

vol.99-1

# Mech D & A News

Mechanical Design & Analysis Co.  
July 1999



奈良 浮見堂 八月

## 【特集】非線形構造解析の行方

— MARC ユーザ・サブルーチンの応用的使用法 —

**FEM** Consulting Services for Engineering Practice  
URI <http://www.mech-da.co.jp>



## 1. 非線形構造解析の行方

有限要素法による非線形構造解析ソフトの動向を概観したとき、これらは成熟期から普及期に入ったと考えられます。この間にABAQUSとMARCに代表される商用コードの果たした役割は極めて大きく、その完成度と開発コストのバランスから見て、これらを上回るソフトウェアが今後出現することを期待するのは困難と判断するのが妥当です。勿論、個々の機能で突出するプログラムがあることは当然ですが、実設計で直面する幅広い課題に対して現実的な水準で解を与え、かつポスト出力できるという強靱さの面で、これら2つのプログラムは他を凌駕しています。

70年代から80年代前半にかけては、同種のプログラムが林立し、その優劣が問われた時期がありました。しかし、例えば淘汰の進んだ乗用車の出来不出来を比較することが不毛であるのと同様に、高水準の汎用ソフトウェア同士の優劣を論ずることは意味がありません。使用方法が適切であれば、設計現場で遭遇する相当数の問題に対して、適正な水準で解が与えられることが大半であるからです。

より本質的な課題は、解析技術者の養成という一点に尽きます。しかるに最近の計算機の低価格化は、予算規模の縮小を招き、結果的に技術者全般に対する評価をおとしめるという側面を持っています。また雇用形態の変化は、長期的な視野に立った技術者教育に対する企業の意欲を減退させているのも事実です。

低練度の技術者に誤りのない解析を行わせ、ひいては社内での解析技術者の再生産を図るにはどうすべきか、あるいはアウトソーシングによって効率化を図ると同時に、ノウハウの脱落を防ぐにはどうすべきかという課題に真剣に取り組むべき時期が来た弊社を考えています。

この解析技術を育成する上で最も大きな課題は、製品設計、機械工学、FEMという3つの独立した知識分野を結合する橋を、いかにうまく渡すかという点にあります。当然、妙手はないので、弊社では小規模の例題を多数作るという方法を採用し、蓄積を図って参りました。その一端はニュースレターの形で御紹介もしておりますが、現在では例題は約1400を数えるに至っております。

今回のニュースレターではMARCのユーザ・サブルーチンを例にとってみました。MARCを実際の問題に適用できるよう、高度に運用するためには、ユーザ・サブルーチンの使用が不可欠です。このとき、ユーザ・サブルーチンをコールする方法、コールされるタイミング、引数の具体的な意味を正しく把握するには、簡単なチェックモデルによる試計算が重要な意味を持ちます。このような趣旨に基づき、弊社では以下に示すような内容を持つ例題集を作成しました。

尚、本書の内容は、今年6月の日本マーク株式会社殿ユーザ会で講演させていただいたものです<sup>(1)</sup>。皆様には、MARCマニュアルD編を補足する目的で本書の御利用を頂ければ幸いです。

## 2. 例題の構成

マニュアルD編の中から、使用頻度が高いと考えられる約50のサブルーチンを選択し、Table2-1に示します。

今回は、基礎編としてこの中から更に代表的なサブルーチン約30個を選び、これらの使用例を取りまとめました。チェックモデルとして簡単に利用できるように、扱う問題はごく単純なものとしました。この基礎編で取り上げたサブルーチンをTable2-1中に 印をつけて示しています。

ユーザ・サブルーチン FORCEM の場合を例にとり、実際に作成した内容を Table2-2 に示します。

Table 2-1 ユーザ・サブルーチン例題集の構成

サブルーチン名	機能
1. 荷重, 境界条件, 状態変数	
FORCEM	非等分布荷重の入力
FLUX	非等分布熱流束の入力
FORCDT	時間依存の荷重、変位、熱流束、温度の入力
FILM	非等分布熱伝達係数の入力
UFORMS	拘束条件の定義

