

Title	研究開発計画の成果 : 2次元及び軸対称塑性大ひずみ問題解析有限要素法プログラムの利用について
Author(s)	富田, 佳宏
Citation	大阪大学大型計算機センターニュース. 1984, 53, p. 59-70
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/65609
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

研究開発計画の成果

2次元及び軸対称弾塑性大ひずみ問題解析有限要素法 プログラムの利用について

神戸大学 富田 佳宏

1. はじめに

ここで紹介するプログラムは、すでに公表^{1)~4)}している大ひずみを伴う弾塑性問題解析のための有限要素法にもとずいて作成されており、2次元問題に対して8節点曲辺4角形要素、軸対称問題に対して8節点曲辺4角形リング要素が使われている。このプログラムの適用限界は要素数50、節点数200で節点変位及び節点力の拘束数はそれぞれ50となっている。これらの限界はプログラム中のマトリックスを大きくすることで拡大できるが、問題の性質上、本プログラムの限界は実用計算に対して妥当なものであろう。

ここではプログラム内容の説明は研究開発計画報告書⁵⁾にゆずり本プログラムを使って弾塑性大ひずみ問題の解析を行なう場合に必要データ作成と出力結果の読み方ならびに本プログラムで想定した以外の材料特性を導入する場合必要な若干の変更について述べる。

2. 有限要素法解析に必要なデータの作成と出力結果の読み方

2.1 データに関連した記号の説明

有限要素解析に必要なデータは大きくわけてつぎの4種類である。

(1) 材料の物理的性質に関連したデータ

材料は均質等方弾塑性体に限定し、単軸の真応力 σ と対数ひずみ ϵ 関係が次式で与えられるとする。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon = \sigma/E, \quad \sigma \leq \sigma_y, \quad \epsilon = \sigma_y/E (\sigma/\sigma_y)^n, \quad \sigma > \sigma_y \\ E: \text{ヤング率}, \quad \sigma_y: \text{初期降伏応力}, \quad n: \text{硬化指数} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

これより、ヤング率 E 、ポアソン比、初期降伏応力 σ_y 、硬化指数 n を与えれば多軸の構成式が決定できる。したがって材料の物理的性質に関連したデータは

変数名	説明	明
YMM	ヤング率E, 単位は kg f/mm^2	
PRR	ポアソン比 ν	
YST	初期降伏応力 σ_y , 単位は kg f/mm^2	
CON	硬化指数n	
INS	0 のとき J_2 流れ理論 1 のとき J_2 変形理論	

(2) 計算条件に関連したデータ

変数名	説明	明
I PROB	平面応力, 平面ひずみ, 軸対称問題を区別する 制御変数 -1 のとき平面応力問題 0 のとき平面ひずみ問題 1 のとき軸対称問題	
NP	0 のとき剛性マトリックスが対称 1 のとき剛性マトリックスが非対称	
DDE	1回の増分あたりの最大相当塑性ひずみ増分量	
DDS	1回の増分あたりの最大変位増分量	
I PRINT	出力を行なう増分回数	
I I I T	全解析に必要な増分回数	

(3) 物体の形状, 分割などに関連したデータ

変数名	説明	明
N P O I N	全節点数 ≤ 200	
N E L E M	全要素数 ≤ 50	
N E P	要素の節点数で8が入っている。	
NG	剛性マトリックスの数値積分点の数で4が入っている。 その位置は図1参照。	
N O D (5 0 , 8)	全体構造の節点番号と要素の節点番号の関係を表すマトリックス、第1引数は要素番号、第2引数は要素の節点番号を表している。要素節点番号の順序は図1参照。	
X (2 0 0 , 2)	全体構造の節点の座標値、第1引数は節点番号、第2引数1はx座標、2はy座標を表す。単位はmm。	

