

平面ラーメン FEM 解析プログラム rm2dg1 の利用法

作成者：堀辺忠志 (2008.12.30)

図 1 のような，門型ラーメン（テキスト p.111）の例を取り上げて，本プログラム rm2dg1 の使い方を説明する．このラーメンの材料定数は，縦弾性係数 $E = 2.06e5[\text{N}/\text{mm}^2]$ ，断面積 $A = 400[\text{mm}^2]$ ，断面二次モーメント $I = 1.3333e4[\text{mm}^2]$ である．また，水平部材の節点 3 に負荷した垂直荷重の大きさは， $980[\text{N}]$ とする．より詳しく内容を知りたい場合にはテキスト（「Visual Basic でわかるやさしい有限要素法の基礎」，森北出版）を参照してほしい．

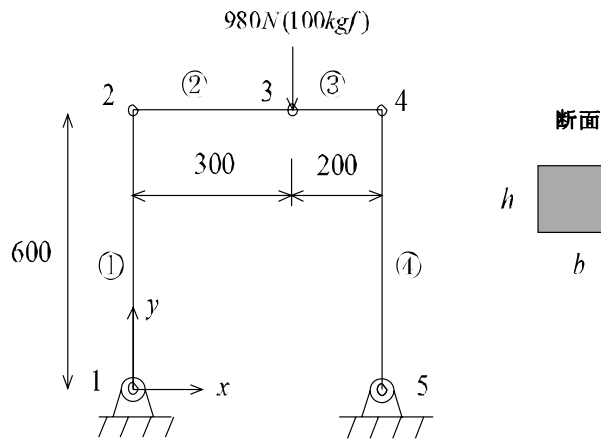


図 1: 門型ラーメン

本プログラムの簡単なフローチャートを図 2 に示す．この図からもわかるように，GUI 入力を主体にしているために，本プログラムで FEM 解析結果を評価した後にそれを受けて入力データを修正し，再び FEM 解析を行うといったことが可能である．この繰り返しを適切に使えば，最適設計のような計算も可能であろう．

1 解析モデル作成

本プログラムは，解析モデルの作成のために

- (1) マウスを用いてインタラクティブに作成する方法
- (2) データグリッドセル（表計算ソフト，エクセルのセルと同じようなもの）を用いて作成する方法
- (3) 秀丸やワードパッドなどのエディタを用いる方法

の 3 つの方法を用意している．

(1) の GUI の方法は画面上でマウス操作を中心にして行うので，最も簡単にモデル作成を行うことができる．

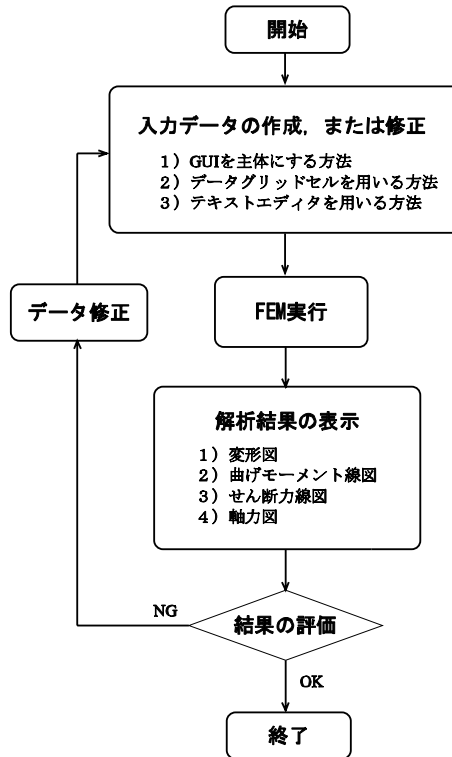


図 2: 本プログラムのフローチャート

(2) のデータグリッドセルを用いる方法は、キーボードを主体にデータの修正、追加を行う方法である。また、データグリッドセルからモデルデータを新規に作成することも可能である。

(3) のエディタを用いる方法は、解析モデルデータそのものをエディタを用いて作成する方法である。この方法は、旧来のデータ入力方法もサポートするように配慮したものであり、パソコンに慣れたユーザ向けと考えられる。

特別な理由がなければ、(1) の方法に従うことをお勧めする。

1.1 GUIによるモデル作成

GUIによるモデルの作成方法は、

- 1) 使用する材料のデータの入力し、
- 2) キーポイントを利用して画面上で要素の作成を行い、
- 3) 荷重や拘束などの境界条件の設定を行う

という手順で行われる。この手順は、汎用 FEM ソフトで行われている方法とほとんど同じ操作性を有しており、本ソフト開発で最も工夫を凝らした点（あるいは最も苦労した点）である。

