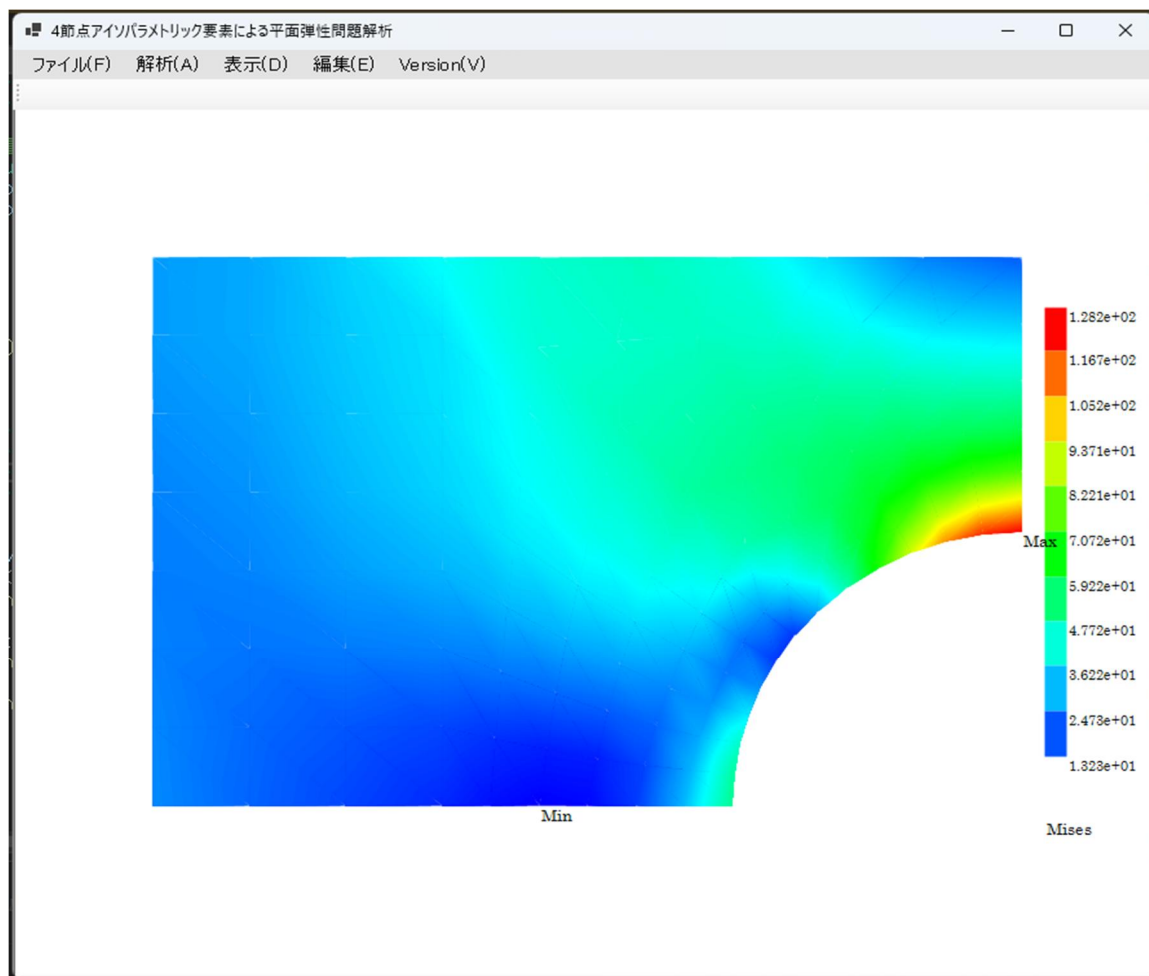
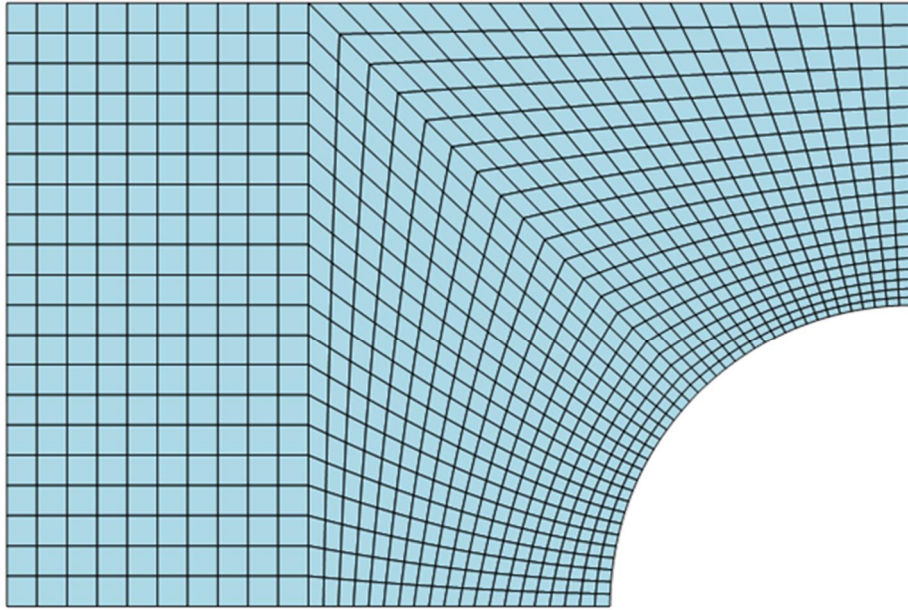