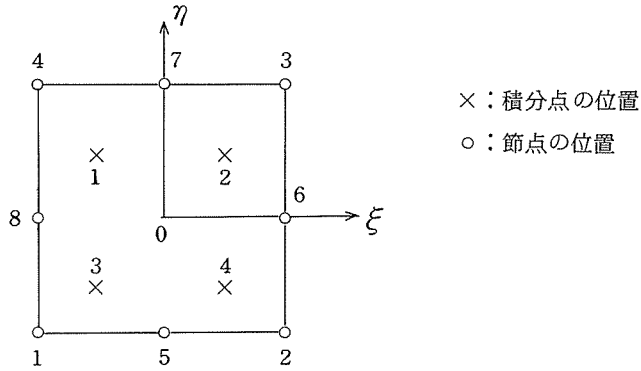


図1. 親要素の節点と積分点の位置

(4) 境界条件に関連したデータ

変数名	説	明
NBOUNV	節点変位が拘束されている節点の総数 ≤ 50	
NV(50)	節点変位が拘束されている節点番号	
NB(50, 1)	節点NV(1~NBOUNV)のx方向変位が拘束されているとき0、それ以外るとき1	
NB(50, 2)	節点NV(1~NBOUNV)のy方向変位が拘束されているとき0、それ以外るとき1	
BV(50, 1)	節点NV(1~NBOUNV)のx方向変位、単位はmm	
BV(50, 2)	節点NV(1~NBOUNV)のy方向変位、単位はmm 変位が拘束されていない場合はBV(I, J)を0.0とする。この場合NV(I, J)は1となっているので計算に関与しない。	
NBOUNF	非零の節点力拘束がある節点の総数 ≤ 50 零節点力は自動的に導入される。	
NF(50)	節点力が拘束されている節点番号	
MB(50, 1)	節点NF(1~NBOUNF)のx方向節点力が拘束されているとき0、それ以外るとき1	
MB(50, 2)	節点NF(1~NBOUNF)のy方向節点力が拘束されているとき0、それ以外るとき1	
CV(50, 1)	節点NF(1~NBOUNF)のx方向節点力、単位はkgf	

変数名	説	明
CV(50, 2)	節点NF(1~NBOUNF)のy方向節点力、単位はkgf 節点力が拘束されていないときCV(I, J)を0.0とする。この 場合MB(I, J)は1となっているので計算に参与しない。	

解析に必要なデータはあらかじめプログラム中に組込まれている2つのデータNEP, NGを除いた上記全データである。

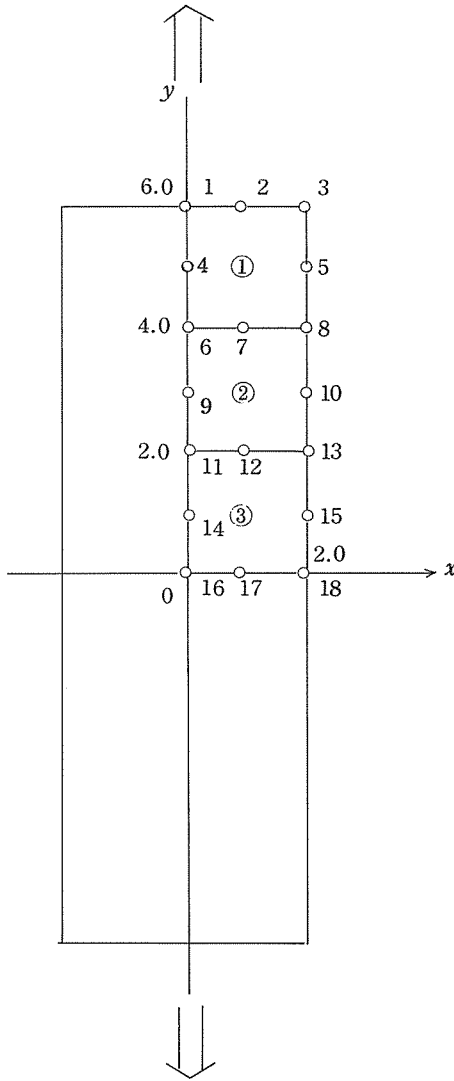


図2. 板の単軸引張り

2.2 データの作成と計算の実行

ここでは図2に示す平面ひずみ状態にある板の引張りによるくびれ現象の解析を例に一連のデータ作成の実際について説明する。

板材の単軸状態の真応力 σ と対数ひずみ ϵ 関係として式(1)を用い、 $E = 21000 \text{Kgf/mm}^2$ 、 $\sigma_y = 84 \text{Kgf/mm}^2$ 、 $n = 16$ 、ポアソン比 $\nu = 1/3$ とし J_2 流れ理論によって多軸状態の構成式を表す。この場合 $YMM = 21000.0$ 、 $PRR = 0.333333$ 、 $YST = 84.0$ 、 $CON = 16.0$ 、 $INS = 0$ となる。

