

実践報告・資料

応力ひずみ測定実験のパソコン処理 —有限要素法によるトラス構造解析—

岐阜職業訓練短期大学校 伊藤 達也・加藤 哲夫・原 吾朗
池田 徹・梅田 良範

Measurement System of Stress-Strain Relation by Personal Computer - Analysis of Trusses using Finite Element Method -

Tatsuya Itō, Tetuo Kato, Goro Hara, Tōru Ikeda, Yosinori Umeda

要 約 設計演習用の教材として、パソコンを用いた有限要素法トラス構造解析ソフトを作成・試行し、本教材を授業に使用し、その訓練効果について報告する。

本ソフトはBASIC言語を使用し、対話形式でトラスの荷重及び固定端条件を入力でき、グラフィック表示で視覚的にトラスの変形状態、各部材に作用する応力、ひずみ等の結果を得ることができる。解析の結果、トラス各部材に生じる作用力について、構造力学理論値と解析結果の一致が得られ、静定・不静定トラス解析ともに精度、時間的に有効であることが確認できた。また、本教材を授業に取り入れた結果、コンピュータを利用した設計手法を体験できるとともに、シミュレーションプロセスの概要、CAEの導入といった授業を展開することも可能となり、授業の進行に良好な効果が得られた。本教材は、設計におけるシミュレーションの利用方法を習得する教材として活用できる他、前報¹⁾に提示した実験とを併用すれば、トラスの実験、理論、解析を1つの共通テーマで学習できる。

I はじめに

近年、コンピュータの高速化、大容量化によりコンピュータ支援システムの導入が盛んであり、機械システムの分野でもCAD/CAMといったシステムが大きな役割を果たしている。そして最近では、試作モデルを作る代わりにコンピュータ内で構造、強度、振動などのあらゆる特性を数式モデルで表現し、機能や性能を評価するシミュレーションプロセスを適用したCAEが注目されている。このように、今後の設計技法においてコンピュータの利用は不可欠であり、それに対応した実践的訓練が望まれている。

そこで本報は、パソコンを用いた設計演習に着目し、

前報¹⁾で提示したトラスモデルを利用して、有限要素法(以下FEM)によるトラスの構造解析を試行した。そして、CAEの概念、FEMの基本的な原理やプログラム構造の理解、シミュレーションプロセスを用いた設計手法等、本教材を用いた訓練効果について報告する。

II トラス解析におけるFEMの考え方

今回使用したトラス構造FEM解析は、フックの法則から剛性マトリックスを構成する変位法を用いており²⁾、各トラス部材に生じる応力、軸力、変位の算出を行なう。尚、計算を簡略化するために平面トラスのみ扱う

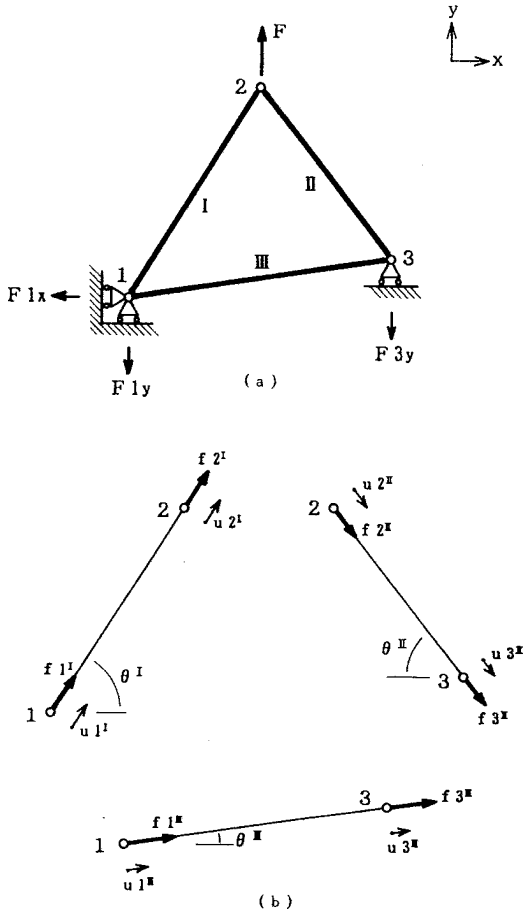


図1 FEMの考え方を示すトラスモデル

ものとした。その考え方を図1に示す簡易的な3節トラスモデルについて説明する。⁴⁾

このトラスの節点2に鉛直方向へFなる外力が作用して、各部材に作用力f、変位uが生じたとする。まず、組み合った3部材を分解して(図1(b))、部材Iだけに注目して考える。部材Iの長さ方向の伸びは、

