



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	<a href="https://hdl.handle.net/11094/65609">https://hdl.handle.net/11094/65609</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

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

The University of Osaka

# 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<sup>1)～4)</sup>している大ひずみを伴なう弾塑性問題解析のための有限要素法にもとづ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<sup>5)</sup>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な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きの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 $\sigma$ と対数ひずみ $\epsilon$ 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 $\sigma_y$ 、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
Y MM	ヤング率 E, 単位は $\text{kgf}/\text{mm}^2$	
P R R	ポアソン比 $\nu$	
Y S T	初期降伏応力 $\sigma_y$ , 単位は $\text{kgf}/\text{mm}^2$	
C O N	硬化指数 $n$	
I N S	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
I P R O B	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	
N P	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	
D D E	1 回の増分あたりの最大相当塑性ひずみ増分量	
D D S	1 回の増分あたりの最大変位増分量	
I P R I N T	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
N P O I N	全節点数 $\leq 200$	
N E L E M	全要素数 $\leq 50$	
N E P	要素の節点数で 8 が入っている。	
N G	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 ( 50, 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 ( 200, 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 $\text{mm}$ 。	

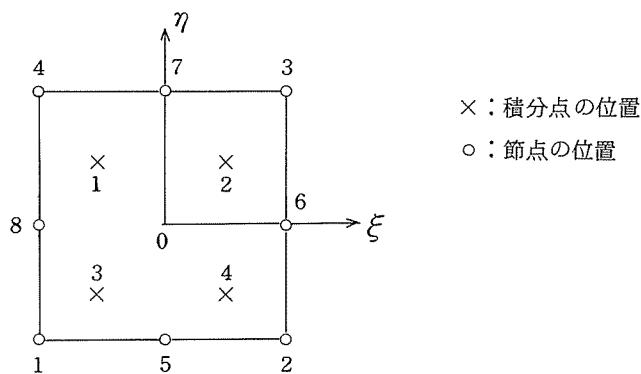


図 1. 親要素の節点と積分点の位置

(4) 境界条件に関するデータ

変 数 名	説 明
N B O U N V	節点変位が拘束されている節点の総数 $\leq 50$
N V ( 50 )	節点変位が拘束されている節点番号
N B ( 50, 1 )	節点 N V ( 1 ~ N B O U N V ) の $x$ 方向変位が拘束されているとき 0, それ以外のとき 1
N B ( 50, 2 )	節点 N V ( 1 ~ N B O U N V ) の $y$ 方向変位が拘束されているとき 0, それ以外のとき 1
B V ( 50, 1 )	節点 N V ( 1 ~ N B O U N V ) の $x$ 方向変位、単位は mm
B V ( 50, 2 )	節点 N V ( 1 ~ N B O U N V ) の $y$ 方向変位、単位は mm 変位が拘束されていない場合は B V ( I, J ) を 0.0 とする。この場合 N V ( I, J ) は 1 となっているので計算に関与しない。
N B O U N F	非零の節点力拘束がある節点の総数 $\leq 50$ 零節点力は自動的に導入される。
N F ( 50 )	節点力が拘束されている節点番号
M B ( 50, 1 )	節点 N F ( 1 ~ N B O U N F ) の $x$ 方向節点力が拘束されているとき 0, それ以外のとき 1
M B ( 50, 2 )	節点 N F ( 1 ~ N B O U N F ) の $y$ 方向節点力が拘束されているとき 0, それ以外のとき 1
C V ( 50, 1 )	節点 N F ( 1 ~ N B O U N F ) 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関与しない。