サブルーチン名	機能
<u>1. 荷重, 境界条件, 状態変数</u>	
INITSV	状態変数の初期値の入力
NEWSV	新しい状態変数の入力
USINC	初期条件の入力
USDATA	初期データの入力
MOTION	2次元剛体壁の運動の定義
MOTION	3次元剛体壁の運動の定義
UFRIC	摩擦係数の定義
UHTCOE	自由境界面における熱伝達係数の定義
UHTCON	接触境界面における熱通過率の定義
<u>2. 異方性及び構成則</u>	
ANELAS	異方性弾性定数の定義
HOOKLW	異方性弾性定数の入力
ORIENT	異方性主軸の定義
ANEXP	異方性熱膨脹係数の入力
ANKOND	異方性熱伝導マトリックスの入力
CRPLAW	クリープ則の入力
WKSLP	加工硬化係数の定義
USPRNG	非線形バネ、ダッシュポット、弾性床剛性 <input/>
UMOONY	ムーニーリブリンの材料定数の定義
UENERG	ひずみエネルギー関数の入力
UOGDEN	オグデンの材料定数の定義
HYPELA	亜弾性材料定数の入力
UBEAM	非線形はりの剛性の定義
GAPU	接触要素の方向と距離の定義
UNEWTN	剛塑性流れ解析における粘性係数の入力
<u>3. 粘塑性</u>	
ZERO	降伏条件の定義
YIEL	相当降伏応力の定義
<u>4. 粘弾性</u>	
CRPVIS	一般化ケルビン材料の挙動
TRSFAC	熱レオロジー的に単純な材料のシフト関数の定義
<u>5. 幾何形状の定義</u>	
UFXORD	座標の作成あるいは修正
UFCONN	要素の作成あるいは修正
UACTIVE	要素の剛性の休止及び復活
UPNOD	剛塑性流れ解析における節点座標の更新
REBAR	リバーの位置、面積および方向の入力
UTRANS	局所座標系の定義
UTHICK	節点における板厚の定義
<u>6. 出力結果の制御</u>	
PLOTV	等高線プロットあるいは、ポスト出力の変数の定義
IMPD	節点変数の出力
ELEVAR	要素変数の出力
UBGINC	インクリメントの始まり
UEDINC	インクリメントの終わり
UBGITR	イテレーションの始め
UELOOP	要素のループの始め

Table 2-2 ユーザ・サブルーチン例題の作成例

Mechanical Design & Analysis Co.

**FORCEM**  
 非等分布荷重の設定

```

1  SUBROUTINE FORCEM(P,X1,NN,N)
2  IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
3  DIMENSION N(7)
4  C
5  C
6  C  *** INPUT
7  C  (1) ZENTYU
8  C  BL=100
9  C  (2) KEISU
10 C  A=2.0
11 C  *** END
12 C
13 C  *** INTERPOLATION
14 C  X=BL-X1
15 C
16 C  *** SURFACE
17 C  P=A*X
18 C
19 C  *** PRINT
```

### 1 . 概要

ユーザ・サブルーチン FORCEM は非等分布荷重を設定するためのものです。ここでは FORCEM を用いて、位置に依存し変化する非等分布荷重を設定する方法を示します。

### 4 . ユーザ・サブルーチンのコーディング

以下に今回作成したサブルーチンの内容を説明します。App. 2 にサブルーチン job1.f を添付していますので参照して下さい。

( 1 ) 1 ~ 3 行目は FORCEM のヘッダーカードです。ここに示された引数の中で X1, NN, N (1) はそれぞれ積分点の第 1 座標、積分点番号、要素番号であり、これらの値は、このサブルーチンがコールされるごとに毎回 MARC 本体から引き渡されてきます。また、P は分布荷重の大きさであり、この値は毎回 MARC 本体へ返されます。今回は要素番号の値 N(1) は 11 ~ 20 の間で変化します。また各要素について、分布表面力の積分点番号 NN が 1 から昇順で変化しながら FORCEM はコールされ、上記の変数が MARC 本体から引き渡されてきます。例えば N(1)=11, NN=1 のコールのタイミングでは X1=7.89 となっています。NN は応力計算のための積分点番号とは必ずしも一致しないので注意して下さい。

( 2 ) 7 ~ 10 行目で変数の入力を行っています。全長を B L、非等分布荷重の係数を A (  $p = A \times X$  ) とし、これらの変数に値を代入しています。