$$\Delta U^I = u2^I - u1^I \quad (1)$$

よって、部材に生じるひずみは、

$$\epsilon^I = \frac{\Delta U^I}{L^I} \quad (2)$$

L: 部材長さ

また、この部材に働く力は、節点1、2に作用し、お互いつり合っているので

$$f1^I + f2^I = 0 \quad \therefore f2^I = -f1^I \quad (3)$$

したがって、部材Iに働く応力は

$$\sigma^I = -\frac{f1^I}{A} = \frac{f2^I}{A} \quad (4)$$

A: 部材の断面積

一方、応力とひずみの間にはフックの法則が成立しているの

$$\sigma^I = E \epsilon^I \quad (5)$$

E: 縦弾性係数

(5)式に(1)~(4)式を代入すると

$$f2^I = \frac{AE}{L^I} (u2^I - u1^I) \quad (6)$$

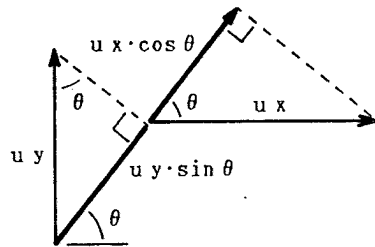
$$f1^I = -\frac{AE}{L^I} (u2^I - u1^I) = \frac{AE}{L^I} (u1^I - u2^I)$$

の関係が得られる。

ここで変位については、図2(a)に示すようにXおよびY方向の変位成分を合成したもので、各成分にx、yの添字を付けてあらわすと、

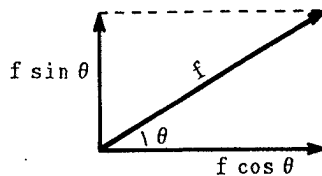
$$\begin{aligned} u1^I &= u1x^I \cdot \cos\theta^I + u1y^I \cdot \sin\theta^I \\ u2^I &= u2x^I \cdot \cos\theta^I + u2y^I \cdot \sin\theta^I \end{aligned} \quad (7)$$

一方、力を図2(b)に示すようにX方向、Y方向に分解し、各成分にx、yの添字を付けてあらわすと、



$$u y \cdot \sin \theta + u x \cdot \cos \theta = u$$

(a) 変位ベクトル



(b) 力ベクトル

図2 変位および力ベクトルの合成・分解図

$$\left. \begin{aligned} f1x' &= f1' \cdot \cos\theta' \\ f1y' &= f1' \cdot \sin\theta' \\ f2x' &= f2' \cdot \cos\theta' \\ f2y' &= f2' \cdot \sin\theta' \end{aligned} \right\} (8)$$

となる。(6)(7)式を(8)式に代入すると、

$$\left. \begin{aligned} f1x' &= \frac{AE}{L'} (u1x' \cdot \cos\theta' + u1y' \cdot \sin\theta' \\ &\quad - u2x' \cdot \cos\theta' - u2y' \cdot \sin\theta') \cos\theta' \\ f1y' &= \frac{AE}{L'} (u1x' \cdot \cos\theta' + u1y' \cdot \sin\theta' \\ &\quad - u2x' \cdot \cos\theta' - u2y' \cdot \sin\theta') \sin\theta' \\ f2x' &= \frac{AE}{L'} (u2x' \cdot \cos\theta' + u2y' \cdot \sin\theta' \\ &\quad - u1x' \cdot \cos\theta' - u1y' \cdot \sin\theta') \cos\theta' \\ f2y' &= \frac{AE}{L'} (u2x' \cdot \cos\theta' + u2y' \cdot \sin\theta' \\ &\quad - u1x' \cdot \cos\theta' - u1y' \cdot \sin\theta') \sin\theta' \end{aligned} \right\} (9)$$