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N E P, N Gを除いた上記全データである。

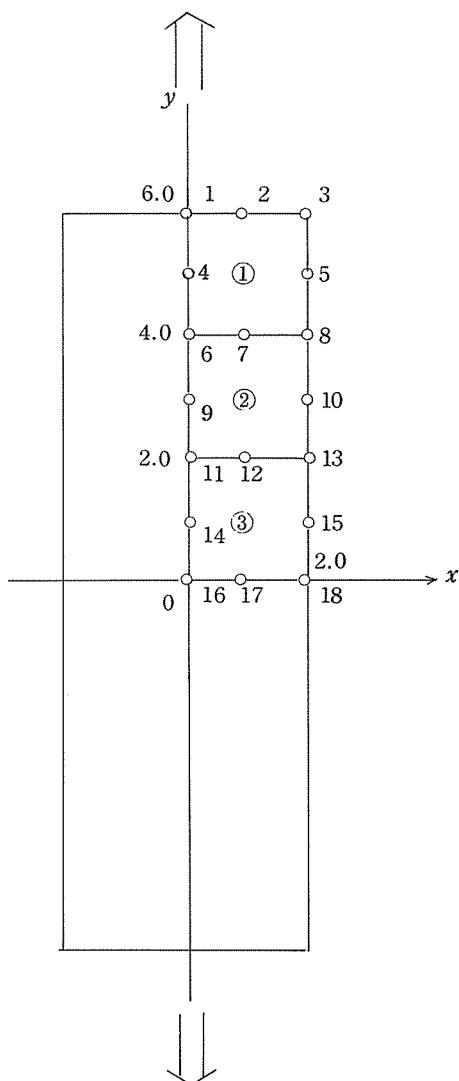


図2. 板の単軸引張り

## 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  $\sigma$  と対数ひずみ  $\epsilon$  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以下に抑えて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  $PROB = 0$  ,  $NP = 0$  ,  $DDE = 0.001$  ,  $DDS = 0.1$  ,  $PRIN = 50$  ,  $INIT = 300$  。

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  $NPON = 18$  ,  $NLEM = 3$  ,