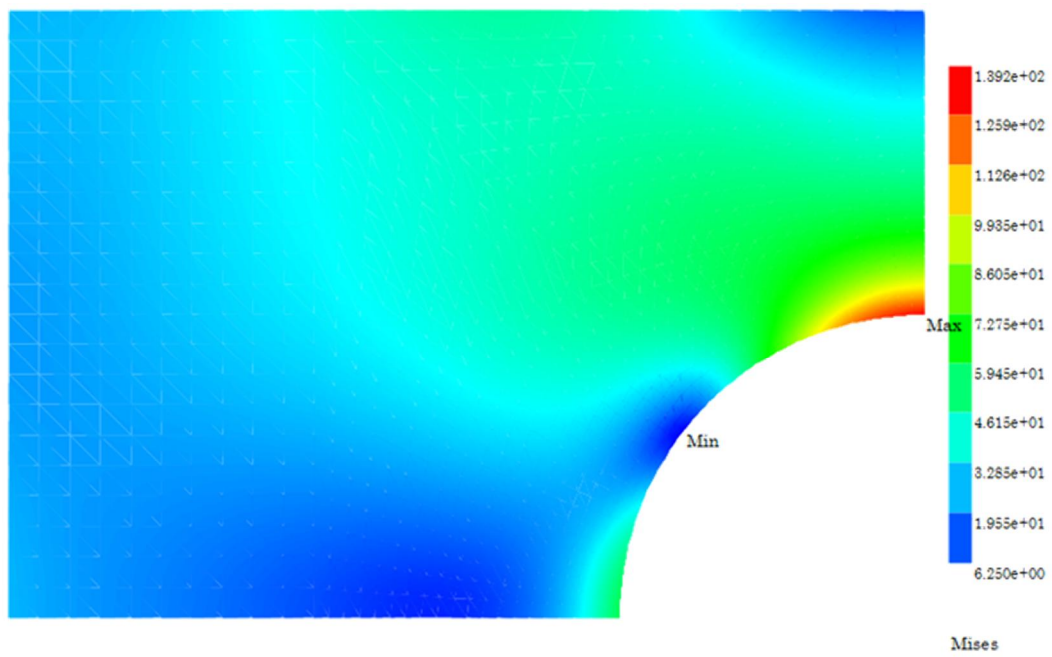