同様に部材 II について

$$\left. \begin{aligned} f2x'' &= \frac{AE}{L''} (u2x'' \cdot \cos\theta'' + u2y'' \cdot \sin\theta'' \\ &\quad - u3x'' \cdot \cos\theta'' - u3y'' \cdot \sin\theta'') \cos\theta'' \\ f2y'' &= \frac{AE}{L''} (u2x'' \cdot \cos\theta'' + u2y'' \cdot \sin\theta'' \\ &\quad - u3x'' \cdot \cos\theta'' - u3y'' \cdot \sin\theta'') \sin\theta'' \\ f3x'' &= \frac{AE}{L''} (u3x'' \cdot \cos\theta'' + u3y'' \cdot \sin\theta'' \\ &\quad - u2x'' \cdot \cos\theta'' - u2y'' \cdot \sin\theta'') \cos\theta'' \\ f3y'' &= \frac{AE}{L''} (u3x'' \cdot \cos\theta'' + u3y'' \cdot \sin\theta'' \\ &\quad - u2x'' \cdot \cos\theta'' - u2y'' \cdot \sin\theta'') \sin\theta'' \end{aligned} \right\} (10)$$

同様に部材 III について

$$\left. \begin{aligned} f1x''' &= \frac{AE}{L'''} (u1x''' \cdot \cos\theta''' + u1y''' \cdot \sin\theta''' \\ &\quad - u3x''' \cdot \cos\theta''' - u3y''' \cdot \sin\theta''') \cos\theta''' \\ f1y''' &= \frac{AE}{L'''} (u1x''' \cdot \cos\theta''' + u1y''' \cdot \sin\theta''' \\ &\quad - u3x''' \cdot \cos\theta''' - u3y''' \cdot \sin\theta''') \sin\theta''' \\ f3x''' &= \frac{AE}{L'''} (u3x''' \cdot \cos\theta''' + u3y''' \cdot \sin\theta''' \\ &\quad - u1x''' \cdot \cos\theta''' - u1y''' \cdot \sin\theta''') \cos\theta''' \\ f3y''' &= \frac{AE}{L'''} (u3x''' \cdot \cos\theta''' + u3y''' \cdot \sin\theta''' \\ &\quad - u1x''' \cdot \cos\theta''' - u1y''' \cdot \sin\theta''') \sin\theta''' \end{aligned} \right\} (11)$$

となる。

つぎに、部材 I、II、III が組んである場合 (図 1 (a)) を考える。節点 1 では変位が X、Y とともに固定されているため、 $U1x=0$ 、 $U1y=0$ であるが、 $F1x$ および $F1y$ は反力として存在し未知である。節点 2 では X、Y 成分の変位は未知であるが、外力は $F2x=0$ 、 $F2y=F$ と既値である。また、節点 3 については、Y 方向は拘束

されているので $U3y=0$ だが X 方向変位は未知であり、反力も Y 方向は存在して未知だが、X 方向は $F3x=0$ と既値である。すなわち、変位が既値であれば外力は未知となり、外力が既値ならば、変位は未知となる。よって、変位・作用力の 12 変数のうち 6 個は既値であり、残りの 6 個が未知変数であることがわかる。

また、図 1 (a)(b) の各節点での外力、作用力におけるつり合を考えると、

$$\left. \begin{aligned} F1x &= f1x' + f1x''' \\ F1y &= f1y' + f1y''' \\ F2x &= f2x' + f2x'' = 0 \\ F2y &= f2y' + f2y'' = F \\ F3x &= f2x'' + f2x''' = 0 \\ F3y &= f2y'' + f2y''' \end{aligned} \right\} (12)$$

の 6 式が成立する。また、変位の関係は

$$\left. \begin{aligned} U1x &= u1x' = u1x''' = 0 \\ U1y &= u1y' = u1y''' = 0 \\ U2x &= u2x' = u2x'' \\ U2y &= u2y' = u2y'' \\ U3x &= u2x'' = u2x''' \\ U3y &= u2y'' = u2y''' = 0 \end{aligned} \right\} (13)$$