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 *

\* 初期不整を与えてある。

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。

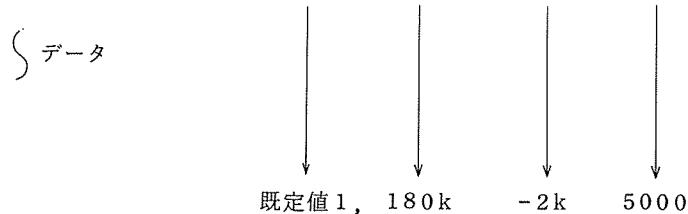
```

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 J C L は

\$ : J O B : 課題番号 \$ パスワード, Identification, ジョブクラス,  
 \$ : C P R O C : E P L A N,, C P U - T, M E M, M E M - 2, S Y O T



\$ : E N D J O B

## 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 0.21000000+05 POISSONS RATIO 0.33333300+00 YIELD STRESS 0.84000000+02HARDENING EXPONENT 0.16000000+02
MAX NUM INCREMENTAL STRAIN AND DISPLACEMENT 0.10000000+00 PRIN SQUATURATION 300
ELEMENT NODE 1 2 3 4 5 6 7
      6   7   8   9   10  11  12  13
      11  12  13  14   7   8   9   10
      13  14  15  16   1   2   3   4
      16  17  18  19   5   6   7   8
      19  20  21  22   9   10  11  12
      21  22  23  24   1   2   3   4
      23  24  25  26   5   6   7   8
      25  26  27  28   9   10  11  12
      27  28  29  30   1   2   3   4
      29  30  31  32   5   6   7   8
      31  32  33  34   9   10  11  12
      33  34  35  36   1   2   3   4
      35  36  37  38   5   6   7   8
      37  38  39  40   9   10  11  12
      39  40  41  42   1   2   3   4
      41  42  43  44   5   6   7   8
      43  44  45  46   9   10  11  12
      45  46  47  48   1   2   3   4
      47  48  49  50   5   6   7   8
      49  50  51  52   9   10  11  12
      51  52  53  54   1   2   3   4
      53  54  55  56   5   6   7   8
      55  56  57  58   9   10  11  12
      57  58  59  60   1   2   3   4
      59  60  61  62   5   6   7   8
      61  62  63  64   9   10  11  12
      63  64  65  66   1   2   3   4
      65  66  67  68   5   6   7   8
      67  68  69  70   9   10  11  12
      69  70  71  72   1   2   3   4
      71  72  73  74   5   6   7   8
      73  74  75  76   9   10  11  12
      75  76  77  78   1   2   3   4
      77  78  79  80   5   6   7   8
      79  80  81  82   9   10  11  12
      81  82  83  84   1   2   3   4
      83  84  85  86   5   6   7   8
      85  86  87  88   9   10  11  12
      87  88  89  90   1   2   3   4
      89  90  91  92   5   6   7   8
      91  92  93  94   9   10  11  12
      93  94  95  96   1   2   3   4
      95  96  97  98   5   6   7   8
      97  98  99  100  9   10  11  12
      99  100 101 102  1   2   3   4
      101 102 103 104  5   6   7   8
      103 104 105 106  9   10  11  12
      105 106 107 108  1   2   3   4
      107 108 109 110  5   6   7   8
      109 110 111 112  9   10  11  12
      111 112 113 114  1   2   3   4
      113 114 115 116  5   6   7   8
      115 116 117 118  9   10  11  12
      117 118 119 120  1   2   3   4
      119 120 121 122  5   6   7   8
      121 122 123 124  9   10  11  12
      123 124 125 126  1   2   3   4
      125 126 127 128  5   6   7   8
      127 128 129 130  9   10  11  12
      129 130 131 132  1   2   3   4
      131 132 133 134  5   6   7   8
      133 134 135 136  9   10  11  12
      135 136 137 138  1   2   3   4
      137 138 139 140  5   6   7   8
      139 140 141 142  9   10  11  12
      141 142 143 144  1   2   3   4
      143 144 145 146  5   6   7   8
      145 146 147 148  9   10  11  12
      147 148 149 150  1   2   3   4
      149 150 151 152  5   6   7   8
      151 152 153 154  9   10  11  12
      153 154 155 156  1   2   3   4
      155 156 157 158  5   6   7   8
      157 158 159 160  9   10  11  12
      159 160 161 162  1   2   3   4
      161 162 163 164  5   6   7   8
      163 164 165 166  9   10  11  12
      165 166 167 168  1   2   3   4
      167 168 169 170  5   6   7   8
      169 170 171 172  9   10  11  12
      171 172 173 174  1   2   3   4
      173 174 175 176  5   6   7   8
      175 176 177 178  9   10  11  12
      177 178 179 180  1   2   3   4
      179 180 181 182  5   6   7   8
      181 182 183 184  9   10  11  12
      183 184 185 186  1   2   3   4
      185 186 187 188  5   6   7   8
      187 188 189 190  9   10  11  12
      189 190 191 192  1   2   3   4
      191 192 193 194  5   6   7   8
      193 194 195 196  9   10  11  12
      195 196 197 198  1   2   3   4
      197 198 199 200  5   6   7   8
      199 200 201 202  9   10  11  12
      201 202 203 204  1   2   3   4
      203 204 205 206  5   6   7   8