行

せる  
・サ  
この  
1 ×

をし

### 3 . 例題の概要

作成した例題の概要を例を挙げて以下に簡単に示します。

- 例 1 FORCEM : これは非等分布荷重を定義するためのユーザ・サブルーチンです。ここでは Fig.3-1 に示すように片持ちばりの問題において、自由端から固定端まで直線的に変化するような荷重を定義しています。
- 例 2 UTHICK : これは板厚を定義するためのユーザ・サブルーチンです。ここでは Fig.3-2 に示すように片持ちばりの問題において、自由端から固定端に向かって徐々に厚くなるような板厚を定義しています。ここでは先端に集中荷重がかかった場合に平等強さのはりとなるように設定しています。
- 例 3 WKSLP : これは加工硬化特性を定義するためのユーザ・サブルーチンです。ここでは加工硬化特性が Fig.3-3 の図中に示したようなべき乗則で表わせるものとして、この関係をユーザ・サブルーチン内で定義しています。Fig.3-3 のグラフは解析結果の荷重変位関係を示しています。
- 例 4 ANEXP : これは熱膨張係数を定義するためのユーザ・サブルーチンです。Fig.3-4 の図中に示したように熱膨張係数が温度に依存して直線的に変化するものとして、この関係をユーザ・サブルーチン内で定義しています。Fig.3-4 のグラフは解析結果の温度とひずみの関係を示しています。

### 4 . 応用例

MARC のような大型のプログラムでは、1 つのテーマを解析するのに複数の手法があることが決して少なくありません。このよう場合には、データの入力から最後のポスト処理まで、一連の手順を検討して最も適したアプローチの方法を選択することが必要です。ユーザ・サブルーチンの利用も例外ではありません。ここでは先に示した例題を発展的に利用して、やや複雑な問題を解析した例を紹介します。

Fig.4-1 にコンパクト試験片の代表的な例を示します。これを引き裂く方向に強制変位を与え、亀裂が進展する問題を解析します。この問題を以下に示す 3 つの手法により解析し、比較しました。この問題は、本来、破壊力学のテーマですが、こ