の 6 式が成立する。

(12)式に(9)(10)(11)(13)式を代入し、まとめると

$$\left. \begin{aligned} F1x &= \frac{AE}{L'} \{ \underline{U2x} \cdot (-\cos\theta') + \underline{U2y} \cdot (-\sin\theta') \} \cos\theta' \\ &\quad + \frac{AE}{L'''} \{ \underline{U3x} \cdot (-\cos\theta''') \} \cos\theta''' \\ F1y &= \frac{AE}{L'} \{ \underline{U2x} \cdot (-\cos\theta') + \underline{U2y} \cdot (-\sin\theta') \} \sin\theta' \\ &\quad + \frac{AE}{L'''} \{ \underline{U3x} \cdot (-\cos\theta''') \} \cos\theta''' \\ F2x &= \frac{AE}{L'} \{ \underline{U2x} \cdot (\cos\theta') + \underline{U2y} \cdot (\sin\theta') \} \cos\theta' \\ &\quad + \frac{AE}{L''} \{ \underline{U2x} \cdot (\cos\theta'') + \underline{U2y} \cdot (\sin\theta'') + \underline{U3x} \cdot (-\cos\theta'') \} \cos\theta'' = 0 \\ F2y &= \frac{AE}{L'} \{ \underline{U2x} \cdot (\cos\theta') + \underline{U2y} \cdot (\sin\theta') \} \sin\theta' \\ &\quad + \frac{AE}{L''} \{ \underline{U2x} \cdot (\cos\theta'') + \underline{U2y} \cdot (\sin\theta'') + \underline{U3x} \cdot (-\cos\theta'') \} \sin\theta'' = F \\ F3x &= \frac{AE}{L''} \{ \underline{U2x} \cdot (-\cos\theta'') + \underline{U2y} \cdot (-\sin\theta'') + \underline{U3x} \cdot (\cos\theta'') \} \cos\theta'' \\ &\quad + \frac{AE}{L'''} \{ \underline{U3x} \cdot (\cos\theta''') \} \cos\theta''' = 0 \\ F3y &= \frac{AE}{L''} \{ \underline{U2x} \cdot (-\cos\theta'') + \underline{U2y} \cdot (-\sin\theta'') + \underline{U3x} \cdot (\cos\theta'') \} \sin\theta'' \\ &\quad + \frac{AE}{L'''} \{ \underline{U3x} \cdot (\cos\theta''') \} \sin\theta''' \end{aligned} \right\} (14)$$

したがって、この6式を連立して解くこととくことにより波線で示したすべての未知変数が求まることになる。そして、(4)(5)式から応力とひずみが求められる。

以上のように、トラス各節点での力と変位の関係から方程式を作成し、それを連立して解くことにより、トラス部材の作用力が求まり、複雑なトラス形状についても同様に解析が可能になる。

Ⅲ 開発FEMプログラムのアルゴリズム

上記の考え方にしたがって、対話形式でトラス条件を入力でき、グラフィックでトラスの変形状態を確認できるFEMプログラムを作成した。そのプログラムを別添に示す。本プログラムはBASIC言語を使用し、以下のサブルーチンで構成されている。

- ①要素ごとの節点変位と作用力の方程式を立てる
- ②それを組み合わせて全体の方程式を立てる
- ③外力・固定端の条件処理
- ④全体方程式を解く
- ⑤各部材の応力、ひずみの計算
- ⑥画面グラフィック表示

本教材は、パソコンの能力上の理由から100節点程度の解析しか行えないが、訓練用教材としては十分な能力であると思われる。

プログラムのフローチャートを図3に示す。トラスの

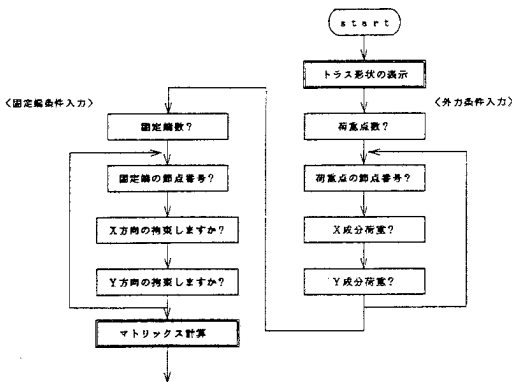


図3 トラスFEMプログラムのフローチャート

座標寸法、節点番号、材料特性値はデータ文としてプログラム中にあらかじめ入力しておく。そのデータをもと

に画面にトラス形状が表示され、荷重条件、固定端条件を画面案内にしたがってキーボードから入力する。その後、ガウス法によって剛性マトリックスを解き、応力とひずみを算出する。各部材に生じる作用力、変位等は画面に表示するとともに、トラスの変形挙動もグラフィック表示し、同時にプリンタへも出力できる。解析結果の画面表示を図4に示す。