平面ひずみ状態で、1回の増分あたりの最大相当塑性ひずみ増分及び変位増分をそれぞれ0.001及び0.1以下に押えて300回の増分計算を行なう。この間出力は増分計算50回ごととする。また本例では剛性マトリックスは対称である。これより $IPROB = 0$ 、 $NP = 0$ 、 $DDE = 0.001$ 、 $DDS = 0.1$ 、 $IPRIN = 50$ 、 $IIT = 300$ 。

板の形状及び変形は x 、 y 軸に関して対称であるので、図2のように1/4部分のみを要素分割して解析する。図2の要素分割より $NPOIN = 18$ 、 $NELEM = 3$ 、

表1 要素節点番号

i	NOD($i,1$)	NOD($i,2$)	NOD($i,3$)	NOD($i,4$)	NOD($i,5$)	NOD($i,6$)	NOD($i,7$)	NOD($i,8$)
1	6	8	3	1	7	5	2	4
2	11	13	8	6	12	10	7	9
3	16	18	13	11	17	15	12	14

表2 節点座標値

i	$X(i,1)$	$X(i,2)$	i	$X(i,1)$	$X(i,2)$
1	0.0	6.0	10	2.0	3.0
2	1.0	6.0	11	0.0	2.0
3	2.0	6.0	12	1.0	2.0
4	0.0	5.0	13	2.0	2.0
5	2.0	5.0	14	0.0	1.0
6	0.0	4.0	15	1.99995	1.0 *
7	1.0	4.0	16	0.0	0.0
8	2.0	4.0	17	1.0	0.0
9	0.0	3.0	18	1.9999	0.0 *

* 初期不整を与えている。

板の変形は x , y 軸に関して対称であるので、 x 軸上で y 方向変位は零、 y 軸上で x 方向変位は零となる。さらに板の両端はせん断力零で y 方向に一様な変位増分 0.1 が加えられているとする。ただしプログラム中でこの変位増分量は所定の計算条件と合うようにその大きさが制御される。この問題では力の境界条件はないので境界条件に関するデータは $NBOUNV = 11$, $NBOUNF = 0$

表 3 境界条件

i	$NV(i)$	$NB(i,1)$	$NB(i,2)$	$BV(i,1)$	$BV(i,2)$
1	1	0	0	0.0	0.1
2	2	1	0	0.0	0.1
3	3	1	0	0.0	0.1
4	4	0	1	0.0	0.0
5	6	0	1	0.0	0.0
6	9	0	1	0.0	0.0
7	11	0	1	0.0	0.0
8	14	0	1	0.0	0.0
9	16	0	0	0.0	0.0
10	17	1	0	0.0	0.0
11	18	1	0	0.0	0.0

以上作成したデータをサブルーチン DATA の READ 文

```

910          READ(5,*) YMM,PRR,YST,CON,INS
920          READ(5,*) IPROB,NP,DDE,DDS,IPRIN,IIIT
930          READ(5,*) NPOIN,NELEM,NBOUNV,NBOUNF
940          READ(5,*) (X(K,1),X(K,2),K=1,NPOIN)
950          READ(5,*) ((NOD(K,L),L=1,8),K=1,NELEM)
960          READ(5,*) (NV(I),NB(I,1),NB(I,2),BV(I,1),BV(I,2),I=1,NBOUNV)
970          IF(NBOUNF.EQ.0) GO TO 107
980          READ(5,*) (NF(I),MB(I,1),MB(I,2),CV(I,1),CV(I,2),I=1,NBOUNF)
990          107 CONTINUE