      205 206 207 208  9   10  11  12
      207 208 209 210  1   2   3   4
      209 210 211 212  5   6   7   8
      211 212 213 214  9   10  11  12
      213 214 215 216  1   2   3   4
      215 216 217 218  5   6   7   8
      217 218 219 220  9   10  11  12
      219 220 221 222  1   2   3   4
      221 222 223 224  5   6   7   8
      223 224 225 226  9   10  11  12
      225 226 227 228  1   2   3   4
      227 228 229 230  5   6   7   8
      229 230 231 232  9   10  11  12
      231 232 233 234  1   2   3   4
      233 234 235 236  5   6   7   8
      235 236 237 238  9   10  11  12
      237 238 239 240  1   2   3   4
      239 240 241 242  5   6   7   8
      241 242 243 244  9   10  11  12
      243 244 245 246  1   2   3   4
      245 246 247 248  5   6   7   8
      247 248 249 250  9   10  11  12
      249 250 251 252  1   2   3   4
      251 252 253 254  5   6   7   8
      253 254 255 256  9   10  11  12
      255 256 257 258  1   2   3   4
      257 258 259 260  5   6   7   8
      259 260 261 262  9   10  11  12
      261 262 263 264  1   2   3   4
      263 264 265 266  5   6   7   8
      265 266 267 268  9   10  11  12
      267 268 269 270  1   2   3   4
      269 270 271 272  5   6   7   8
      271 272 273 274  9   10  11  12
      273 274 275 276  1   2   3   4
      275 276 277 278  5   6   7   8
      277 278 279 280  9   10  11  12
      279 280 281 282  1   2   3   4
      281 282 283 284  5   6   7   8
      283 284 285 286  9   10  11  12
      285 286 287 288  1   2   3   4
      287 288 289 290  5   6   7   8
      289 290 291 292  9   10  11  12
      291 292 293 294  1   2   3   4
      293 294 295 296  5   6   7   8
      295 296 297 298  9   10  11  12
      297 298 299 299  1   2   3   4
      299 299 300 300  5   6   7   8
      300 300 301 301  9   10  11  12
      301 301 302 302  1   2   3   4
      302 302 303 303  5   6   7   8
      303 303 304 304  9   10  11  12
      304 304 305 305  1   2   3   4
      305 305 306 306  5   6   7   8
      306 306 307 307  9   10  11  12
      307 307 308 308  1   2   3   4
      308 308 309 309  5   6   7   8
      309 309 310 310  9   10  11  12
      310 310 311 311  1   2   3   4
      311 311 312 312  5   6   7   8
      312 312 313 313  9   10  11  12
      313 313 314 314  1   2   3   4
      314 314 315 315  5   6   7   8
      315 315 316 316  9   10  11  12
      316 316 317 317  1   2   3   4
      317 317 318 318  5   6   7   8
      318 318 319 319  9   10  11  12
      319 319 320 320  1   2   3   4
      320 320 321 321  5   6   7   8
      321 321 322 322  9   10  11  12
      322 322 323 323  1   2   3   4
      323 323 324 324  5   6   7   8
      324 324 325 325  9   10  11  12
      325 325 326 326  1   2   3   4
      326 326 327 327  5   6   7   8
      327 327 328 328  9   10  11  12
      328 328 329 329  1   2   3   4
      329 329 330 330  5   6   7   8
      330 330 331 331  9   10  11  12
      331 331 332 332  1   2   3   4
      332 332 333 333  5   6   7   8
      333 333 334 334  9   10  11  12
      334 334 335 335  1   2   3   4
      335 335 336 336  5   6   7   8
      336 336 337 337  9   10  11  12
      337 337 338 338  1   2   3   4
      338 338 339 339  5   6   7   8
      339 339 340 340  9   10  11  12
      340 340 341 341  1   2   3   4
      341 341 342 342  5   6   7   8
      342 342 343 343  9   10  11  12
      343 343 344 344  1   2   3   4
      344 344 345 345  5   6   7   8
      345 345 346 346  9   10  11  12
      346 346 347 347  1   2   3   4
      347 347 348 348  5   6   7   8
      348 348 349 349  9   10  11  12
      349 349 350 350  1   2   3   4
      350 350 351 351  5   6   7   8
      351 351 352 352  9   10  11  12
      352 352 353 353  1   2   3   4
      353 353 354 354  5   6   7   8
      354 354 355 355  9   10  11  12
      355 355 356 356  1   2   3   4
      356 356 357 357  5   6   7   8
      357 357 358 358  9   10  11  12
      358 358 359 359  1   2   3   4
      359 359 360 360  5   6   7   8
      360 360 361 361  9   10  11  12
      361 361 362 362  1   2   3   4
      362 362 363 363  5   6   7   8
      363 363 364 364  9   10  11  12
      364 364 365 365  1   2   3   4
      365 365 366 366  5   6   7   8