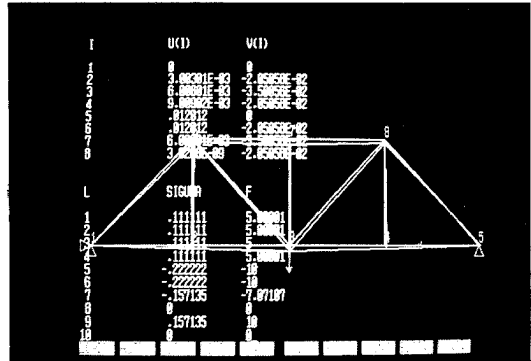


図4 トラスFEMの画面表示

Ⅳ 解析結果

本プログラムを用いて、前報¹⁾で提示した8節点13部材のトラス構造物について解析を行なった。トラス形状および寸法を図5に示す。部材材質はアルミ材と仮定

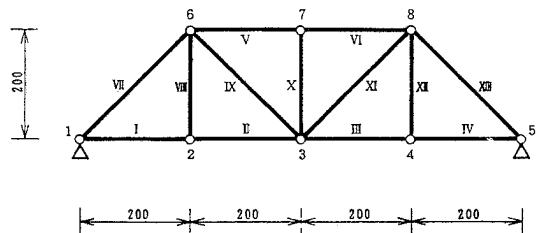
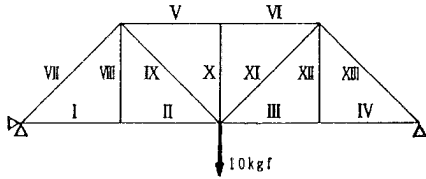


図5 8節点トラスモデルの形状寸法

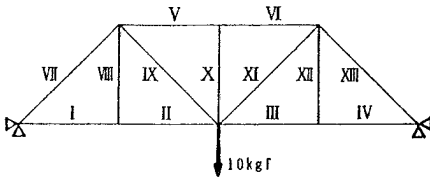
し、縦弾性係数 7500kgf/mm²、断面積 45mm²として解析を行なった。計算時間は、16bit パソコンを使用して20秒程度を要した。

各部材に生じるFEMでの計算値、および構造力学に



部材番号	FEM計算による作用力	理論計算による作用力
I	5.00001	5.
II	5.00001	5.
III	5.00000	5.
IV	5.00001	5.
V	-10.00000	-10.
VI	-10.00000	-10.
VII	-7.07107	-7.07107
VIII	0.00000	0.
IX	7.07107	7.07107
X	0.00000	0.
XI	7.07107	7.07107
XII	0.00000	0.
XIII	-7.07107	-7.07107

(a) 静定トラス



部材番号	FEM計算による作用力	理論計算による作用力
I	0.00000	0.
II	0.00000	0.
III	0.00000	0.
IV	0.00000	0.
V	-10.00000	-10.
VI	-10.00000	-10.
VII	-7.07107	-7.07107
VIII	0.00000	0.
IX	7.07107	7.07107
X	0.00000	0.
XI	7.07107	7.07107
XII	0.00000	0.
XIII	-7.07107	-7.07107

(b) 不静定トラス

図6 トラスFEMにおける計算値と理論計算による作用力の比較

における理論値の比較結果を図6(a)(b)に示す。(a)は集中荷重が作用した静定トラス、(b)は集中荷重が作用した不静定トラスの場合である。これより、各トラス部材に作用する力は両方とも一致した値が得られており、精

度的にも本プログラムの妥当性が確認できた。これは、理論式であるフックの法則をモデル式として使用しているため、計算機の有効桁による誤差しか影響していないため精度の良い結果が得られたものと考えられる。さらに(b)の不静定トラスについては、理論計算であればつり合方程式のみならず、境界条件も考慮することが必要となり多大な計算時間を必要とするが、FEMでは数十秒程度で解が得られ、どのようなトラスでも計算が可能となる利点がある。これは、連立方程式が(節点数)×2だけ成立し、変数は(節点数)×4存在するが、変位が外力のどちらかが既知であればもう一方は未知という関係があるため、連立方程式の数と変数の数は必ず同数となるからである。したがって、ゼロで除算して計算値が無限大に発散しない限り計算が可能となる。