以下にモデル作成の手順を示す。

1.1.1 材料データ作成

はじめに、メニューバーの「モデル作成」をクリックし、「材料データ」を選択する。そうすると、図 3 の左のような材料データ入力のウィンドウが現れるので、縦弾性係数 $E = 2.06e5[\text{N/mm}^2]$ 、

断面積 $A = 400[\text{mm}^2]$ ，断面二次モーメント $I = 1.3333e4[\text{mm}^2]$ を入力し，OK をクリックする．
 なお，長さや力の単位と縦弾性係数の単位との間に矛盾がなければ，SI 単位や工学単位のどちらを用いてもよい．

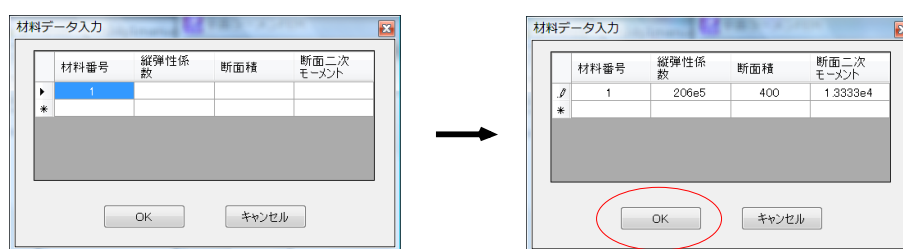


図 3: 材料データ入力

1.1.2 キーポイント作成

キーポイントとは，要素や節点を作成するために便宜的に設けた点であり，FEM で用いる節点とは異なる点であることをあらかじめ注意しておく．

はじめに，メニューバーの「モデル作成」をクリックし，「キーポイント作成」を選択する．すると，図 4 のようなキーポイント入力のウィンドウが現れるので，そこに，以下のようなキーポイント番号，キーポイントの x -座標， y -座標を入力する．入力を終えたら，[Draw] をクリッ

表 1: キーポイントデータ

キーポイント番号	x [mm]	y [mm]
1	0	0
2	0	600
3	300	600
4	500	600
5	500	0

クする．そうすると，図 5 のようにキーポイントが描画されるので [終了] をクリックする（本例の場合には，キーポイントと節点とが重なっているため，同じ点のように見える．）

1.1.3 要素作成

以上に設定したキーポイントを用いて要素を作成する手順を以下に示す．

まず，メニューバーの「モデル作成」をクリックし，「要素作成」を選択する．そうすると，メッセージボックスに [要素作成のためのキーポイント (2 点) をクリックしてください] と表示される．続いて，OK をクリックし，始点のキーポイント 1，終点のキーポイント 2 を順々に

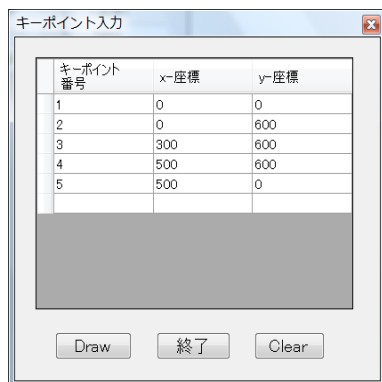


図 4: キーポイント入力

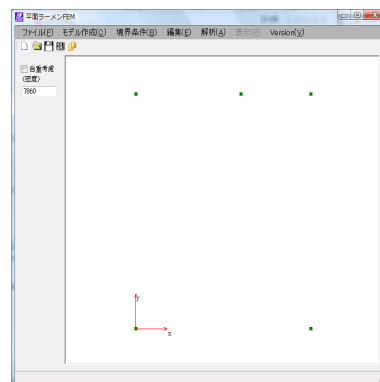


図 5: キーポイント描画

クリックする．終点のキーポイントを指示した後に，図 6 のように要素分割数というウィンドウが表示されるので，分割数 1 および材料番号 1 を入力または選択する．

ここで，もしも分割数を 2 と入力すると，キーポイント 1，2 を両端点とする線分を 2 分割することになり，2 つの要素が生成される．このことより，分割数が 1 の場合には，キーポイントと節点とが重なることが容易に理解されるだろう．さらに，2 以上の分割数を入力することで，多くの要素から成るラーメン構造を簡単に作成できることもわかるだろう．

以上の作業を 4 回繰り返せば，本例題の要素が作成される．図 7 は，4 要素から成る門型ラーメンの完成図である．

なお，キーポイント上をクリックしていない場合には，[画面のキーポイントを指示してください] と表示されるので，OK をクリックして，正しいキーポイントを選び直す必要がある．