図 13 出力データ enkou122 を読み込んで FEM 解析した例





(a) (1000要素, 1071節点)



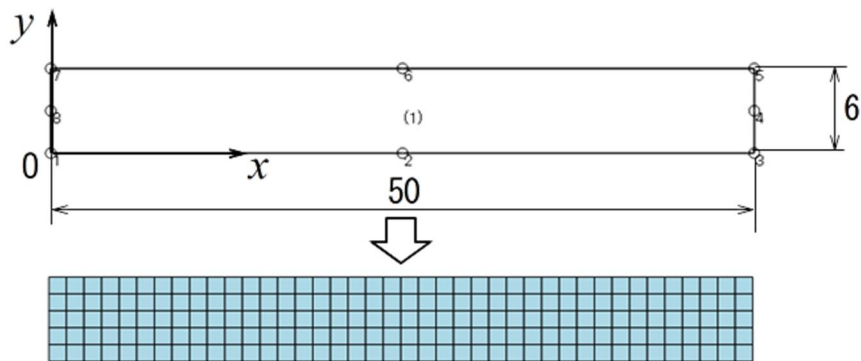
(b) (Mises応力コンター図)

図 14 より細かい要素分割と FEM 解析結果

6. その他の要素分割とそのデータ例

【例 1】 長方形領域

50mm×6mm の長方形領域を分割



○要素分割データ

(ファイル名 : beam0.grd)

Beam subjected to shear force

1, 8, 1

1, 0.0, 0.0

2, 25.0, 0.0

3, 50.0, 0.0

4, 50.0, 3.0

5, 50.0, 6.0

6, 25.0, 6.0

7, 0.0, 6.0

8, 0.0, 3.0

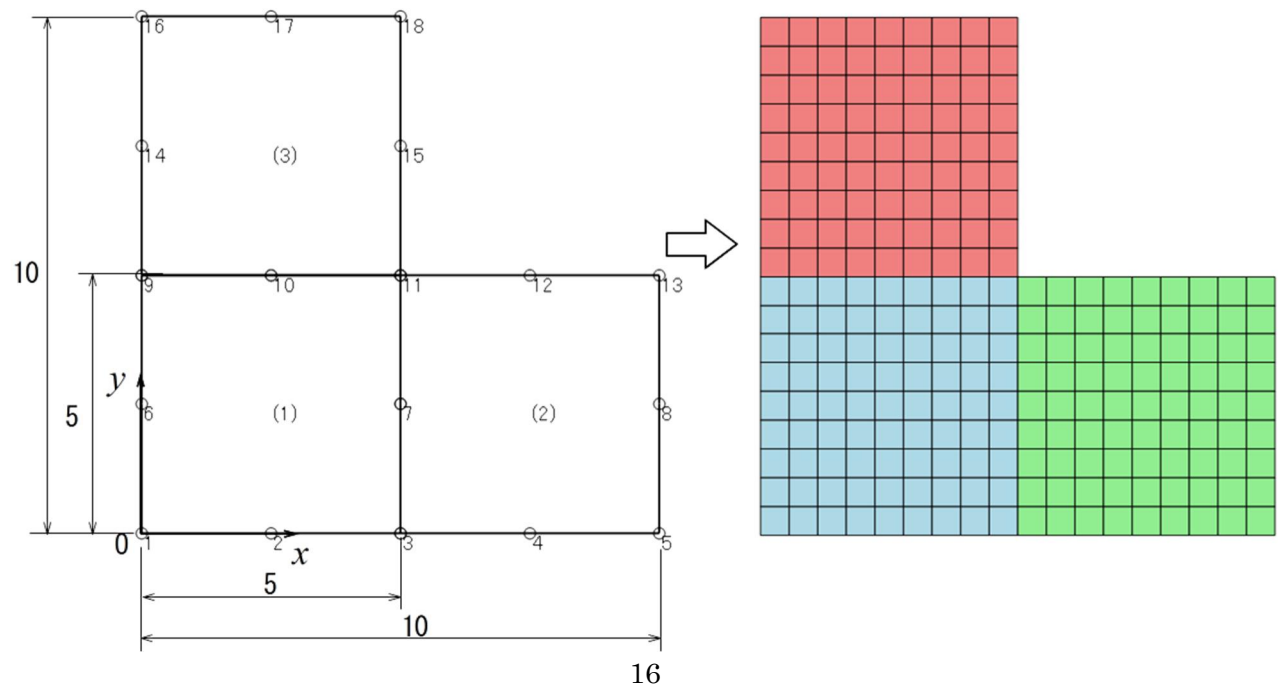
1, 0, 0, 0, 0

1, 1, 6, 41, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

1, 206e3, 0.3, 1.0

【例 2】 3 個の材料からなる L 字型領域

領域 (1), (2), (3) が異なる材料の場合



○要素分割データ

(ファイル名 : L-shape.grd)

L shaped region (with fillet)