以上のように、本FEMプログラムは構造力学理論値との一致が確認でき、あらゆるトラスにも適用できることが確認できた。

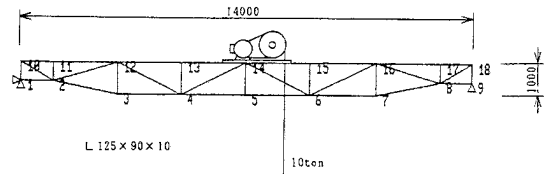


図7 本教材の訓練への適用例

(クレーン桁フレームの設計)

V 訓練への適用

本校では、制御機械設計演習にて自動走行クレーンの設計を行っており、そのクレーン桁フレームの設計に本教材を利用した。その課題例を図7に示す。設計では、桁上のウインチの位置によってトラスフレームに作用する力がどのように変化するか、トラスフレームのたわみ変形がどのようになるか、重要な設計ポイントとなる。これまで手計算では、設計に多大な時間と労力が必要であったが、本FEMを利用した場合は以下の手順で設計を進める。

- ① トラス部材の断面形状を仮定する
- ② 本FEMにて部材に作用する力を解析する
- ③ 各部材の応力と材料の許容応力と比較する

④応力が過大または過小となる部材について、断面形状の補正をおこない②へもどる

⑤負荷を他節点へ移動し、同様に解析を行なう

これによって得られたたわみ変形のシミュレーション結果を図8に示す。このように、各部材に作用する応力、

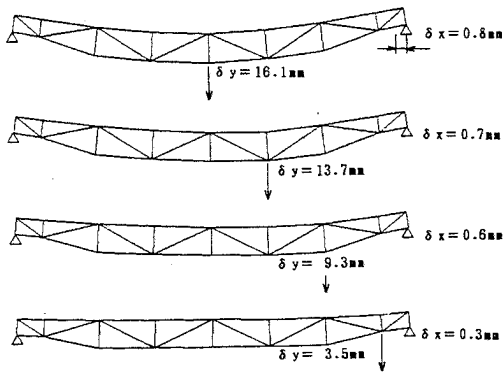


図8 クレーン桁フレームのたわみ
変形シミュレーション結果

変形を短時間で確認することができ、大作用力の部材は断面を大きくして強度を増し、小作用力の部材は断面を小さくして軽量化を図る最適設計の試行が学習できる。

本教材を用いることにより、コンピュータを利用した設計手法を体験できるとともに、シミュレーションプロセスの概要、CAEの導入といった授業を展開することができた。また、学生自身も授業に積極的な興味を示し、特に対話形式で簡単に設計条件が変更できる点、グラフィックにて視覚的に解析結果を確認できる点が授業の進行に良好な効果が得られた。しかし、本FEMプログラムは実用設計の使用には仕様設定にトラスの自重を計算していないこと、部材の座屈強度について考慮していない等の問題があり、今後改良を加えていく予定である。

VI まとめ

有限要素法によるトラス構造解析プログラムを作成・試行した結果、トラス各部材に生じる作用力について、構造力学理論値と解析結果の一致が得られ、静定・不静定トラス解析ともに精度、時間的に有効であることが確認できた。本教材は、設計におけるシミュレーションの利用方法を習得する教材として活用できた。また、本装置と実験とを併用すれば、トラスの実験、理論、解析を1つの共通テーマで学習できる。

[参考文献]

- 1) 加藤,原,池田,梅田,伊藤:報文誌,3-2(1991),37.
- 2) 小田:やさしい有限要素法の計算,(1990),17-55,日刊工業新聞社.
- 3) 戸川:有限要素法へのガイド,(1985),52-58,サイエンス社.
- 4) 今市:機械構造計画演習,(1989),54-60,共立出版.