      366 366 367 367  9   10  11  12
      367 367 368 368  1   2   3   4
      368 368 369 369  5   6   7   8
      369 369 370 370  9   10  11  12
      370 370 371 371  1   2   3   4
      371 371 372 372  5   6   7   8
      372 372 373 373  9   10  11  12
      373 373 374 374  1   2   3   4
      374 374 375 375  5   6   7   8
      375 375 376 376  9   10  11  12
      376 376 377 377  1   2   3   4
      377 377 378 378  5   6   7   8
      378 378 379 379  9   10  11  12
      379 379 380 380  1   2   3   4
      380 380 381 381  5   6   7   8
      381 381 382 382  9   10  11  12
      382 382 383 383  1   2   3   4
      383 383 384 384  5   6   7   8
      384 384 385 385  9   10  11  12
      385 385 386 386  1   2   3   4
      386 386 387 387  5   6   7   8
      387 387 388 388  9   10  11  12
      388 388 389 389  1   2   3   4
      389 389 390 390  5   6   7   8
      390 390 391 391  9   10  11  12
      391 391 392 392  1   2   3   4
      392 392 393 393  5   6   7   8
      393 393 394 394  9   10  11  12
      394 394 395 395  1   2   3   4
      395 395 396 396  5   6   7   8
      396 396 397 397  9   10  11  12
      397 397 398 398  1   2   3   4
      398 398 399 399  5   6   7   8
      399 399 400 400  9   10  11  12
      400 400 401 401  1   2   3   4
      401 401 402 402  5   6   7   8
      402 402 403 403  9   10  11  12
      403 403 404 404  1   2   3   4
      404 404 405 405  5   6   7   8
      405 405 406 406  9   10  11  12
      406 406 407 407  1   2   3   4
      407 407 408 408  5   6   7   8
      408 408 409 409  9   10  11  12
      409 409 410 410  1   2   3   4
      410 410 411 411  5   6   7   8
      411 411 412 412  9   10  11  12
      412 412 413 413  1   2   3   4
      413 413 414 414  5   6   7   8
      414 414 415 415  9   10  11  12
      415 415 416 416  1   2   3   4
      416 416 417 417  5   6   7   8
      417 417 418 418  9   10  11  12
      418 418 419 419  1   2   3   4
      419 419 420 420  5   6   7   8
      420 420 421 421  9   10  11  12
      421 421 422 422  1   2   3   4
      422 422 423 423  5   6   7   8
      423 423 424 424  9   10  11  12
      424 424 425 425  1   2   3   4
      425 425 426 426  5   6   7   8
      426 426 427 427  9   10  11  12
      427 427 428 428  1   2   3   4
      428 428 429 429  5   6   7   8
      429 429 430 430  9   10  11  12
      430 430 431 431  1   2   3   4
      431 431 432 432  5   6   7   8
      432 432 433 433  9   10  11  12
      433 433 434 434  1   2   3   4
      434 434 435 435  5   6   7   8
      435 435 436 436  9   10  11  12
      436 436 437 437  1   2   3   4
      437 437 438 438  5   6   7   8
      438 438 439 439  9   10  11  12
      439 439 440 440  1   2   3   4
      440 440 441 441  5   6   7   8
      441 441 442 442  9   10  11  12
      442 442 443 443  1   2   3   4
      443 443 444 444  5   6   7   8
      444 444 445 445  9   10  11  12
      445 445 446 446  1   2   3   4
      446 446 447 447  5   6   7   8
      447 447 448 448  9   10  11  12
      448 448 449 449  1   2   3   4
      449 449 450 450  5   6   7   8
      450 450 451 451  9   10  11  12
      451 451 452 452  1   2   3   4
      452 452 453 453  5   6   7   8
      453 453 454 454  9   10  11  12
      454 454 455 455  1   2   3   4
      455 455 456 456  5   6   7   8
      456 456 457 457  9   10  11  12
      457 457 458 458  1   2   3   4
      458 458 459 459  5   6   7   8
      459 459 460 460  9   10  11  12
      460 460 461 461  1   2   3   4
      461 461 462 462  5   6   7   8
      462 462 463 463  9   10  11  12
      463 463 464 464  1   2   3   4
      464 464 465 465  5   6   7   8
      465 465 466 466  9   10  11  12
      466 466 467 467  1   2   3   4
      467 467 468 468  5   6   7   8
      468 468 469 469  9   10  11  12
      469 469 470 470  1   2   3   4
      470 470 471 471  5   6   7   8
      471 471 472 472  9   10  11  12
      472 472 473 473  1   2   3   4
      473 473 474 474  5   6   7   8
      474 474 475 475  9   10  11  12
      475 475 476 476  1   2   3   4
      476 476 477 477  5   6   7   8
      477 477 478 478  9   10  11  12
      478 478 479 479  1   2   3   4