3, 18, 3

1, 0.0, 0.0

2, 2.5, 0.0

3, 5.0, 0.0

4, 7.5, 0.0

5, 10.0, 0.0

6, 0.0, 2.5

7, 5.0, 2.5

8, 10.0, 2.5

9, 0.0, 5.0

10, 2.5, 5.0

11, 5.0, 5.0

12, 7.5, 5.0

13, 10.0, 5.0

14, 0.0, 7.5

15, 5.0, 7.5

16, 0.0, 10.0

17, 2.5, 10.0

18, 5.0, 10.0

1, 0, 2, 3, 0

2, 0, 0, 0, 1

3, 1, 0, 0, 0

1, 1, 10, 10, 1, 2, 3, 7, 11, 10, 9, 6

2, 2, 10, 10, 3, 4, 5, 8, 13, 12, 11, 7

3, 3, 10, 10, 9, 10, 11, 15, 18, 17, 16, 14

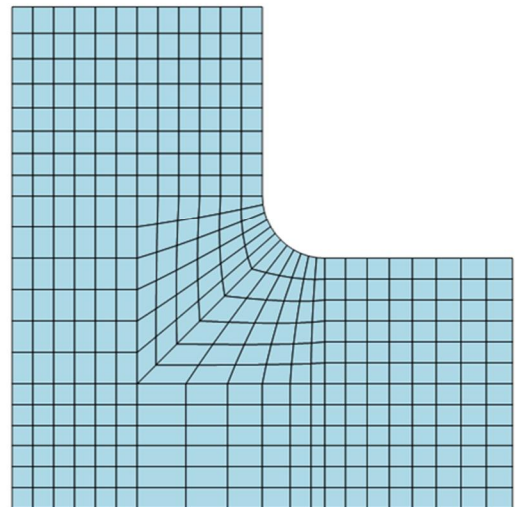
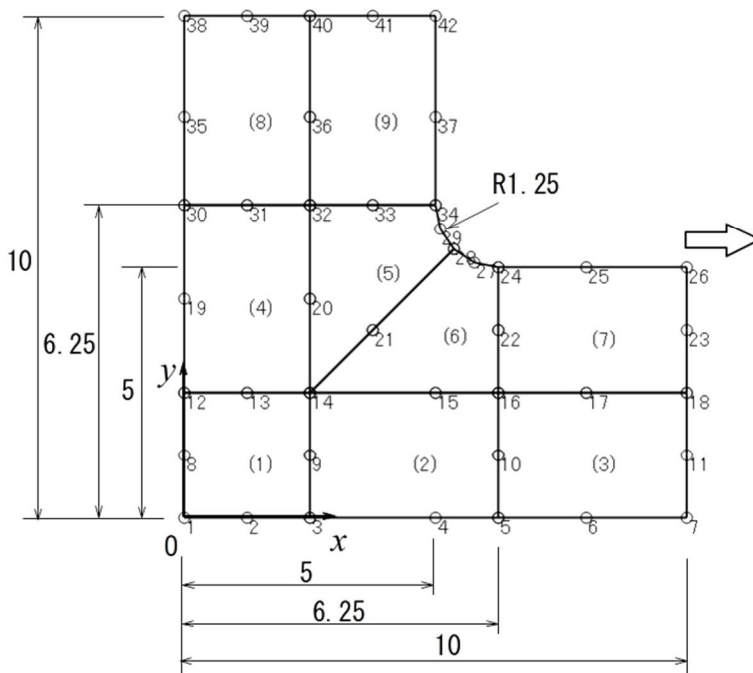
1, 206e3, 0.3, 1.0

2, 206e2, 0.3, 1.0

3, 206e1, 0.3, 1.0

### 【例 3】角に丸みを有する L 字型領域

L 字型領域の角部に半径 1.5mm の丸みをつけて分割



○要素分割データ

(ファイル名 : Rounded-L-shape.grd)