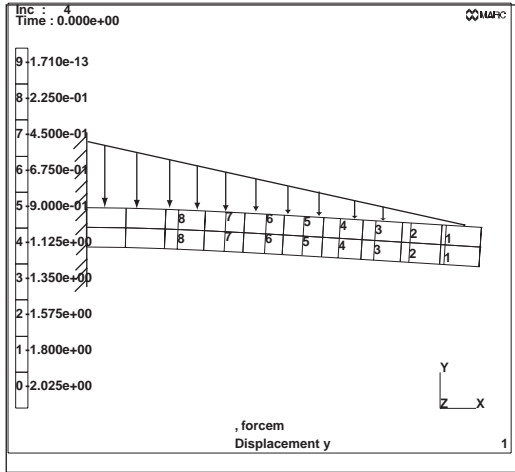


Fig.3-1 例1 FROCEM 非等分布荷重の定義

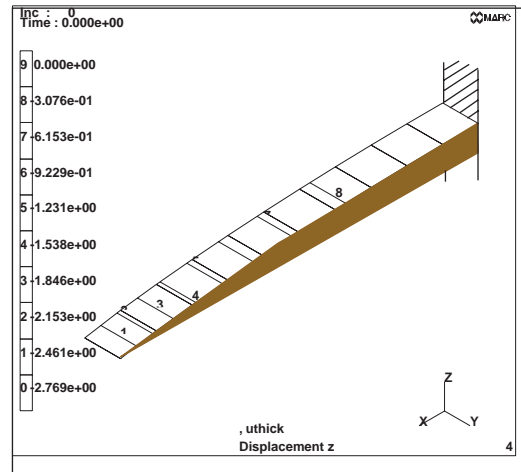


Fig.3-2 例2 UTHICK 板厚の定義

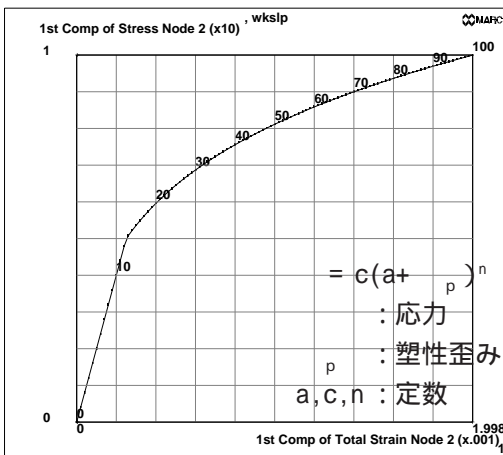


Fig.3-3 例3 WKSPL 加工硬化特性の定義

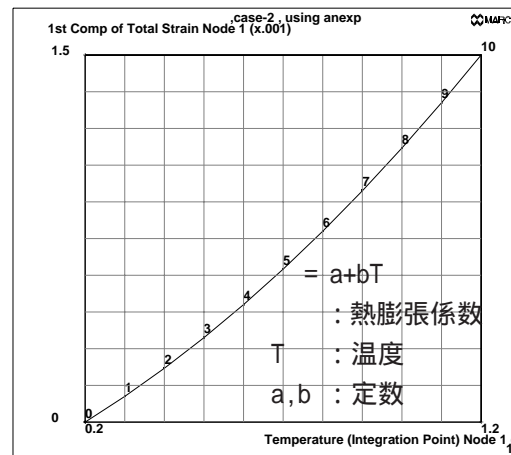


Fig.3-4 例4 ANEXP 熱膨張係数の定義

ここではごく乱暴に亀裂を発生させるという手法に注目した取り扱いとして御了解下さい。

- Case1 : UFORMSにより拘束条件を制御し、所定の塑性ひずみを超えると亀裂が発生するようにする。
- Case2 : USPRNGにより非線形バネを定義し、所定の荷重を超えると亀裂が発生するようにする。
- Case3 : UACTIVEにより要素そのものの休止を制御し、所定の塑性ひずみを超えると亀裂が発生するようにする。

### Case-1 UFORMS

まず最初にUFORMSを用いた例を示します。Fig.4-2に示すように円孔部にY方向の強制変位を与えます。このとき、モデルの左下端の節点を固定し、この節点と下辺の他の節点をそれぞれTYINGによって拘束することで下辺の節点を固定しておきます。ステップが進み、節点近傍の積分点における塑性ひずみの値が5%以上になったときにこの節点の拘束条件が外れるように設定することで亀裂の進展をモデル化します。

このような非線形な拘束条件をユーザ・サブルーチンUFORMSを用いて設定します。UFORMSには塑性ひずみの値がMARC本体から受け渡されませんので、ここではユーザ・サブルーチンELEVARを用いて取得することとし、この値をCOMMON変数を使用することでUFORMSに受け渡します。

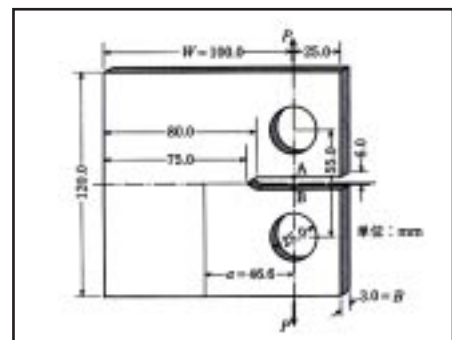


Fig.4-1 コンパクト試験片

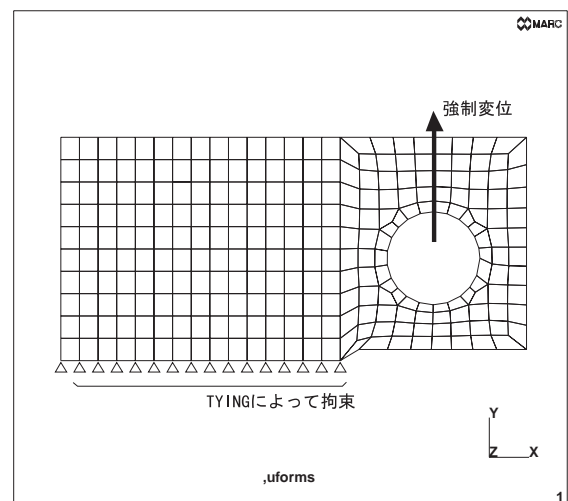


Fig. 4-2 Case-1 UFORMS



この方法は拘束条件を直接制御するので、考え方が簡単であるという利点があります。一方、データの作成、コーディングはやや煩雑になります。

### Case-2 USPRNG

次に、ユーザ・サブルーチン USPRNG を用いて非線形バネを定義することでモデル化する方法を示します。

Case-1 と同様に、まず左下端の節点を固定します。Fig.4-3 に示すようにこの点と下辺の他の節点との間に Y 方向のバネを設けます。これらのバネは Fig.4-4 に示すような荷重と変位の関係を持つものとします。すなわち、バネが耐え得る最大荷重を定め、荷重がこれを越えた領域ではバネの力が 0 に落ちるように設定します。今回は、Case-1 の解析結果から亀裂の発生するときの Y 方向の応力値がわかっているので、この値に節点の受持ち面積を乗じた値を最大荷重として採用しました。このような非線形バネを USPRNG で定義します。