図 6: 要素分割のウィンドウ

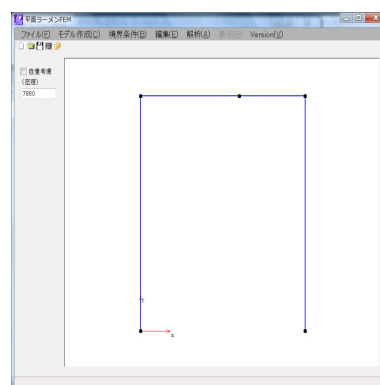


図 7: GUI により生成された 4 要素門型ラーメン

1.1.4 境界条件の処理

以下に，本例題の拘束条件（節点 1，5 が x, y 変位拘束）および荷重条件（節点 3 に $-y$ 方向に $980[N]$ の荷重）の処理の手順を述べる．

1) 拘束条件の処理

はじめに、メニューバーの「境界条件」をクリックし、「拘束」 -> 「設定」を選択する。すると、図8のような拘束設定のウィンドウが現れるので、その中から拘束の種類を選択する。

このとき、その拘束の種類の右側のテキストボックスには x, y の変位の拘束量を入力することができる。これは、節点に強制変位を与えることも可能なようにしたものである。デフォルトではともに0.0であり、これは節点変位をゼロにセットすることを意味している。半剛性拘束を選んだ場合は、バネ剛性のパラメータ λ_θ (テキスト p.99, 式(5.45) 参照)を用い、剛性に応じて0~1の間の数値を入力すればよい。 $\lambda_\theta = 0$ の場合はピン支持の働きをし、 $\lambda_\theta = 1$ の場合は剛接の役割をする。

本例題の場合には、 x, y 拘束 (拘束量 0.0) であるので、このラジオボタンを選んで OK をクリックする。

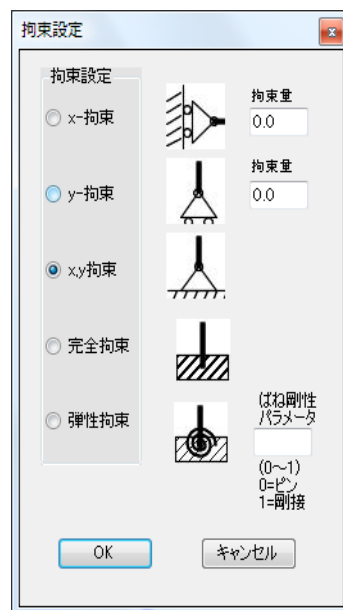


図 8: 拘束設定

すると、図9左上のように「拘束節点をクリックして下さい」というウィンドウが現れるので、「OK」をクリックする。その後、マウスカーソルを節点1付近に移動すると、スナップサークル(赤い丸)が表示されるので、節点1をクリックすればよい。

その後、図9左下のように、「[節点番号1を拘束節点としました]」と表示されるので、OKをクリックすれば、節点1の拘束が完了する。

続いて、もう一つの拘束節点5をマウスでクリックすると、節点番号5が x, y 拘束されるとともに、拘束表示記号が表示される。

もしも、異なる拘束条件を入力したい場合には、メニューバーの

「境界条件」 -> 「拘束」 -> 「設定」とたどればよい。

なお、拘束設定を解除したい場合には、

「境界条件」 -> 「拘束」 -> 「解除」として、節点をクリックすればよい。

2) 荷重条件の処理

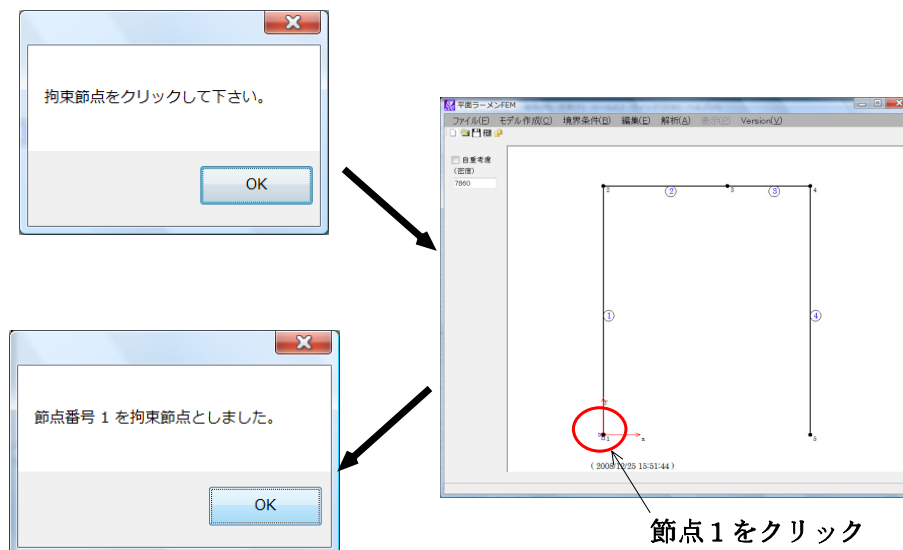


図 9: 節点 1 の変位拘束画面

次は、節点 3 の荷重設定である。はじめに、メニューバーの「境界条件」をクリックし、「荷重」を選択する。すると、図 10 の左側のようなウィンドウが表示される。荷重としては、 x 、 y 方向荷重およびモーメントが入力可能である。本例題の場合には、 F_y にチェックマークをつけて、その大きさとして $-980[\text{N}]$ を入力し、図 10 右側のように OK をクリックする。続いて、節点 3 付近にマウスを移動すると、スナップサークルが表示されるので、その節点 3 をクリックすれば荷重設定が完了する。