Rounded L-shaped Region

9, 42, 1

1, 0.0, 0.0

2, 1.25, 0.0

3, 2.5, 0.0

4, 5.0, 0.0

5, 6.25, 0.0

6, 7.5, 0.0

7, 10.0, 0.0

8, 0.0, 1.25

9, 2.5, 1.25

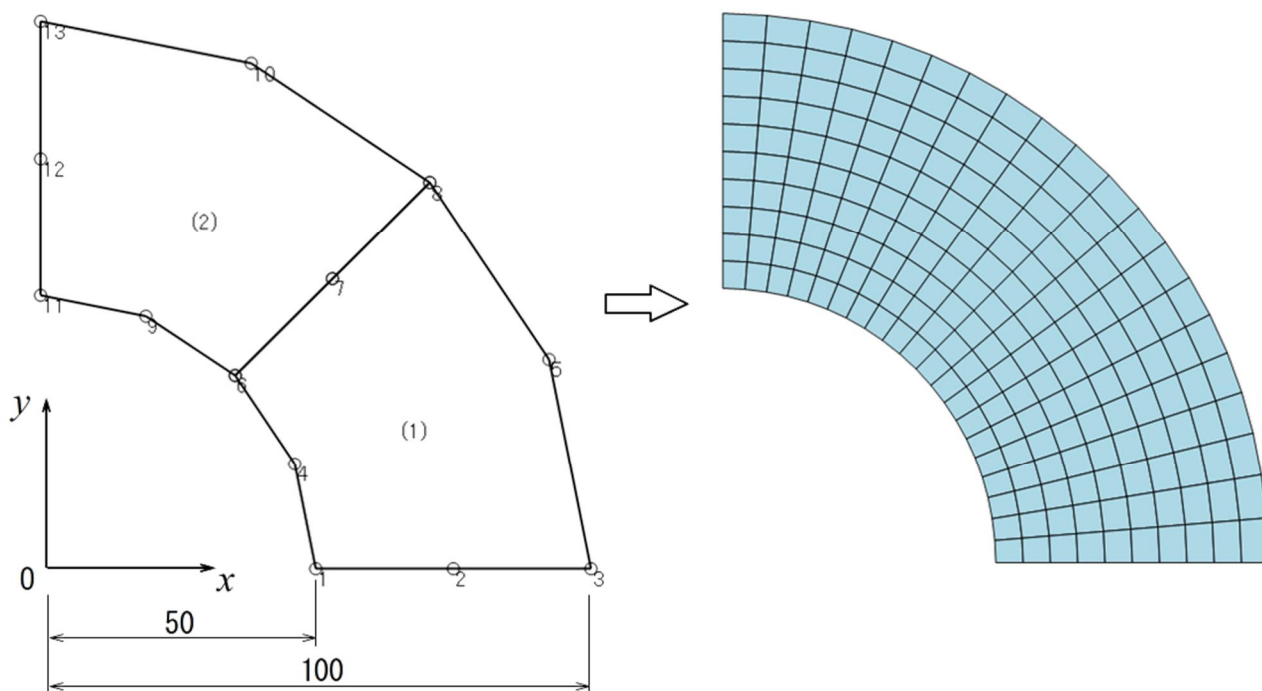
10, 6.25, 1.25

11, 10.0, 1.25  
 12, 0.0, 2.5  
 13, 1.25, 2.5  
 14, 2.5, 2.5  
 15, 5.0, 2.5  
 16, 6.25, 2.5  
 17, 7.5, 2.5  
 18, 10.0, 2.5  
 19, 0.0, 4.375  
 20, 2.5, 4.375  
 21, 3.75, 3.75  
 22, 6.25, 3.75  
 23, 10.0, 3.75  
 24, 6.25, 5.0  
 25, 7.5, 5.0  
 26, 10.0, 5.0  
 27, 5.772, 5.095  
 28, 5.366, 5.366  
 29, 5.095, 5.772  
 30, 0.0, 6.25  
 31, 1.25, 6.25  
 32, 2.5, 6.25  
 33, 3.75, 6.25  
 34, 5.0, 6.25  
 35, 0.0, 7.5  
 36, 2.5, 7.5