```

に従ってデータファイルを作る。

```

21000.0 0.333333 84.0 16.0 0
0 0 0.001 0.1 50 300
18 3 11 0
0.0 6.0 1.0 6.0 2.0 6.0 0.0 5.0 2.0 5.0
0.0 4.0 1.0 4.0 2.0 4.0 0.0 3.0 2.0 3.0
0.0 2.0 1.0 2.0 2.0 2.0 0.0 1.0 1.99995 1.0
0.0 0.0 1.0 0.0 1.9999 0.0
6 8 3 1 7 5 2 4
11 13 8 6 12 10 7 9
16 18 13 11 17 15 12 14
1 0 0 0.0 0.1
2 1 0 0.0 0.1
3 1 0 0.0 0.1
4 0 1 0.0 0.0
6 0 1 0.0 0.0
9 0 1 0.0 0.0
11 0 1 0.0 0.0
14 0 1 0.0 0.0
16 0 0 0.0 0.0
17 1 0 0.0 0.0
18 1 0 0.0 0.0

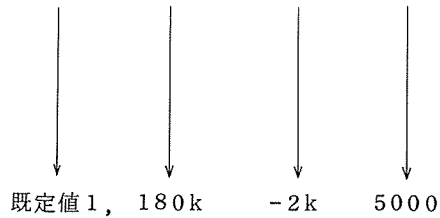
```

これを用いて計算を実行するとき必要な JCL は

\$: JOB : 課題番号 \$ パスワード, Identification, ジョブクラス,

\$: CPROC : EPLAN,, CPU-T, MEM, MEM-2, SYOT

∫ データ



\$: ENDJOB

2.3 計算結果の読み方

出力リストの一部を以下に示す。

```

PLANE STRAIN PROBLEM
J2FLOW THEORY
YOUNG MODULUS 0.2100000D+05POISSONS RATIO 0.3333333D+00YIELD STRESS 0.8400000D+02HARDENING EXPONENT 0.16000000D+02
MAXIMUM INCREMENTAL STRAIN AND DISPLACEMENT 0.1000000D-02 0.1000000D+00IPRIN 50ITERATION 300
ELEMENT NODE1 2 3 4 5 6 7 8
1 6 8 3 1 2 4
2 11 13 8 6 12 10 7
3 16 18 13 11 17 15 14
NODE XCOORDINATE YCOORDINATE
1 0. 0. 0.6000000D+01
2 0. 0.1000000D+01 0.6000000D+01
3 0. 0.2000000D+01 0.6000000D+01
4 0. 0.3000000D+01 0.5000000D+01
5 0. 0.2000000D+01 0.5000000D+01
6 0. 0.4000000D+01 0.4000000D+01
7 0. 0.1000000D+01 0.4000000D+01
8 0. 0.2000000D+01 0.4000000D+01
9 0. 0.3000000D+01 0.3000000D+01
10 0. 0.2000000D+01 0.3000000D+01
11 0. 0.2000000D+01 0.2000000D+01
12 0. 0.1000000D+01 0.2000000D+01
13 0. 0.2000000D+01 0.1000000D+01
14 0. 0.1000000D+01 0.1000000D+01
15 0. 0.1999950D+01 0.1000000D+01
16 0. 0. 0.
17 0. 0.1000000D+01 0.
18 0. 0.1999900D+01 0.