(別添) 図5例題用 有限要素法によるトラス構造解析プログラム

```

1000 '有限要素法によるトラス構造解析プログラム (F-BASIC)
1010 '-----
1020 WINDOW (-25,-400)-(900,200) :CONSOLE 0,24,1 :CLS
1030 READ NP,NE :NODE数,要素数
1040 E=7500 :ヤング率
1050 A=45 :断面積
1060 N=2*NP
1070 DIM X(NP),Y(NP),A(NP),B(NP)
1080 DIM TU(N),TF(N),TK(N,N)
1090 DIM LL(4),W(4),EK(4,4)
1100 '-----
1110 ' 1.要素ごとの節点変位と作用力の方程式を立てる
1120 '
1130 FOR I=1 TO N
1140 FOR J=1 TO N
1150 TK(I,J)=0
1160 NEXT J
1170 TF(I)=0
1180 NEXT I
1190 FOR L=1 TO NP
1200 READ X(L),Y(L) :X座標,Y座標
1210 SYMBOL (X(L),-Y(L)-25),STR$(L),1,2,4
1220 NEXT L
1230 '-----
1240 ' 2.組み合わせて全体の方程式を立てる
1250 '
1260 COLOR 7
1270 FOR L=1 TO NE
1280 READ I,J :節点番号
1290 LINE (X(I),-Y(I))-(X(J),-Y(J)),PSET,7
1300 DX=X(J)-X(I)
1310 DY=Y(J)-Y(I)
1320 EL=SQR(DX*DX+DY*DY)
1330
1340 W(1)=DX/EL
1350 W(2)=DY/EL
1360 W(3)=-DX/EL
1370 W(4)=-DY/EL
1380 FOR IE=1 TO 4
1390 FOR JE=1 TO 4
1400 EK(IE,JE)=E*A/EL*W(IE)*W(JE)
1410 NEXT JE
1420 NEXT IE
1430 LL(1)=2*I-1
1440 LL(2)=2*I
1450 LL(3)=2*J-1
1460 LL(4)=2*J
1470 FOR IE=1 TO 4
1480 FOR JE=1 TO 4
1490 IT=LL(IE)
1500 JT=LL(JE)
1510 TK(IT,JT)=TK(IT,JT)+EK(IE,JE)
1520 NEXT JE
1530 NEXT IE
1540 NEXT L
1550 '-----
1560 ' 3.外力・固定端の条件処理
1570 '
1580 CLS 4 :BEEP << 荷重条件入力 >>
1590 LOCATE 0,0 :INPUT "荷重点数",NF
1600 IF NF<1 OR NF>NP THEN BEEP :GOTO 1590
1610 FOR L=1 TO NF
1620 INPUT "荷重点のNo",I
1630 INPUT " X成分荷重(kgf)",FX
1640 INPUT " Y成分荷重(kgf)",FY
1650 IF FX=0 THEN 1700
1660 LINE (X(I),-Y(I))-STEP(FX*5,0),PSET,2
1670 V=9 : IF FX<0 THEN V=-V
1680 LINE (X(I)+FX*5,-Y(I)+0)-STEP(-V,5),PSET,2
1690 LINE (X(I)+FX*5,-Y(I)+0)-STEP(-V,-5),PSET,2
1700 IF FY=0 THEN 1750
1710 LINE (X(I),-Y(I))-STEP(0,FY*5),PSET,2
1720 V=9 : IF FY<0 THEN V=-V
1730 LINE (X(I)+0,-Y(I)+FY*5)-STEP(5,-V),PSET,2
1740 LINE (X(I)+0,-Y(I)+FY*5)-STEP(-5,-V),PSET,2
1750 TF(2*I-1)=FX
1760 TF(2*I)=-FY
1770 NEXT L
1780 '
1790 CLS 4 :BEEP << 拘束条件入力 >>
1800 LOCATE 0,0 :INPUT "固定端数",NB
1810 IF NB<1 OR NB>NP THEN BEEP :GOTO 1800
1820 FOR L=1 TO NB
1830 INPUT "固定端のNo",I
1840 INPUT " X方向(拘束:1 自由:0)",IX
1850 INPUT " Y方向(拘束:1 自由:0)",IY
1860 IF IX>1 OR IY>1 THEN BEEP :GOTO 1830
1870 IF IX=0 THEN 1880
1880 LINE (X(I),-Y(I))-STEP(-20,-10),PSET,5
1890 LINE -STEP(0,20),PSET,5
1900 LINE -STEP(20,-10),PSET,5
1910 K=2*I-1
1920 FOR J=1 TO N
1930 TK(J,K)=0
1940 TK(K,J)=0
1950 NEXT J
1960 TK(K,K)=1
1970 TF(K)=0
1980 IF IY=0 THEN 2090
1990 LINE (X(I),-Y(I))-STEP(-10,20),PSET,5