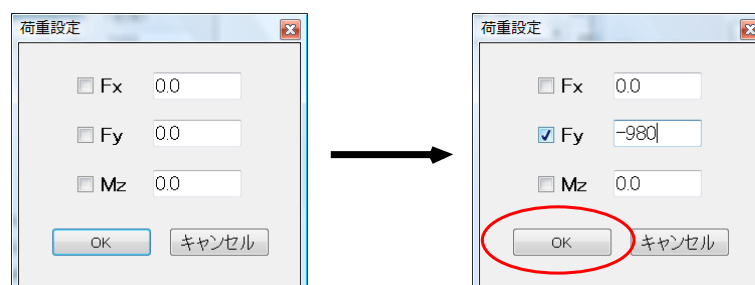


図 10: 荷重設定

もしも、荷重設定を解除したい場合には、
「境界条件」 -> 「荷重」 -> 「解除」として、節点をクリックすればよい。
以上の手順によってモデル作成が完了するので、次は 2 章の編集へ進めばよい。

1.2 データグリッドセルによるモデル作成

以上は、GUI を用いたモデル作成であった。本プログラムは、これ以外にデータグリッドセルを用いてモデルを作成する方法もサポートしており、上に述べた GUI による方法によって得られたデータを書き換える場合などにも有用な方法である。



図 11: 節点データ入力・編集のウィンドウ

このデータグリッドセルを用いる場合は、
「節点データ入力 → 材料・要素データ入力 → 境界条件入力」
と進めればよい。

1.2.1 節点データ入力

節点データ作成のためには、メニューバーの「編集」をクリックし、節点を選択する。そうすると、図 11 のようなウィンドウが現れるので、そこに、表 2 のような、節点の x 座標、 y 座標を入力していく（図 11 は、すでにデータ入力済みの様子を示している）

表 2: 節点データ

節点番号	x [mm]	y [mm]
1	0	0
2	0	600
3	300	600
4	500	600
5	500	0

なお、表 2 は、表 1 と同じ内容であるが、前にも述べたとおり、これはキーポイントと節点とがたまたま同じ値をとっているに過ぎないためである。なお、節点数が多い場合には、入力途中で [更新] ボタンをクリックし、描画されている節点の配置を確認するとよい。

材料・要素データ

材料データ

材料番号	縦弾性係数	断面積	断面二次モーメント
1	2.06e5	400	1.3333e4

要素データ

要素番号	節点番号1	節点番号2	材料番号
1	1	2	1
2	2	3	1
3	3	4	1
4	4	5	1

更新 キャンセル

図 12: 材料・要素データ編集のウィンドウ

1.2.2 材料・要素データの入力

次に、メニューバーの「編集」をクリックし、材料・要素を選択する。すると図 12 のようなウィンドウが現れる (注：データが入力済み)。そこに、材料番号として 1 を与え、続いて、縦弾性係数 $E = 2.06e5[\text{N}/\text{mm}^2]$ 、断面積 $A = 400[\text{mm}^2]$ 、断面二次モーメント $I = 1.3333e4[\text{mm}^2]$ を入力する。

要素データに関しては、要素番号 1 から 4 までの要素について、表 3 に示すような、要素両端節点番号と材料番号を入力すればよい。図 12 は、これらのデータを入力した様子を示す図で

表 3: 要素データ

要素番号	節点 1	節点 2	材料番号
1	1	2	1
2	2	3	1
3	3	4	1
4	4	5	1

ある。

1.2.3 拘束・荷重条件の入力

メニューバーの「編集」をクリックし、「拘束・荷重」を選択する。すると、図 13 のようなウィンドウが現れるので、そこで拘束をする節点の番号を 1, 5 を入力し、表 4 にしたがって、 x 拘束の有無 (0 or 1)、 x 拘束量、 y 拘束の有無 (0 or 1)、 y 拘束量、 θ 拘束の有無 (0 or 1)、 θ 拘束量を入力する。

表 4: 拘束データ

拘束節点番号	x 拘束 (0,1)	x 拘束量	y 拘束 (0,1)	y 拘束量	θ 拘束 (0,1)	θ 拘束量
1	1	0.0	1	0.0	0	0.0
5	1	0.0	1	0.0	0	0.0