FREEDOM 36BANDWIDTH 18TOTALNODES 18TOTALELEMENTS 36BOUND 11NBOUND 0
NUMBER RV(1) NB(1,1) NB(1,2) RV(1,1) RV(1,2)
1 0 0 0 0 0
2 0 0 0 0 0
3 0 0 0 0 0
4 0 0 0 0 0
5 0 0 0 0 0
6 0 0 0 0 0
7 0 0 0 0 0
8 0 0 0 0 0
9 0 0 0 0 0
10 0 0 0 0 0
11 0 0 0 0 0
12 0 0 0 0 0
13 0 0 0 0 0
14 0 0 0 0 0
15 0 0 0 0 0
16 0 0 0 0 0
17 0 0 0 0 0
18 0 0 0 0 0
1 1 STRESS X=-0.582160D-03 Y= 0.114260D+03 Z= 0.570190D+02 XY= 0.322880D-03 S1= 0.114260D+03 S2=-0.582160D-03 SB= 0.989530D+02
STRAIN X=-0.427170D-01 Y= 0.496330D-01 Z= 0. 0. 0. XY= 0.378730D-06 EB= 0.489620D-01 DEB= 0.998660D-03 CT=-0.126810D-03
1 2 STRESS X= 0.435700D-04 Y= 0.114260D+03 Z= 0.570190D+02 XY= 0.652280D-04 S1= 0.114260D+03 S2= 0.435700D-04 SB= 0.989530D+02
STRAIN X=-0.427170D-01 Y= 0.496330D-01 Z= 0. 0. 0. XY=-0.152730D-06 EB= 0.489610D-01 DEB= 0.998660D-03 CT=-0.327080D-04
1 3 STRESS X=-0.220030D-03 Y= 0.114260D+03 Z= 0.570190D+02 XY= 0.468510D-03 S1= 0.114260D+03 S2=-0.220030D-03 SB= 0.989530D+02
STRAIN X=-0.427180D-01 Y= 0.496330D-01 Z= 0. 0. 0. XY= 0.379060D-06 EB= 0.489610D-01 DEB= 0.998700D-03 CT=-0.234940D-03
1 4 STRESS X=-0.789270D-03 Y= 0.114260D+03 Z= 0.570190D+02 XY= 0.627300D-03 S1= 0.114260D+03 S2=-0.789270D-03 SB= 0.989530D+02
STRAIN X=-0.427270D-01 Y= 0.496500D-01 Z= 0. 0. 0. XY=-0.632690D-06 EB= 0.489730D-01 DEB= 0.998990D-03 CT=-0.314550D-03
2 1 STRESS X=-0.139880D-02 Y= 0.114260D+03 Z= 0.570190D+02 XY= 0.123590D-03 S1= 0.114260D+03 S2=-0.139880D-02 SB= 0.989540D+02
STRAIN X=-0.427460D-01 Y= 0.496490D-01 Z= 0. 0. 0. XY=-0.663410D-06 EB= 0.488720D-01 DEB= 0.999030D-03 CT=-0.616740D-04

