

# 線形・非線形構造解析

## —PAM-STAMP編（プレス成形加工シミュレーション）—

北陸ポリテクカレッジ 機械システム系 増川 一郎  
 (北陸職業能力開発大学校)

### 1. はじめに

PAM-STAMPは、板材成形シミュレーション専用の弾塑性有限要素法解析プログラムである。計算機によりプレス成形過程をシミュレーションすることにより、従来行われてきた試作実験におけるトライアウトを、シミュレーションによる計算機実験に置き換えることにより、コストと時間を削減することを目的とする。

板材成形過程のシミュレーションにおいては、幾何学的非線形、材料非線形、接触非線形などの、非線形現象が生じるほか、運動の記述、材料モデルの扱い、境界値問題などのさまざまな乗り越えねばならない難問がある。

本報では、PAM-STAMPを使用する際のプレス成形加工シミュレーションの事例を紹介するとともに、各種非線形問題の取り扱い、解析機能、解析条件の設定ポイント、今後の課題等について報告する。

### 2. 非線形計算における各種解析法の比較

弾塑性有限要素法解析で、プレス成形過程をたどる場合、工具を少しずつ進め変形を積み重ねることにより最終的な成形形状に達する。このとき、時間増分ステップを反復法により解く陰解法と、1回の線形計算で求める陽解法に分けられる。また、近似的解法が応力の釣り合い方程式を解く静的な解法と、加速度の項が支配的な運動方程式を解く動的解法に分類される。

現存する弾塑性有限要素法プログラムは、静的陰解法、静的陽解法、動的陽解法の3つに分けられる。表1に各解法の特徴をまとめる。

### 3. PAM-STAMPの特徴

PAM-STAMPは、動的陽解法有限要素法プログラムである。加速度が支配的な運動方程式（変位に

表1 各解法の比較

比較項目	静的陰解法	静的陽解法	動的陽解法
基礎式	釣り合い方程式	釣り合い方程式	運動方程式
離散化表現	剛性方程式(非線形)	剛性方程式(線形)	差分式
求解法	反復処理	1回の線形計算	ベクトルの代入計算
増分サイズ	大きい	小さい(Rmin法)	極めて小さい(クーラン条件)
接触処理	極めて困難	困難	容易：ペナルティ法
課題	収束しないことがある (特に接触処理)	Rminが極めて小さくなる可能性がある	スプリングバックの解析が困難

表2 PAM-STAMPのプログラム特性

GEOMETRY (モデル形状)	3D (3次元)
DISCRETIZATION (離散化)	FINITE ELEMENTS (有限要素)
FORMULATION (定式化)	UPDATED LAGRANGIAN (更新 ラグランジェ形式)
ANALYSYS (解析)	DYNAMIC (動的)
SOLUTION SCHEME (解法)	EXPLICIT (陽解法)
FINITE ELEMENT (有限要素)	MINDLIN SHELL (SHELL要素 [被加工材]) UNDEFORMABLE SHELL (不変形SHELL要素 [工具]) ELASTIC-PLASTIC BRICKS (弾塑性SORID要素)
KINEMATICS (運動学的)	LARGE DISPLACEMENTS (大変形) LARGE ROTATIONS (大回転)
MATERIAL MODELS (材料モデル)	ELASTO-PLASTIC (弾塑性) ISOTROPIC STRAIN HARDENING (等方性ひずみ硬化) ANISOTROPIC YIELD CRITERIA (異方性降伏条件) STRAIN RATE SENSITIVITY (ひずみ速度依存性)
TRIBOLOGY (潤滑)	SLIDING/VOIDS INTERFACE (接触・剥離・摩擦を伴う滑り) Coulomb FRICTION (クーロン摩擦)

関する2階の常微分方程式)を中央差分法で近似し、質量マトリクスを計算することにより近似問題を解く。

静的な解法と比べて、剛性方程式を解く必要がないため、1増分ステップ当たりの計算時間ははるかに短くて済む。しかし、解法が安定であるためには、クーラン条件を満足しなければならない。このため時間増分サイズはきわめて小さくなり、増分ステップ数は莫大なものとなる。

一方、時間増分サイズが小さいことは、接触処理においては望ましい、実際の成形過程では、板と工具との接触状態が刻々と変化するので、増分ステップ間で応力と反力の変化が少なくなり、このためペナルティ法により拘束の処理が適用でき、解を安定して得られる。表2にPAM-STAMPのプログラム特性を示す。