表 5: 荷重データ

荷重節点番号	F_x	F_y	M_z
3	0.0	-980.0	0.0

また、荷重についても同様に、表 5 にしたがって、荷重節点番号 3 を入力し、次いで F_x 、 F_y および M_z の値を入力する。

以上で、データグリッドセルを用いたモデル作成が終了する。この後は、2 章へ進めばよい。

1.3 エディタによる解析のモデル作成

1.3.1 データの書式

3 番目のモデル作成方法として、エディタを用いてデータを直接作る方法がある。その手順を以下に示す。

まず、notepad や秀丸エディタなどのテキスト編集用のエディタを起動して、以下の枠で示した形式のデータファイルを作成する。なお、ファイル名は「rm2d3.dat」とする。

拘束・荷重データ

拘束データ

節点番号	x-拘束 (0,1)	x-拘束 量	y-拘束 (0,1)	y-拘束 量	θ-拘束 (0,1)	θ-拘束 量 (半剛性⇒ 剛接=1 ~ ピン=0)
▶ 1	1	0	1	0	0	0
5	1	0	1	0	0	0
*						

荷重データ

節点番号	Fx	Fy	Mz
▶ 3	0	-980	0
*			

更新 キャンセル

図 13: 拘束・荷重条件入力ウィンドウ

- (1) 基本データ (1 行)
総節点数 (np), 総要素数 (ne), 材料数 (nm), 拘束節点数 (nb), 荷重節点数 (nf)
- (2) 節点データ (np 行)
節点番号, x 座標, y 座標
- (3) 要素データ (ne 行)
要素番号, 要素端点の節点番号, もう一方の端点の節点番号, 材料番号
- (4) 材料データ (nm 行)
材料番号, 縦弾性係数, 断面積, 断面 2 次モーメント
- (5) 節点拘束データ (nb 行)
拘束節点番号, x 方向の拘束の有無 (0 拘束無し, 1 拘束あり),
 x 方向の拘束量 (拘束がない場合は 0.0 を与える),
 y 方向の拘束の有無 (0 拘束無し, 1 拘束あり),
 y 方向の拘束量 (拘束がない場合は 0.0 を与える),
たわみ角の拘束の有無 (0 拘束無し, 1 拘束あり),
接合強さ (半剛接の強さ λ_θ を与える, 0~1 を与える) ($\lambda_\theta=0$ のときピン支持, 1 の場合は剛接, その間の値の場合は半剛接)
- (6) 荷重データ (nf 行) (nf=0 のときには不要)
荷重をかけた節点番号, x 方向の荷重の大きさ, y 方向の荷重の大きさ, 曲げモーメントの大きさ
- (7) 名前など, 問題への注釈 (1 行)
08T1234A TADASHI HORIBE

【半剛接のデータ入力の際の注意】

1. 半剛接拘束の場合は，拘束データとして x, y 方向拘束フラグおよびたわみ角拘束のフラグをすべて 1 にし，また， x, y 方向拘束量をゼロとして入力すること．

例えば，節点番号 8 が，接合強さ 0.6 の半剛接拘束点である場合は

8, 1, 0.0, 1, 0.0, 1, 0.6

と入力する．また， $\lambda_\theta=0$ の場合は，拘束データとして，

8, 1, 0.0, 1, 0.0, 1, 0.0

と入力した場合と

8, 1, 0.0, 1, 0.0, 0, 0.0

と入力した場合とは同じ意味になる．

2) 半剛接データとして入力するのは， λ_θ のみであるが，拘束端の実際のばね定数 k_θ は，拘束されているはり要素の縦弾性係数 E ，断面 2 次モーメント I ，要素長さ l を用いて $k_\theta = \frac{\lambda_\theta}{1 - \lambda_\theta} \frac{6EI}{l}$ で表される．

なお，データのセパレータをコンマ(,)で指定している．このため，入力データの区切りはコンマ(,)で行えばよい．また，ファイル名の拡張子は必ず「ファイル名.da?」にすること．

以上より，本例題の門型ラーメンのデータとして用意するデータは

5, 4, 1, 2, 1

基本データ

1, 0.0, 0.0

節点データ

2, 0.0, 600.0

3, 300.0, 600.0

4, 500.0, 600.0

5, 500.0, 0.0

1, 1, 2

要素データ

2, 2, 3

3, 3, 4

4, 4, 5

1, 206.0e3, 400.0, 13333.3

材料データ

1, 1, 0.0, 1, 0.0, 1, 0.0

拘束データ

5, 1, 0.0, 1, 0.0, 1, 0.0

3, 0.0, -980.0, 0.0

荷重データ

08T1234A TADASHI HORIBE

となる．

以上のデータは，テキスト 5 章で紹介した平面ラーメン解析プログラム rm2d.exe の入力データとは構造が異なっている．このため，本プログラム rg2dg1.exe と rm2d.exe の入力データは「互換性がない」ので注意して欲しい．