この方法はサブルーチンのコーディングが比較的容易であるという利点がありますが、荷重制御の解析であるので、応力やひずみとの相関をとるのが難しいという欠点があります。しかし破断荷重が実験的に与えられているような場合には、非常に有効な手段となるでしょう。

### Case-3 UACTIVE

次に、ユーザ・サブルーチン UACTIVE を用いて要素を休止させることでモデル化する方法を示します。

Fig.4-5 に示すように、亀裂が進展する部分に要素を追加します。これらの各要素内の 4 つの積分点の塑性ひずみの値の平均値が 5 % 以上になったときに、この要素を休止させるように UACTIVE を用いて設定します。ここでは塑性ひずみの値は ELMVAR を用いて得ることとします。同様の例題が日本マーク株式会社殿ニュースレター<sup>(3)</sup>の中にもあるので御参照下さい。

この方法はコーディング、考え方ともに単純であるという利点がありますが、余分な要素を設けなければなりません。また DEACTIVATE は特殊なオプションであるので、他のオプションとの共存性をチェックして、解析の本質に悪影響を与えないことを予めチェックする必要があると考えられます。

Case-1 を例にとり、亀裂の進展の様子を Fig.4-6 に示します。これらの図は見やすいようにフルモデルにしています。Fig.4-7 に Case-1 ~ 3 のそれぞれについて載荷点での荷重と変位の関係を示します。Case-3 の結果は、他のケースと比べて亀裂の判定が異なるので荷重 - 変位関係は若干差異を示しますが、全体的な傾向としては概ね一致していることがわかります。