37, 5.0, 7.5  
 38, 0.0, 10.0  
 39, 1.25, 10.0  
 40, 2.5, 10.0  
 41, 3.75, 10.0  
 42, 5, 10.0  
 1, 0, 2, 4, 0  
 2, 0, 3, 6, 1  
 3, 0, 0, 7, 2  
 4, 1, 5, 8, 0  
 5, 6, 0, 9, 4  
 6, 2, 7, 0, 5  
 7, 3, 0, 0, 6  
 8, 4, 9, 0, 0  
 9, 5, 0, 0, 8  
 1, 1, 6, 6, 1, 2, 3, 9, 14, 13, 12, 8  
 2, 1, 6, 6, 3, 4, 5, 10, 16, 15, 14, 9  
 3, 1, 6, 6, 5, 6, 7, 11, 18, 17, 16, 10  
 4, 1, 6, 6, 12, 13, 14, 20, 32, 31, 30, 19  
 5, 1, 6, 6, 14, 21, 28, 29, 34, 33, 32, 20  
 6, 1, 6, 6, 14, 15, 16, 22, 24, 27, 28, 21  
 7, 1, 6, 6, 16, 17, 18, 23, 26, 25, 24, 22  
 8, 1, 6, 9, 30, 31, 32, 36, 40, 39, 38, 35  
 9, 1, 6, 9, 32, 33, 34, 37, 42, 41, 40, 36  
 1, 206e8, 0.3, 1.0

#### 【例 4】1/4 円筒領域

内径 50mm, 外径 100mm の円筒の 1/4 部分を分割



## ○要素分割データ

(ファイル名 : hollowedcylinder.grd)

Hollowed cylinder (Shimaribame mondai)	9, 19.13, 46.19
2, 13, 1	10, 38.27, 92.39
1, 50.0, 0.0	11, 0.0, 50.0
2, 75.0, 0.0	12, 0.0, 75.0
3, 100.0, 0.0	13, 0.0, 100.0
4, 46.19, 19.13	1, 0, 0, 2, 0
5, 92.39, 38.27	2, 0, 1, 0, 0
6, 35.36, 35.36	1, 1, 11, 11, 1, 2, 3, 5, 8, 7, 6, 4
7, 53.03, 53.03	2, 1, 11, 11, 11, 9, 6, 7, 8, 10, 13, 12
8, 70.71, 70.71	1, 206e3, 0.3, 1.0

## 7. 利用上の注意, 著作権ほか

かつて有限要素法 (FEM) は, ごく一部のエンジニアが利用する特殊なソフトウェアであった. しかし現在では, ほとんどのエンジニアに広く認知されるソフトウェアとなっている. テレビの画面がどのような仕組みで液晶に映し出されているのかを深く考える者が少ないのと同様に, 有限要素法もブラックボックス化が進み, その動作原理にまで思いを巡らす者は少なくなっているように思われる.

しかしながら, 有限要素法がどのようなプロセスを経て動作しているのかを理解しておけば, それを的確に, かつ正しく使いこなすことが可能となる.

近年の汎用 FEM ソフトは非常に高機能であるが, 利用者にとって必要なのはその一部に限られる場合が多い. たとえて言えば, 近所のコンビニエンスストアへ買い物に行くのに大型バスを使うようなものである. 近所への買い物であれば, 自転車で十分であろう.

このような問題意識のもと, 小回りが利き, 構造が見通しやすい FEM ソフトが必要であると考え, 本ソフトや FEM プログラムの開発に至っている.

本プログラムは, 基本的にメッシュ作成に関する教育用として開発されたものであり, 一般的な実務への利用を意図していない. このため, 演習以外の目的で使用された場合の結果については, 一切の保証を行わない.

なお, 本プログラムは自由に利用可能であるが, 著作権は著者に帰属しており, 無断での複製や第三者への配布はご遠慮いただきたい.

また, 本プログラムには未だバグや操作上の不具合が潜在している可能性がある. 万一不具合を発見された場合には, 以下の連絡先までご一報いただけると幸いである.

(連絡先 : tadashihoribe@gmail.com).

## 参考文献

- (1) L. J. Segerlind 著, 川井監訳, 「応用有限要素解析」, 丸善 (1982).
- (2) R. J. Collins, Bandwidth Reduction by Automatic Renumbering, Int. J. for Num. Methods in Engng., Vol.6, 345-356(1973).
- (3) 戸川, 有限要素法概論, 培風館 (1980).
- (4) 堀辺, Visual Basic でわかるやさしい有限要素法, 森北出版 (2008).
- (5) 堀辺, 例題で学ぶ材料力学, 森北出版 (2022).
- (6) 中原ほか 5 名, 弾性学ハンドブック, 朝倉書店 (2002).