1.3.2 作成したデータの読み込み

エディタでモデルデータを作成した場合には、このファイルを読み込んで解析を行う必要がある。それには、メニューバーの「ファイルメニュー」をクリックし、「読み込み」を選択する。すると、図 14 のように [ファイルダイアログボックス] が表示されるので、ここで作成したデータ rm2d3.dat を選択してデータを読み込む。そうすると、図 15 のように、モデルの形状や拘束条件、荷重条件がピクチャボックス内に描画される。

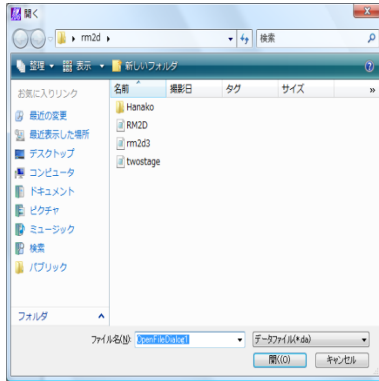


図 14: ファイルダイアログボックス

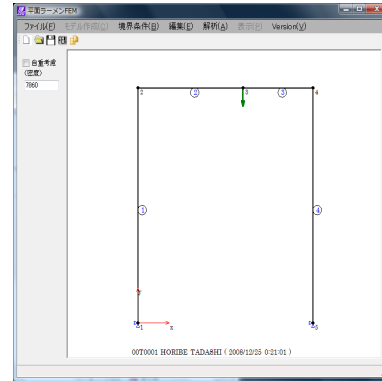


図 15: 描画されたモデル

このように読み込んだデータを編集する必要がある場合には、手順 2 へ進み、直ちに解析を行いたい場合には手順 3 へ進めばよい。

2 データの編集

モデルの作成方法がエディタによる作成、GUI による作成のいずれの場合であっても、モデルデータを変更したりあるいは追加、削除したりすることが可能である。

このためには、メニューバーの「編集」をクリックし「節点」、「材料・要素」、「拘束・荷重」から編集をしたいデータを選択すればよい。そうすると、図 16 のようにデータグリッドセルが表示される（例として、材料・要素データを示す。）削除を行いたい場合にはセルの左側の列の ▶ をクリックしてその行を選択し、Delete キーを押せばよい。また、データグリッドセルの数値を変更したい場合にはセルの値を書き換えればよい。さらに、データを追加したい場合には、グリッドセルの最下行へ移って、データを挿入すればよい。

編集が終わってデータの変更を反映させるためには、更新ボタンをクリックすればよく、その後にデータ変更後のモデルがピクチャボックスに描画される。

3 実行

モデル作成が終われば、いよいよ FEM 解析である。

ラーメンの各要素の自重を考慮する場合には、ウィンドウ左側の「自重考慮（密度）」にチェックマークを入れ、その大きさをテキストボックスに入力する（デフォルトでは軟鋼の密度であ



図 16: 材料・要素データの編集

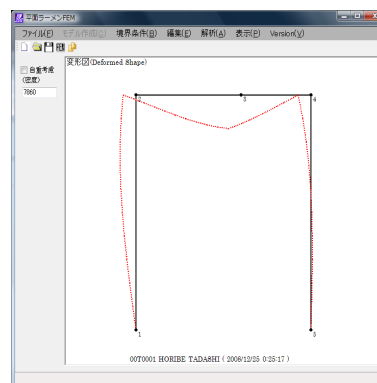


図 17: 変形図

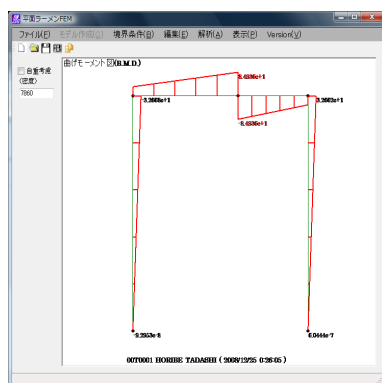


図 18: BMD

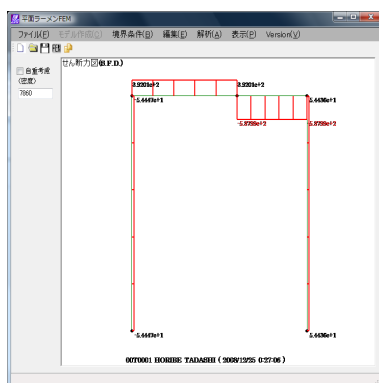


図 19: SFD

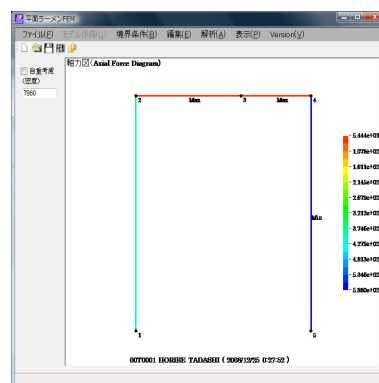


図 20: 軸力図

る 7860kg/m^3 が入力されている), こうすることにより, 自重を考慮した FEM 解析を行うことも可能である.