謝辞

サブルーチンの使用方法に関して、日本マーク株式会社技術部殿の支援を頂きました。この場を借りまして厚く御礼申し上げます。

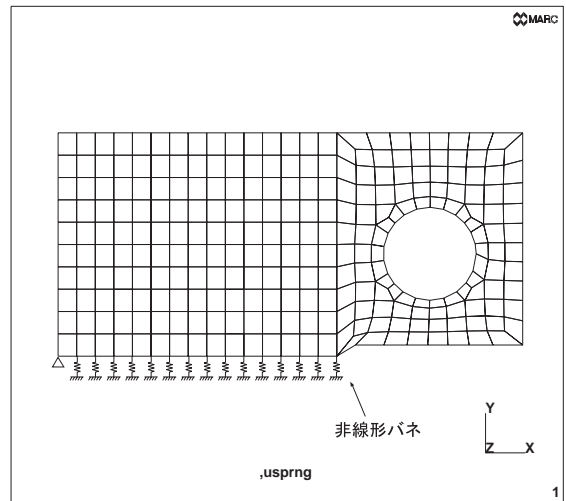


Fig. 4-3 Case-2 USPRNG

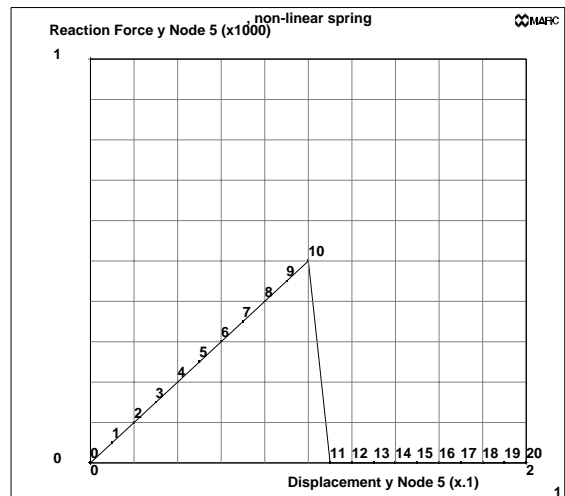


Fig. 4-4 非線形バネの特性

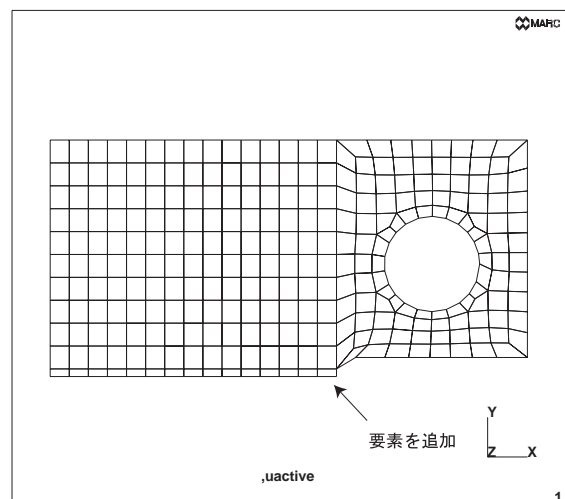
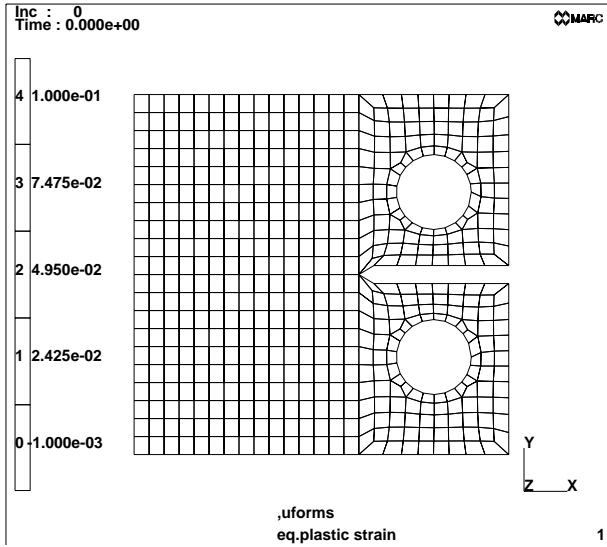
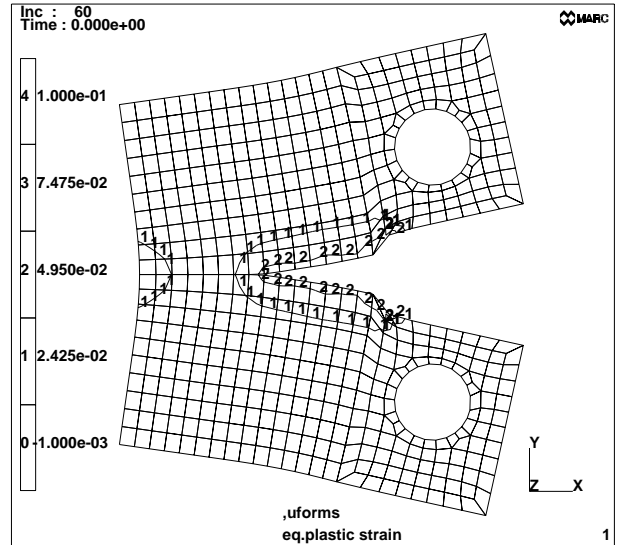