#### 4. 使用機器

最近のコンピュータ環境は、「ダウンサイジング」をキーワードに、パソコンが主流となっており、OSの方もまた、圧倒的なシェアをマイクロソフト社のMS-WINDOWSが占めている。しかし、非線形構造解析などの大規模な計算を実行するときは、仮想メモリの取り扱いや、解析計算時の安定性・信頼性の面で、ワークステーション (UNIX) の使用

が好まれる。表3にシミュレーションの各作業に対するソフトウェア、およびハードウェアを示す。

表3 解析実行環境

<p><b>ハードウェア</b></p> <p>本体：HP9000/C200 SPEC int95：14.3 SPEC fp95：21.4 メモリ：128MB ハードディスク：内蔵SCSI9GB 外付SCSI4GB モニタ：21インチ グラフィクス：OpenGL</p> <p><b>ソフトウェア</b></p> <p>モデラー：I-DEAS ms6 プリプロセッサ：PAM-GENERIS Ver98 ソルバー：PAM-STAMP Ver98 ポストプロセッサ：PAM-VIEW Ver98</p>
--

#### 5. 解析問題

従来、有限要素法による構造解析といえば、線形静解析有限要素法ソフトウェアを用いた、応力やひずみの状態を計算によって求めることを意味していた。しかし、最近の構造解析は、塑性加工や自動車

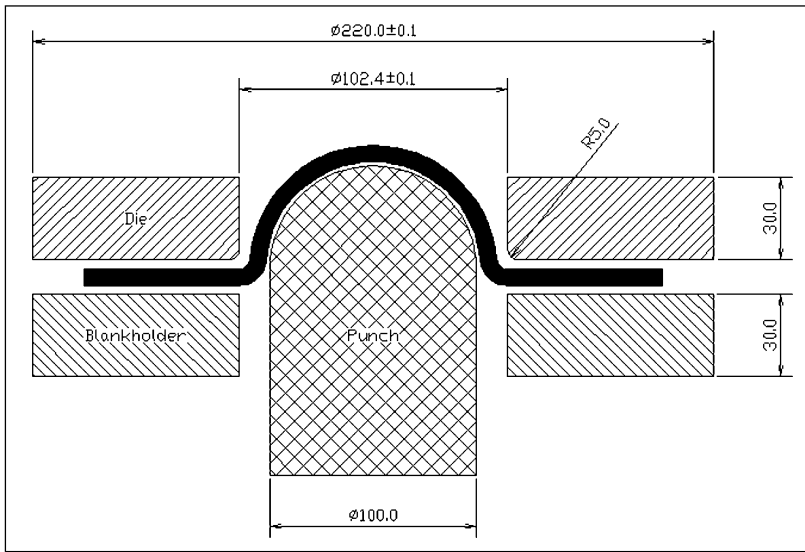


図1 工具形状

表4 工具寸法・工具材質・加工条件

<b>〈工具寸法〉</b>	
パンチ直径：	100.0mm ± 0.1mm
ダイ内径：	102.4mm ± 0.1mm
ダイ外径：	220.0mm ± 0.1mm
ダイ肩半径：	5.0mm
<b>〈工具材質〉</b>	
硬さ：	HRC 60
表面荒さ：	Ra=0.5 μm
<b>〈加工条件〉</b>	
パンチ速度：	25mm/sec
ブランクホルダー圧：	10kN
摩擦係数：	0.05
質量密度：	$7.8 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
絞り深さ：	75mm

の衝突のように、高度な非線形問題にも広く用いられるようになってきた。

次に、PAM-STAMPを使用して、球筒カップ容器の成形加工シミュレーションを行うに当たり、設定した工具形状・加工条件を図1および表4に、供試材のデータを表5に示す。

## 6. 解析の詳細

### 6.1 解析の流れ

解析の作業では、4種類のソフトウェアを駆使し作業を行う。図2に、解析作業の流れを示す。

表5 供試材の材料物性値

鋼種	SPCC
直径 [mm]	200.0
板厚 [mm]	1.0
E：ヤング率[GPa]	206
ν：ポアソン比	0.33
Ys：降状応力[MPa]	169
Ts：引張り強さ[MPa]	318
ρ：密度 [kg/mm <sup>3</sup> ]	$7.8 \times 10^{-6}$
[塑性曲線用パラメータ]	$k(\epsilon_0 + \epsilon p)^n$
k：加工硬化係数	0.59
ε <sub>0</sub> ：予ひずみ	0.0077
n：加工硬化指数	0.249
[異方性降状条件]	
r <sub>0°</sub> ：塑性ひずみ比	1.88
r <sub>45°</sub> ：	0.79
r <sub>90°</sub> ：	2.43
ひずみ速度依存性	なし