      479 479 480 480  5   6   7   8
      480 480 481 481  9   10  11  12
      481 481 482 482  1   2   3   4
      482 482 483 483  5   6   7   8
      483 483 484 484  9   10  11  12
      484 484 485 485  1   2   3   4
      485 485 486 486  5   6   7   8
      486 486 487 487  9   10  11  12
      487 487 488 488  1   2   3   4
      488 488 489 489  5   6   7   8
      489 489 490 490  9   10  11  12
      490 490 491 491  1   2   3   4
      491 491 492 492  5   6   7   8
      492 492 493 493  9   10  11  12
      493 493 494 494  1   2   3   4
      494 494 495 495  5   6   7   8
      495 495 496 496  9   10  11  12
      496 496 497 497  1   2   3   4
      497 497 498 498  5   6   7   8
      498 498 499 499  9   10  11  12
      499 499 500 500  1   2   3   4
      500 500 501 501  5   6   7   8
      501 501 502 502  9   10  11  12
      502 502 503 503  1   2   3   4
      503 503 504 504  5   6   7   8
      504 504 505 505  9   10  11  12
      505 505 506 506  1   2   3   4
      506 506 507 507  5   6   7   8
      507 507 508 508  9   10  11  12
      508 508 509 509  1   2   3   4
      509 509 510 510  5   6   7   8
      510 510 511 511  9   10  11  12
      511 511 512 512  1   2   3   4
      512 512 513 513  5   6   7   8
      513 513 514 514  9   10  11  12
      514 514 515 515  1   2   3   4
      515 515 516 516  5   6   7   8
      516 516 517 517  9   10  11  12
      517 517 518 518  1   2   3   4
      518 518 519 519  5   6   7   8
      519 519 520 520  9   10  11  12
      520 520 521 521  1   2   3   4
      521 521 522 522  5   6   7   8
      522 522 523 523  9   10  11  12
      523 523 524 524  1   2   3   4
      524 524 525 525  5   6   7   8
      525 525 526 526  9   10  11  12
      526 526 527 527  1   2   3   4
      527 527 528 528  5   6   7   8
      528 528 529 529  9   10  11  12
      529 529 530 530  1   2   3   4
      530 530 531 531  5   6   7   8
      531 531 532 532  9   10  11  12
      532 532 533 533  1   2   3   4
      533 533 534 534  5   6   7   8
      534 534 535 535  9   10  11  12
      535 535 536 536  1   2   3   4
      536 536 537 537  5   6   7   8
      537 537 538 538  9   10  11  12
      538 538 539 539  1   2   3   4
      539 539 540 540  5   6   7   8
      540 540 541 541  9   10  11  12
      541 541 542 542  1   2   3   4
      542 542 543 543  5   6   7   8
      543 543 544 544  9   10  11  12
      544 544 545 545  1   2   3   4
      545 545 546 546  5   6   7   8
      546 546 547 547  9   10  11  12
      547 547 548
```

```

2 2 STRESS x=-0.303870-0.3 y= 0.114260+0.3 z= 0.570200+0.2 xy= 0.150400-0.2 s1= 0.114260+0.3 s2= -0.303870-0.3 s3= 0.989550+0.2
STRAIN x=-0.427350-0.1 y= 0.495500-0.1 z= 0. xy= -0.32050-0.06 eb= 0.89800-0.10eb= 0.9992-0.03 ct= -0.75180-0.3 1
2 3 STRESS x=-0.226430-0.2 y= 0.114220+0.3 z= 0.570120+0.2 xy= 0.144600-0.3 s1= 0.114220+0.3 s2= -0.226430-0.2 s3= 0.88570+0.2
STRAIN x=-0.427440-0.1 y= 0.496700-0.1 z= 0. xy= 0.135020-0.06 eb= 0.8994-0.010eb= 0.99680-0.03 ct= 0.308080-0.3 1
2 4 STRESS x=-0.784840-0.4 y= 0.114260+0.5 z= 0.570200+0.2 xy= 0.298870-0.2 s1= 0.114260+0.3 s2= -0.78560-0.4 s3= 0.989550+0.2
STRAIN x=-0.427290-0.1 y= 0.495520-0.1 z= 0. xy= 0.299760-0.05 eb= 0.489750-0.10eb= 0.999340-0.03 ct= -0.149870-0.2 1
3 1 STRESS x= 0.277280-0.3 y= 0.114240-0.1 z= 0.570220+0.2 xy= 0.146620-0.2 s1= 0.114270+0.3 s2= 0.277280-0.3 s3= 0.98570+0.2
STRAIN x=-0.427460-0.1 y= 0.496720-0.1 z= 0. xy= 0.266800-0.05 eb= 0.489970-0.10eb= 0.99920-0.03 ct= -0.834480-0.3 1
3 2 STRESS x=-0.518510-0.3 y= 0.114260+0.5 z= 0.570200+0.2 xy= 0.382130-0.2 s1= 0.114260+0.3 s2= -0.518640-0.3 s3= 0.989550+0.2
STRAIN x=-0.427350-0.1 y= 0.496730-0.1 z= 0. xy= 0.611400-0.05 eb= 0.89800-0.010eb= 0.99950-0.03 ct= -0.19710-0.2 1
3 3 STRESS x= 0.518730-0.2 y= 0.114270+0.2 z= 0.570240+0.2 xy= 0.958020-0.3 s1= 0.114270+0.3 s2= 0.418750-0.2 s3= 0.999560-0.2
STRAIN x=-0.427350-0.1 y= 0.496730-0.1 z= 0. xy= 0.18680-0.05 eb= 0.489830-0.10eb= 0.999830-0.03 ct= -0.40380-0.3 1
3 4 STRESS x= 0.164620-0.2 y= 0.114270+0.5 z= 0.570230+0.2 xy= 0.177660-0.2 s1= 0.114270+0.3 s2= 0.164670-0.2 s3= 0.989580+0.2
STRAIN x=-0.427280-0.1 y= 0.496730-0.1 z= 0. xy= 0.327670-0.05 eb= 0.490000-0.10eb= 0.100000-0.02 ct= -0.890800-0.3 1