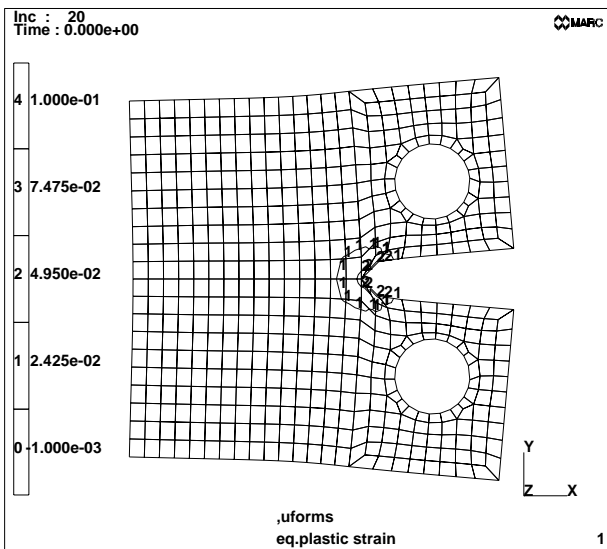
Fig. 4-5 Case-3 UACTIVE



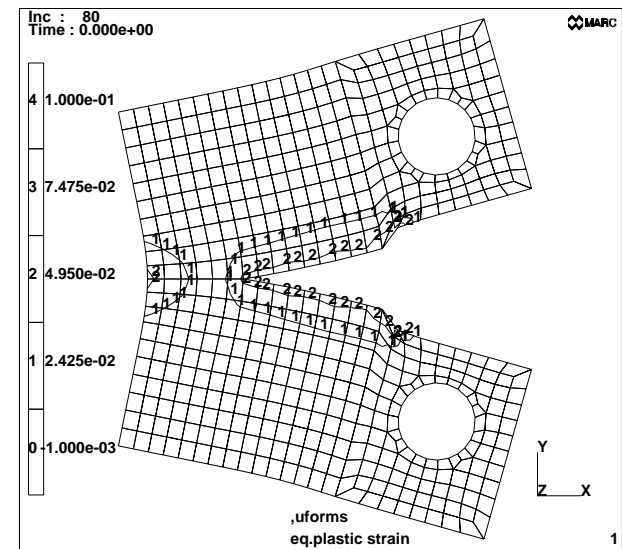
(a)



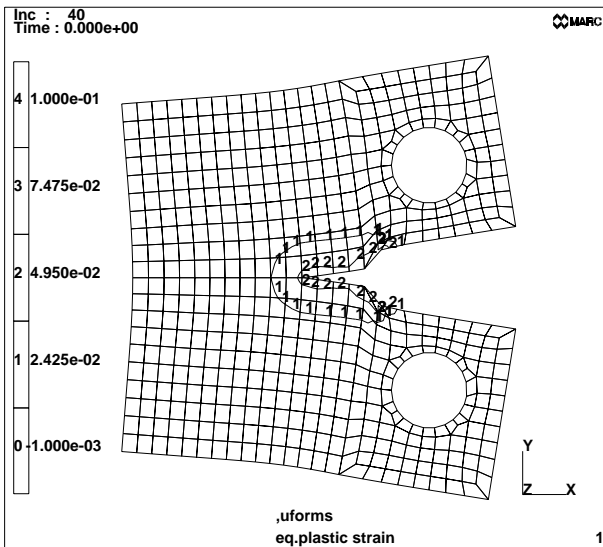
(d)



(b)



(e)



(c)

Fig. 4-6 亀裂の進展 (Case-1)

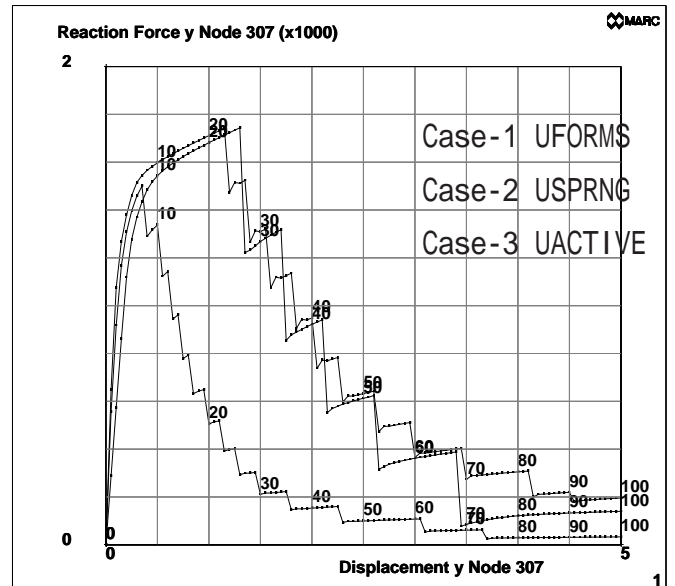


Fig. 4-7 载荷点の荷重 - 変位関係

参考文献

- (1) MARC ユーザ・サブルーチンの応用的使用法, 第 19 回 MARC ユーザーズ・ミーティング事例集, 株式会社メカニカル・デザイン・アンド・アナリシス, 1999.
- (2) MARC Volume D: User Subroutines and Special Routines K7, 日本マーク株式会社, 1997.
- (3) MARC News Letter 1998 Vol.3, 日本マーク株式会社, 1998.

表紙: 奈良 浮見堂, 田中眞知郎, 世界文化フォト

## Mech D &amp; A News 解析データ申込書

ふりがな お名前		
貴社名・御所属		
御住所	〒	
TEL・FAX	TEL	FAX
フロッピーディスクの種別 (をつけて下さい。)	・SUN フォーマット	・DOS/V
通信欄	注：納品書兼請求書は弊社様式で商品と共に送付致します。 代金の振込手数料はお客様の負担とさせていただきます。	
	・不要(資料のみ)	