[モデラー]：I-DEAS

- ・工具形状，素材形状モデルの作成
- ・有限要素メッシュの生成
- ・ユニバーサルファイル出力



[プリプロセッサー]：PAM-GENERIS

- ・有限要素法モデルのチェック
- ・工具／素材の配置
- ・材料特性値の定義
- ・境界条件の設定
- ・接触の定義
- ・アダプティブメッシュの定義
- ・計算条件の設定



[ソルバー]：PAM-STAMP

- ・変位，歪み，応力等の計算



[ポストプロセッサー]：PAM-VIEW

- ・変位，歪み，応力等のコンター表示
- ・変形のアニメーション表示

図2 解析の流れ

### 6.2 工具形状と素材形状モデルの作成

工具と素材の形状はCADを使用して作成する。モデラーはI-DEASを使用し、工具および素材をサーフェス（面形状データ）として作成する。その後、要素長5 mmの四角形1次シェル要素で分割を行う。このとき、解析対象形状を有限要素で離散化し、

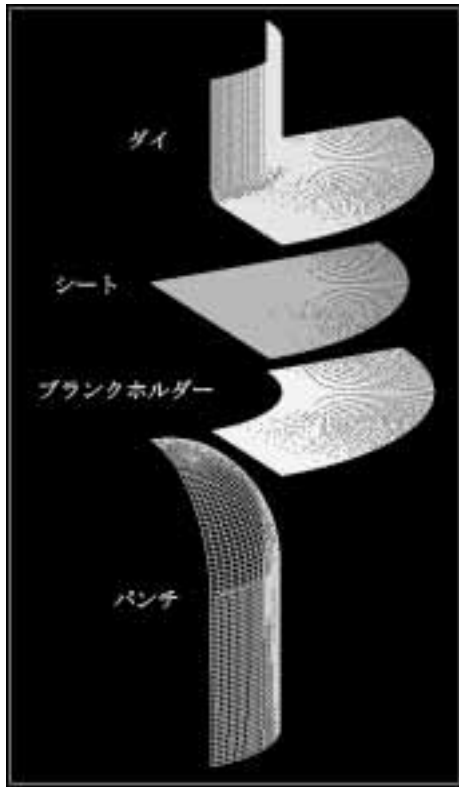


図3 有限要素法モデル

有限要素を作成するが、個々の要素形状、サイズおよび内挿関数の次数等が計算結果の精度に大きな影響を与えることを十分に意識しなければならない。

その後、作成した節点と要素データをI-DEASの持っている外部ファイル形式であるユニバーサルファイルとしてデータを書き出す。ユニバーサルファイル形式はアスキーテキストファイル形式であり、他の多くの有限要素法プログラムでサポートされ読み込むことが可能となっている。

図3に、工具と素材を有限要素分割した形状を示す。(1/4モデル)

### 6.3 有限要素法モデルのチェック

有限要素法解析では、生成されたメッシュに、不要な節点や要素があると解析が失敗に終わることがある。この不要な節点は、フリーノードと呼ばれ、有限要素法モデルのなかには存在してはいけなく、また、節点と要素は、同じ位置に重なり合う、重複が存在していてもいけない。

要素は、属する節点のつながりで定義される、こ

れにより、要素の表面と裏面が存在する。通常、要素の表裏は、その法線方向で定義され、法線の指す方向が表面と見なされる。パムスタンプを使用した有限要素法解析では、工具として定義された要素の法線方向は、素材の存在する方向を指すように、定義されなくてはならない。

### 6.4 工具・素材の配置

実際のプレス加工では、ダイがプレスベッドに固定され、パンチがプレススライドに取り付けられて、スライドが上死点から下死点へ上下運動することにより、プレス加工が行われる。

有限要素法解析では、このプレス成形課程のすべてを忠実に再現するのではなく、解析の開始する位置は、まさにパンチが材料に接触し始める直前の、材料に力の加わり始める位置をスタートとする。そのため、有限要素法解析では、工具である要素と素材である要素をそのスタート位置に配置しておく必要がある。

ただし、この要素の配置に関して、有限要素法解析特有の注意事項がある。それは、シェル要素は板厚を示す要素特性値を持ち、配置に関しては、この板厚の分を考慮する必要がある。

### 6.5 材料物性値の定義

#### (1) 工具材の材料物性値定義

一般的に、有限要素法解析では工具を剛体と定義し解析時に剛体は変形しないものとする。PAM-STAMPでは接触の反力を求めるため質量密度、ヤング率、ポアソン比、板厚等の材料物性値を必要とする。工具となるパンチ、ダイ、ブランクホルダーを構成する要素はすべてこれに従う。