```

NODE	X-DISPLACEMENT	Y-DISPLACEMENT	Z-DISPLACEMENT	X-COORDINATE	Y-COORDINATE	Z-COORDINATE	X-NODAL FORCE	Y-NODAL FORCE	Z-NODAL FORCE
1	-0.1396474-0.18	0.2908728-0.04	0.1964474-0.18	0.6200878-0.04	0.6200878-0.04	0.6200878-0.04	0.26866810-0.0	0.369249-0.02	0.14597280+0.3
2	-0.42673010-0.01	0.2908763-0.00	0.94632619+0.00	0.620208763-0.01	0.620208763-0.01	0.620208763-0.01	-0.40638309-0.14	-0.54931019+0.0	-0.34931019+0.2
3	-0.873420169-0.1	0.2908732-0.01	0.196226169+0.01	0.620208732-0.01	0.620208732-0.01	0.620208732-0.01	-0.10392880-0.3	-0.18876610-0.1	-0.18876610-0.1
4	-0.3597786-0.18	0.2908724-0.00	0.222416000...	0.521241600...	0.521241600...	0.521241600...	-0.521241600...	-0.49745450-0.14	-0.2513750-0.13
5	-0.67346012-0.18	0.2908724-0.00	0.222416050+0.00	0.521241605+0.01	0.521241605+0.01	0.521241605+0.01	-0.521241605+0.01	-0.49745450-0.14	-0.2513750-0.13
6	-0.6947055-0.19	0.194810100	-0.6947055-0.19	0.4939489-0.01	0.4939489-0.01	0.4939489-0.01	-0.7035150-0.13	-0.7035150-0.13	-0.7035150-0.13
7	-0.4667368-0.19	0.194810100	-0.6947055-0.19	0.4939489-0.01	0.4939489-0.01	0.4939489-0.01	-0.10235810-0.1	-0.2913380-0.1	-0.133670-0.13
8	-0.8735938-0.01	0.194931120+0.00	0.194931120+0.00	0.19393110+0.01	0.19393110+0.01	0.19393110+0.01	-0.13057280-0.13	-0.45882360-0.1	-0.45882360-0.1
9	-0.8382384-0.18	0.194771011+0.00	-0.1926267-0.18	0.345477101+0.01	0.345477101+0.01	0.345477101+0.01	-0.28403620-0.2	-0.4810920-0.15	-0.3578520-0.13
10	-0.8373208-0.01	0.19455020+0.00	-0.1926267-0.01	0.34545020+0.01	0.34545020+0.01	0.34545020+0.01	-0.4810920-0.15	-0.4810920-0.15	-0.4810920-0.15
11	-0.4803208-0.18	0.949803750-0.01	-0.4803208-0.18	0.209980100...	0.209980100...	0.209980100...	-0.16195010-0.02	-0.89105610-0.1	-0.33137610-0.13
12	-0.4570298-0.01	0.949803750-0.01	-0.4803208-0.18	0.209980100...	0.209980100...	0.209980100...	-0.16195010-0.02	-0.89105610-0.1	-0.33137610-0.13
13	-0.8385112-0.01	0.949803750-0.01	-0.4803208-0.18	0.209980100...	0.209980100...	0.209980100...	-0.18200610-0.1	-0.13943950-0.13	-0.13943950-0.13
14	-0.117761280-0.17	0.476801310-0.01	-0.17761180-0.17	0.176848010+0.01	0.176848010+0.01	0.176848010+0.01	-0.10440410-0.2	-0.8246320-0.14	-0.8246320-0.14
15	-0.1239847-0.01	0.476801310-0.01	-0.17761180-0.17	0.176848010+0.01	0.176848010+0.01	0.176848010+0.01	-0.24165370-0.15	-0.48880100-0.15	-0.48880100-0.15
16	-0.1239350-0.17	0.176704080-0.13	-0.176704080-0.13	0.17395400-0.13	0.17395400-0.13	0.17395400-0.13	-0.870363620-0.15	-0.14969730+0.0	-0.14969730+0.0
17	-0.436864720-0.01	0.231686479-0.15	-0.6651350+0.00	0.531686479-0.13	0.531686479-0.13	0.531686479-0.13	-0.10135150-0.14	-0.36407230+0.2	-0.10135150-0.14
18	-0.873893547-0.01	0.172904600-0.13	0.191251017-0.01	0.171500660-0.13	0.171500660-0.13	0.171500660-0.13	-0.10135150-0.14	-0.36407230+0.2	-0.10135150-0.14
1 1 STRESS x= 0.11000-0.2 y= 0.118310+0.5 z= 0.57180-0.02 xy= 0.501180-0.02 s1= 0.118310+0.5 s2= 0.108800-0.02 s3= 0.102460-0.03 STRAIN x=-0.7517140-0.1 y= 0.9246470-0.1 z= 0. xy= 0.923050-0.01 eb= 0.925140-0.10eb= 0.1098-0.01 ct= 0.185370-0.1 0 1 2 STRESS x= 0.576390-0.1 y= 0.118570+0.5 z= 0.592330+0.02 xy= -0.573210-0.01 s1= 0.118570+0.5 s2= 0.576120-0.01 s3= 0.102640+0.03 STRAIN x=-0.760240-0.1 y= 0.928360-0.1 z= 0. xy= -0.108220-0.04 eb= 0.927880-0.10eb= 0.0108-0.01 ct= 0.277110-0.1 0 1 3 STRESS x= 0.11000-0.2 y= 0.118310+0.5 z= 0.57180-0.02 xy= 0.501180-0.02 s1= 0.118310+0.5 s2= 0.108800-0.02 s3= 0.102460-0.03 STRAIN x=-0.7517140-0.1 y= 0.9246470-0.1 z= 0. xy= 0.923050-0.01 eb= 0.925140-0.10eb= 0.1098-0.01 ct= 0.185370-0.1 0 1 4 STRESS x= 0.227140-0.0 y= 0.118660+0.5 z= 0.591770-0.02 xy= 0.591770-0.01 s1= 0.118660+0.5 s2= -0.227210+0.00 s3= 0.102960+0.03 STRAIN x=-0.765560-0.1 y= 0.936420-0.1 z= 0. xy= -0.108220-0.04 eb= 0.933390-0.10eb= 0.152930-0.03 ct= 0.432880-0.1 1 2 1 STRESS x= 0.118390+0.5 y= 0.118510+0.5 z= 0.591630+0.02 xy= 0.118510+0.5 s1= 0.118560-0.01 s2= -0.118590+0.00 s3= 0.107730-0.02 STRAIN x=-0.7691740-0.1 y= 0.941260-0.1 z= 0. xy= -0.814820-0.05 eb= 0.937180-0.10eb= 0.165230-0.03 ct= 0.6827790-0.1 1									