メニューバーの「解析」をクリックし, 「FEM 解析」をクリックする. そうすると, ワードパッドもしくはエディタに「kekka」というタイトルで解析結果が別画面に表示され, 図 17 のような変形図が描画される. なお, 最近のパソコンは計算速度が早いために, 数百節点のような規模の大きい問題であっても, ほとんど時間をおかずに解析が終了する.

FEM 解析後は, メニューバーの「表示」が有効になり「変形図」(図 17)の他に, 「曲げモーメント図」(図 18), 「せん断力図」(図 19), 「軸力図」(図 20)が表示可能になる. また, 「コピー」を選択すれば, 描画領域に表示されている画面がクリップボードにコピーされるので, それらの図を他のアプリケーションに貼り付けて利用することもできる.

なお, 描画領域内において各要素の中央にマウス近づけると, その要素に関する軸力や曲げモーメントなどの値を表示したウィンドウがフェードインし, 要素ごとの解析結果を詳しく知ることができる. そのフェードインするウィンドウの様子を図 21 に示す.

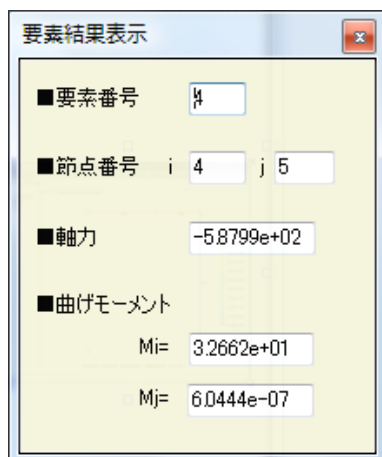


図 21: 要素結果表示

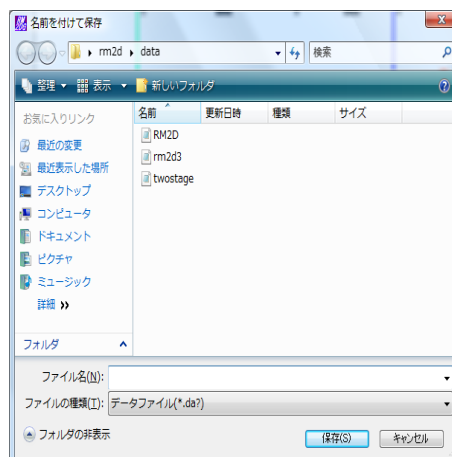


図 22: 保存

4 保存

以上に作成したモデルデータをファイルとして保存しておけば、必要なときに改めて解析を行うことができる。以下に、ファイルの保存の手順を示す。

メニューバーの「ファイル」をクリックし、「保存」を選択する。図 22 が現れるので、適当なファイル名をつけて保存する。ファイルの拡張子としては、*.dat や *.da1 などとし、データファイルであることを明示するようなものが望ましい。

5 終了

本プログラムを終えるには、メニューバーの「ファイル」をクリックし、「終了」を選択すればよい。また、データをセーブせずに終了する誤りを防ぐために、ウィンドウ右上の終了ボタンをクリックしたときには、確認のためのメッセージを表示させている。

6 キーポイントを利用した細分割要素作成法

1.1 節で説明したモデル作成の例は、キーポイントと節点とが同じ位置を占めているため、キーポイント利用のメリットを実感しにくい例題であった。ここでは、図 23 のような長さ $l = 100[\text{mm}]$ 、等分布荷重 $w = 5[\text{N/mm}]$ を受ける両端支持はりを例に挙げて、キーポイント利用の便利さを示そう。なお、縦弾性係数は $E = 2.06e5[\text{N/mm}^2]$ 、断面積は $A = 4[\text{mm}^2]$ 、断面 2 次モーメントは $I = 1.3333[\text{mm}^4]$ とする。

このはりを FEM 解析するには、荷重節点を設ける必要から、はりを適当な長さに分割しなければならない。ここでは、このはりを長さ方向に 5 分割し、それぞれの要素に負荷される荷重量 ($= 5[\text{N/mm}] \times 20[\text{mm}] = 100[\text{N}]$) をそれぞれの要素両端に $50[\text{N}]$ の集中荷重として振り分けて考える。なお、テキスト p.96 の図 5.12 のように、実際にははり要素両端点にモーメントも振り分けるべきだが、簡単のためにこれらは省略した。