```

```

2000 LINE -STEP(20,0),PSET,5
2010 LINE -STEP(-10,-20),PSET,5
2020 K=2*I
2030 FOR J=1 TO N
2040 TK(K,J)=0
2050 TK(J,K)=0
2060 NEXT J
2070 TK(K,K)=1
2080 TF(K)=0
2090 NEXT L
2100
-----
2110 ' 4.全体方程式を解く
2120 '
2130 CLS 4 :BEEP
2140 LOCATE 0,0 :PRINT "ただいま計算中"
2150 FOR L=1 TO N-1
2160 P=TK(L,1)
2170 FOR J=L+1 TO N
2180 TK(L,J)=TK(L,J)/P
2190 NEXT J
2200 TF(L)=TF(L)/P
2210 FOR I=L+1 TO N
2220 Q=TK(I,L)
2230 FOR J=L+1 TO N
2240 TK(I,J)=TK(I,J)-Q*TK(L,J)
2250 NEXT J
2260 TF(I)=TF(I)-Q*TF(L)
2270 NEXT I
2280 NEXT L
2290 TU(N)=TF(N)/TK(N,N)
2300 FOR L=N-1 TO 1 STEP -1
2310 S=TF(L)
2320 FOR J=L+1 TO N
2330 S=S-TK(L,J)*TU(J)
2340 NEXT J
2350 TU(L)=S
2360 NEXT L
2370
-----
2380 ' 5.各部材の応力,ひずみの計算
2390 '
2400 CLS 4 :BEEP
2410 PRINT "  節点          ×変位          Y変位"
2420 PRINT
2430 LPRINT "  節点          ×変位          Y変位"
2440 LPRINT
2450 FOR I=1 TO NP
2460 PRINT I,TU(2*I-1),TU(2*I)
2470 LPRINT I,TU(2*I-1),TU(2*I)
2480 NEXT I
2490 PRINT : PRINT
2500 LPRINT : LPRINT
2510
-----
2520 ' 6.画面グラフィック表示
2530 '
2540 FOR I=1 TO NP
2550 A(I)=TU(2*I-1)*300+X(I)
2560 B(I)=TU(2*I)*300+Y(I)
2570 NEXT I
2580 FOR L=1 TO NE
2590 READ I,J
2600 LINE (A(I),-B(I))- (A(J),-B(J)),PSET,6
2610 NEXT L
2620 PRINT "  部材          Stress(kgf/mm2)  Force(kgf)"
2630 PRINT
2640 LPRINT "  部材          Stress(kgf/mm2)  Force(kgf)"
2650 LPRINT
2660 FOR L=1 TO NE
2670 READ I,J
2680 DX=X(J)-X(I)
2690 DY=Y(J)-Y(I)
2700 EL=SQR(DX*DX+DY*DY)
2710 DU=TU(2*J-1)-TU(2*I-1)
2720 DV=TU(2*J)-TU(2*I)
2730 DL=DX/EL*DU+DY/EL*DV
2740 EPS=DL/EL
2750 STRESS=E*EPS
2760 F=A*STRESS
2770 PRINT L:"(",I:",",J:")",STRESS,F
2780 LPRINT L:"(",I:",",J:")",STRESS,F
2790 NEXT L
2800 LPRINT : HARDC 1.
2810 END
2820
-----
2830 ' トラス形状データ
2840 '
2850 DATA 8,13          ' 節点数,部材数
2860 DATA 0,0          ' 節点のX座標,Y座標
2870 DATA 200,0
2880 DATA 400,0
2890 DATA 600,0
2900 DATA 800,0
2910 DATA 200,200
2920 DATA 400,200
2930 DATA 600,200
2940
2950 DATA 1,2, 2,3, 3,4, 4,5, 6,7, 7,8, 1,8, 2,6, 3,6, 3,7, 3,8, 4,8, 5,8
2960 DATA 1,2, 2,3, 3,4, 4,5, 6,7, 7,8, 1,6, 2,6, 3,6, 3,7, 3,8, 4,8, 5,8
2970 DATA 1,2, 2,3, 3,4, 4,5, 6,7, 7,8, 1,6, 2,6, 3,6, 3,7, 3,8, 4,8, 5,8

```