```

NODE	X-DISPLACEMENT	Y-DISPLACEMENT	X-COORDINATE	Y-COORDINATE	X-NODALFORCE	Y-NODALFORCE	
2 2	STRESS X=-0.303870-03	Y = 0.114260+03	Z = 0.570200+02	XY = 0.150400-02	S1 = 0.114260+03	S2 = -0.303870-03	SB = 0.989550+02
	STRAIN X=-0.427320-01	Y = 0.496560-01	Z = 0.	XY = -0.332065-06	EB = 0.489800-010EB = 0.999220-03	CT = -0.754180-03	1
2 3	STRESS X=-0.226430-02	Y = 0.114260+03	Z = 0.570120+02	XY = 0.614400-03	S1 = 0.114260+03	S2 = -0.226430-02	SB = 0.989570+02
	STRAIN X=-0.427440-01	Y = 0.496700-01	Z = 0.	XY = 0.135020-06	EB = 0.489940-010EB = 0.999680-03	CT = -0.308080-03	1
2 4	STRESS X=-0.784840-04	Y = 0.114260+03	Z = 0.570200+02	XY = 0.298870-02	S1 = 0.114260+03	S2 = -0.785620-04	SB = 0.989550+02
	STRAIN X=-0.427290-01	Y = 0.496520-01	Z = 0.	XY = 0.299760-05	EB = 0.489750-010EB = 0.999340-03	CT = -0.149870-02	1
3 1	STRESS X = 0.277820-03	Y = 0.114270+03	Z = 0.570220+02	XY = 0.166420-02	S1 = 0.114270+03	S2 = -0.277790-03	SB = 0.989570+02
	STRAIN X = -0.427460-01	Y = 0.496720-01	Z = 0.	XY = 0.260200-03	EB = 0.489970-010EB = 0.999920-03	CT = -0.483440-03	1
3 2	STRESS X = -0.518510-03	Y = 0.114260+03	Z = 0.570200+02	XY = 0.382330-02	S1 = 0.114260+03	S2 = -0.518640-03	SB = 0.989550+02
	STRAIN X = -0.427330-01	Y = 0.496570-01	Z = 0.	XY = 0.611400-05	EB = 0.489800-010EB = 0.999570-03	CT = -0.191710-02	1
3 3	STRESS X = 0.418750-02	Y = 0.114270+03	Z = 0.570240+02	XY = 0.958020-03	S1 = 0.114270+03	S2 = 0.418750-02	SB = 0.989560+02
	STRAIN X = -0.427350-01	Y = 0.496570-01	Z = 0.	XY = 0.180280-05	EB = 0.489830-010EB = 0.999830-03	CT = -0.480380-03	1
3 4	STRESS X = 0.164670-02	Y = 0.114270+03	Z = 0.570230+02	XY = 0.177660-02	S1 = 0.114270+03	S2 = 0.164670-02	SB = 0.989580+02
	STRAIN X = -0.427480-01	Y = 0.496720-01	Z = 0.	XY = 0.327670-05	EB = 0.490000-010EB = 0.100000-02	CT = -0.489080-03	1
1 1	STRESS X = 0.110040-02	Y = 0.118310+03	Z = 0.591180+02	XY = 0.382750-01	S1 = 0.118310+03	S2 = 0.108800-02	SB = 0.102460+03
	STRAIN X = -0.757180-01	Y = 0.9226670-01	Z = 0.	XY = 0.1519260-05	EB = 0.922340-010EB = 0.	CT = -0.185370-01	0
1 2	STRESS X = 0.576390-01	Y = 0.118570+03	Z = 0.594330+02	XY = -0.573210-01	S1 = 0.118570+03	S2 = 0.576120-01	SB = 0.102640+03
	STRAIN X = -0.760200-01	Y = 0.928960-01	Z = 0.	XY = 0.108220-04	EB = 0.927880-010EB = 0.	CT = 0.277110-01	0
1 3	STRESS X = -0.203860+00	Y = 0.118550+03	Z = 0.590730+02	XY = 0.918910-01	S1 = 0.118550+03	S2 = -0.203930+00	SB = 0.102670+03
	STRAIN X = -0.761360-01	Y = 0.930750-01	Z = 0.	XY = -0.944450-05	EB = 0.929080-010EB = 0.209210-04	CT = -0.444900-01	1
1 4	STRESS X = 0.227140+00	Y = 0.118660+03	Z = 0.591770+02	XY = 0.898250-01	S1 = 0.118660+03	S2 = -0.227210+00	SB = 0.102960+03
	STRAIN X = -0.765560-01	Y = 0.936420-01	Z = 0.	XY = -0.582260-05	EB = 0.933300-010EB = 0.152930-03	CT = -0.432880-01	1
2 1	STRESS X = -0.118390+00	Y = 0.118500+03	Z = 0.591630+02	XY = 0.141360-01	S1 = 0.118500+03	S2 = -0.118390+00	SB = 0.102730+03
	STRAIN X = -0.769170-01	Y = 0.943460-01	Z = 0.	XY = -0.814820-05	EB = 0.937180-010EB = 0.162330-03	CT = -0.468270-02	1