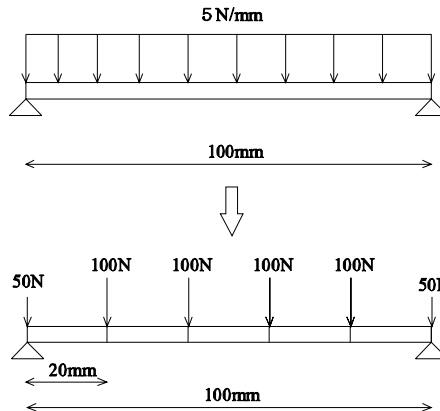


図 23: 等分布荷重を受ける両端単純支持はり

キーポイントを用いてこのモデルを作成する手順を以下に示す．はじめに，1.1.1 節と同様に，「モデル作成」 -> 「材料データ」として材料データを入力する．

次に，はりの両端点をキーポイントと考え，図 24(a) のように， $(0,0)$, $(100,0)$ の 2 点をキーポイントとして入力する．次に「モデル作成」 -> 「要素作成」とたどり，以上の 2 点をクリックしたあとに現れる「要素分割数」ウィンドウにおいて，図 24(b) のように，5 分割を指示する．すると，長さ 100[mm] のはりが 5 要素に分割され，図 24(c) のような分割図を得る．このように，キーポイントを用いて要素分割数に 2 以上の値を与えると，細かな要素生成が可能である．

このあとは，先の説明と同様，両端点の節点を (x, y) 拘束し，各節点に y 方向荷重として $-50[\text{N}]$ ないし $-100[\text{N}]$ を与えると図 25(a) のようなモデルを完成する．

最後に，FEM 解析を行うと，図 25(b) のような変形図を得る．kekka ファイルから，節点 3 または，節点 5 の y 変位は，21.845mm と読み取れる．これは，等分布荷重を受ける両端支持はりのたわみの理論解 $y = \frac{wx}{24EI}(x^3 - 2lx^2 + l^3)$ に， $x = 0.4l = 40[\text{mm}]$ を代入して得られる結果 22.573[mm] と近い値である．

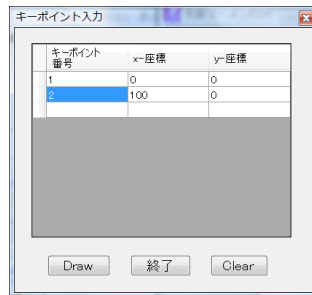
この誤差の主な要因は，分割数が不足していることである．分割数を増やせば FEM 解析結果は，はり理論解に近づいていく．

7 あとがき

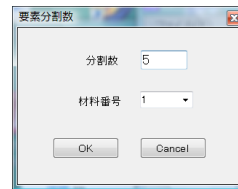
以上で平面ラーメンの FEM 解析が終了です．意外に簡単だったのではないのでしょうか．テキストのプログラム例に比べて，GUI 操作を大幅に取り入れたのが本プログラムの特徴です．今後も，さらに改善を進めていくつもりですので，ユーザの皆様からの忌憚のないご意見やご要望 - ここをこうして欲しいといった具体的な要望であると有り難いです - をお寄せ下さい．連絡先は，horibe@mx.ibaraki.ac.jp です．

参考文献

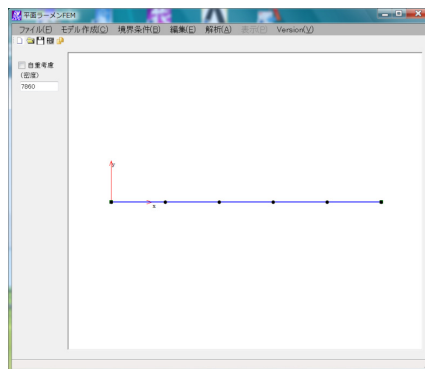
[1] 堀辺著，Visual Basic でわかるやさしい有限要素法の基礎，森北出版 (2008) ．



(a)

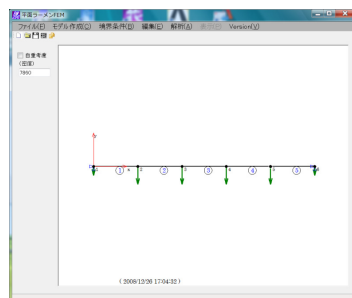


(b)

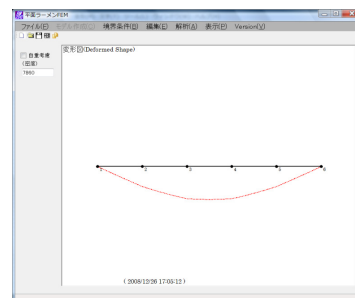


(c)

図 24: はり分割の様子



(a)



(b)

図 25: はりモデルの完成図 (a) および変形図 (b)