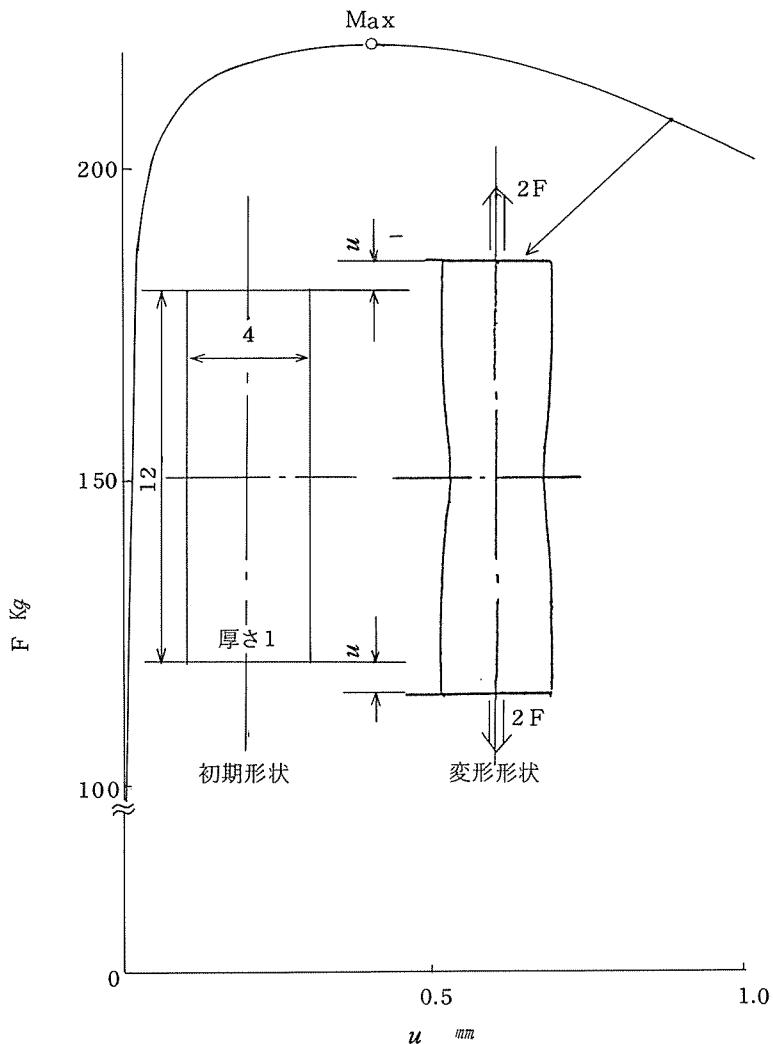


図3. 板の単軸引張計算結果

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  $\sigma_x$  ,  $\sigma_y$  ,  $\sigma_z$  ,  $\tau_{xy}$  , 主応力  $\sigma_1$  ,  $\sigma_2$  , 相当応力  $\bar{\sigma}$  , 2行目にはGreenのひずみ  $\gamma_{xx}$  ,  $\gamma_{yy}$  ,  $\gamma_{zz}$  ,  $\gamma_{xy}$  , 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  $\theta$  , 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 R E S U L T 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R E S U L T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 $\sigma$ と対数ひずみ $\epsilon$ 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M A T C O Nの相当応力S S T ( L K, 5 \* K K ), 初期降伏応力Y S T , 硬化指数C O Nを与えて塑性接線係数H D ( L K, K K )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 ( L K, K K )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<sup>5)</sup>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います。

LIBSOURCE/APPLIC/EPLAN2D

また、データは

LIBSOURCE/APPLIC/EPLANDA

に入っています。