御希望の項目に○をつけ、金額を記入して下さい。尚、( )内の価格はフロッピーディスクを含まない資料だけの金額です。・@・@

最新刊		
	1 .MARC ユーザ・サブルーチンの応用的使用法 (vol.99-1), テキスト約 300 頁	¥ 10,000 ( ¥ 8,000 )
	2 .初めての非線形構造解析 (vol.99-2), テキスト約 100 頁	¥ 10,000 ( ¥ 8,000 )
1	<b>自動振動の解析</b> (vol. 95-1.1) <small>以下既刊</small>	ブレーキを例にとり、クーロン摩擦による自動振動の発生と対策を、速度依存の外力を定義することによって解析しました。
2	<b>接触による応力集中</b> (vol. 95-1.2)	曲面同士の接触による応力集中 (Hertz's 応力) の理論解を、接触解析の諸機能 (Gap, CONTACT) を用いて扱った例題です。
3	<b>凝固プロセスの解析</b> (vol. 95-2.1)	氷の生成を例にとり、相変化を伴う熱伝導と熱応力を解析した例題です。潜熱と凝固体積変化のモデル化がポイントです。
4	<b>大ひずみ粘弾性球の衝突解析</b> (vol. 95-2.2)	粘弾性球の落下衝突を解析した例題です。衝突速度によって反跳の挙動に差が生ずることを明らかにしました。
5	<b>非ニュートン流体の解析</b> (vol. 95-3.1)	円管流れの理論解を対象として、粘性流体の速度場を求めました。また、液滴の落下問題を応用例として解析した例題です。
6	<b>粘弾性解析の基礎モデル</b> (vol. 95-3.2)	MaxwellとVoigtモデルによる粘弾性解析の基礎データです。微小ひずみだけでなく、大ひずみの問題を含みます。
7	<b>熱衝撃応力の厳密解</b> (vol. 95-4.1, vol. 95-4.2)	円盤の表面を急冷する問題を例にとり、非正常熱伝導と熱衝撃応力を求めました。理論解と一致する結果が得られました。
8	<b>ボルト締結の健全性評価</b> (vol. 96-1)	ボルトの締付力と外力のバランスをモデル化し、締結後の浮上りやへたりを扱った例題です。理論解と一致しました。
9	<b>ロール圧延の解析</b> (vol. 96-2)	MARC Contact機能における摩擦解析の精度を向上させ、ロール接触面での速度および圧力の分布を求めた例題です。理論解と一致しました。
10	<b>表面張力の解析</b> (vol. 96-3.1)	水がストロ - ンの中を表面張力によって上昇する問題を解析し、理論解と一致することを確認しました。
11	<b>浮遊体の固有振動解析</b> (vol. 96-3.2)	飛行体のように境界条件を持たない条件下での固有値解析の手法を示す例題です。
12	<b>衝撃応答の解析</b> (vol. 96-4)	質点の玉突き衝突、落下による衝撃、及び梁の衝撃曲げの理論解と整合させた例題です。
13	<b>接触による応力の集中と減衰</b> (vol. 97-1)	無限の領域を表現するために、半無限要素を適用した例題です。ゴムのJIS硬さ試験を取上げて検討しました。
14	<b>MARC ユーザ・サブルーチン支援キット</b> (vol. 97-2)	MARCプログラム本体から、COMMON変数を用いて種々のデータを取出すサブルーチンをキットとしてまとめました。
15	<b>弾塑性材料試験支援キット</b> (vol. 97-3)	材料の引張試験データを、べき乗則により曲線近似するプログラムをキット化しました。歪速度依存性への応用を含みます。
16	<b>流体連成振動解析</b> (vol. 97-4)	流体によって物体に作用する力の考え方を取りまとめました。付加質量効果を考慮した固有値解析の例題を含みます。
17	<b>MARC K7による流体解析</b> (vol. 98-1)	厳密解のある定常・非定常流れ、混合距離理論による乱流を扱った例題です。いずれも、理論解・実測値に一致します。
18	<b>2次元の線形補間・応力の座標変換</b> (vol. 98-2)	FEMの支援ツールとして、2次元平面内のベクトルによる線形補間、また、2次元・3次元の座標変換を扱った例題です。
19	<b>陰解法と陽解法による動的応答解析</b> (vol. 98-3)	MARCとLS-DYNAを例にとり、理論解や実測値のある例題を解析し、検証しました。
20	<b>I-DEASによる非線形構造解析の支援</b> (vol. 98-4)	I-DEASを用いて非線形構造解析の前処理に必要な手順を概説したものです。(テキスト全約 200 頁)