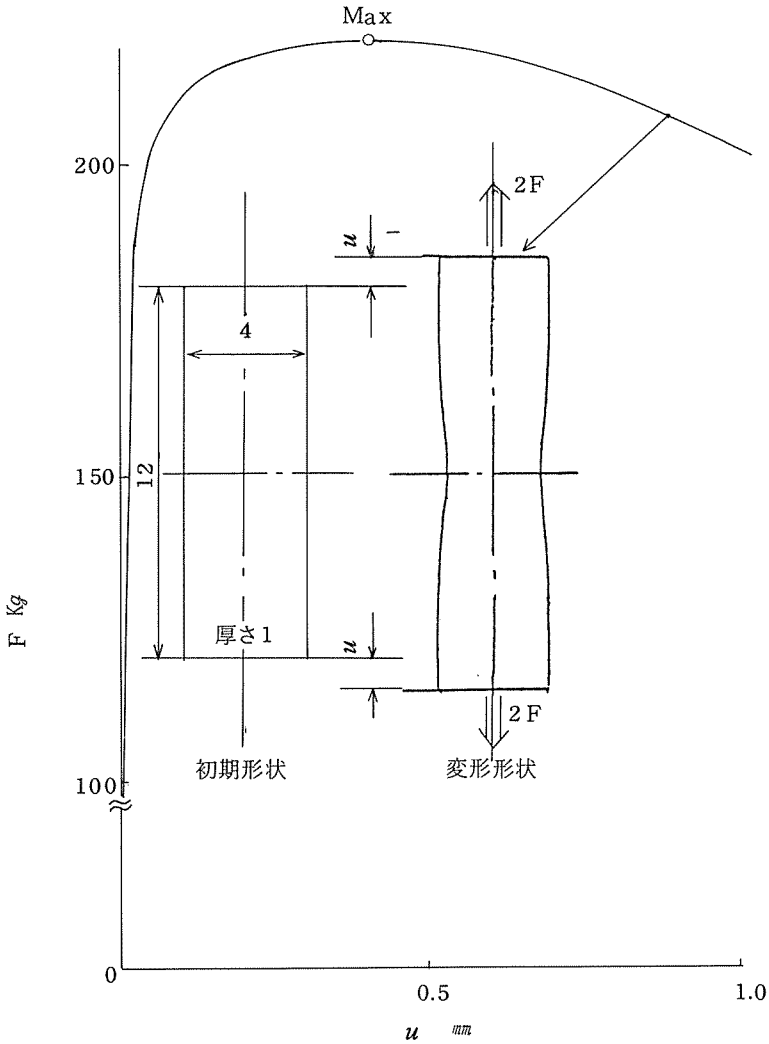


図3. 板の単軸引張計算結果

出力リストにははじめに入力したデータ、続いて各要素1つの積分点あたり2行を確保して1行目には要素番号、積分点の番号、応力 σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , 主応力 σ_1 , σ_2 , 相当応力 $\bar{\sigma}$, 2行目にはGreenのひずみ γ_{xx} , γ_{yy} , γ_{zz} , γ_{xy} , 相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p$, 相当塑性ひずみ増分 $\Delta\bar{\epsilon}_p$, 主応力方向 θ , 負荷・除荷の判定記号が順に出力されている。つづいて各節点の x , y 方向変位, x , y 座標, x , y 方向節点力が順に出力されている。これらはいずれも増分50回ごとである。全体的な板の両端の変位あるいは力などについて各増分計算ごと得られる値を知りたいときはサブルーチンRESULTを若干変更する必要がある。

たとえば本計算例の場合、各増分計算ごと、端部の y 方向変位 u 、引張力 F 、負荷・除荷の

判定記号MMを出力する場合、サブルーチンRESULTに以下のステートメントを加えればよい。

```
7640          PS=FT(1,2)+FT(2,2)+FT(3,2)
7650          WRITE(6,620) III,UT(1,2),PS,MM
7660          620 FORMAT(1H ,I4,2D15.7,I4)
```

以上の出力結果より図3に示す板両端の変位 u と引張力 F の関係ならびに変形形状を得る。

3. 任意形の単軸応力ひずみ関係の導入に伴う変更

本プログラムは式(1)の単軸真応力 σ と対数ひずみ ϵ 関係を想定している。したがってこれとは形の異なる応力とひずみ関係を導入する場合、サブルーチンMATCONの相当応力 $SST(LK, 5*KK)$ 、初期降伏応力 YST 、硬化指数 CON を与えて塑性接線係数 $HD(LK, KK)$ を求める部分

```
10080          S=SST(LK,5*KK)/YST
10090          IF(S.LE.1.001) S=1.001
10100          S1=(CON-1.0)*DLOG(S)
10110          HD(LK,KK)=YM1/(DEXP(S1)*CON-1.0)
```

を、それぞれの応力とひずみ関係から塑性接線係数 H' を求めて $HD(LK, KK)$ に導入するように変更すればよい。

4. あとがき

2次元及び軸対称弾塑性大ひずみ問題解析有限要素法プログラムの使用方法、とくにデータの作成、について平面ひずみ条件下での単軸引張りを受ける板のくびれ現象の解析を例に詳述した。プログラム内容の詳細についての説明記事は研究開発計画報告書⁵⁾を参照されたい。

5. 参考文献

- (1) H. Kitagawa and Y. Tomita., Proc. 21st. Japan, Natl. Congr, Appl. Mech, (1971), 243.
- (2) 北川, 富田, 材料, 29(1980), 663.
- (3) 富田, 鉄と鋼., 67(1981), 710.
- (4) 富田, 塑性と加工., 22(1981), 410.
- (5) 富田, 大阪大学大型計算機センター研究開発計画報告書(1983)

(追) なお、ソース・プログラムは次のファイルに入っております。

LIBSOURCE/APPLIC/EPLAN2D

また、データは

LIBSOURCE/APPLIC/EPLANDA

に入っております。