#### (2) 素材の材料物性値定義

素材の材料特性値は、板の変形抵抗・変形挙動に大きな影響を与えるため、誤りのないように入力しなければならない。板成形シミュレーションにおいては、特に塑性域での材料物性値が重要なパラメータとなる。相当応力と相当塑性ひずみの関係を表す加工硬化曲線を、引張り試験より得られる

Kropkowsky LOWの3つの定数である、加工硬化係数、予ひずみ、加工硬化指数を入力し応力とひずみの関係を定義する。

さらに、材料の異方性を考慮するため、材料の圧延方向を設定する。圧延方向に対し、 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 方向のそれぞれの $r$ 値を入力して、直交異方性材料を定義する。

また、プレス加工速度の違いによる、加工硬化の影響を考慮するひずみ速度依存性の設定も可能であるが、今回の解析事例では特に加工速度の影響を考慮しないことにする。

表5に、供試材の材料物性値を示す。

## 6.6 境界条件の設定

### (1) 対称境界条件の設定

モデルの形状が対称な場合には、解析コストを抑える目的のため、モデル全体を解析範囲とするのではなく、計算の範囲をモデルの一部分だけとすることが可能である。これにより、モデルの総自由度を減らしながら、全体モデルの解析と同等の結果を得ることができる。そこで、今回の事例のモデルでは、全体の1/4の部分にだけに注目し解析範囲を定め、解析計算を実行することにする。このとき、特に注意すべき事柄があり、解析時に計算が失敗することがないように、1/4に分割した箇所に対し、対称境界条件を設定しなければならない必要があることである。分割された対称境界での節点の変位・回転を拘束することにより、変位速度および回転速度の自由度が拘束される。

シェル要素の1つの節点は6つ自由度を持つ、XYZ方向の移動(TX, TY, TZ)とXYZ軸回りの回転(RX, RY, RZ)である。この節点の自由度を拘束し、満足する計算ができるように節点の動きを制限しなければならない。

拘束条件の設定は、有限要素法解析の初心者にとっては、わかりづらい設定の1つであろう。これに関して補足説明すると、対称境界上にある節点は、その面内のみ変位・回転することが許される。解析するモデルが鏡で写したとき矛盾のない動きとなるように節点を拘束する必要がある。つまり、対称境

界面上にある節点群の自由度は、その面内でのみ変位、回転の拘束をフリーにすることができる。

### (2) 速度境界条件の設定

動的陽解法では、変形の履歴を記述する目的で時間の概念を導入し、物体の運動・変形は速度形で表される。パンチの動きは時間の関数で表され、時間増分ごとに変位が与えられる。パンチの加工速度とパンチストロークより、加工開始時から終了に至るまでの時間が計算され、速度で強制変位を与えてその運動方程式を演算する。そのため、この速度境界条件の設定が重要な項目となる。

### (3) 加圧条件の設定

プレス加工を始める前に、加工時における材料の跳ね上がりを防止する目的のため、ブランクホルダーにより材料を加圧・保持する。ブランクホルダーによる材料の板押さえ力は10kNとなっているが、解析モデルが1/4であるため、ブランクホルダーの圧力も1/4に設定しなければならない、0.25kNに設定する。

### (4) 変位境界条件の設定

工具が誤った動きにならないように、つまり、プレス加工方向以外へ動き出さないように、パンチ、ブランクホルダー、ダイに変位境界条件を設定しなければならない。

パンチを構成する要素の節点には、プレス加工方向以外の自由度を拘束しパンチが加工方向以外へ動作しないことを設定する。またダイを構成する要素の節点には、すべての変位と回転の自由度を拘束し、ダイは完全に固定されている状態に設定を行う。さらに、ブランクホルダーを構成する要素の節点には、加圧方向以外の節点の自由度を拘束した拘束条件を与える。

## 6.7 接触の定義

接触が予想されるモデルの面に対して、接触条件の設定を行う必要がある。工具と材料との接触力の導出には、ペナルティ法が使用され、接触の判定は、

Sliding Interface法が使用される。

接触の判定では、工具の接触を起こす面をmaster面、素材の接触を起こす面をslave面と設定する。master面に属する節点は、slave面に進入することができるが、slave面に属する節点は、master面に進入することができないものとする。slave面側の節点の進入を判定する範囲として、板厚の変化に応じて接触判定領域を変化させる、Update Thicknessを設定する。

また、接触力の算出にはペナルティ法によるペナルティ係数およびクーロン摩擦係数の設定が必要になる。

### 6.8 アダプティブメッシュの定義

加工が進むに伴い、材料の変形が大きい箇所では、要素の変形が著しく解析精度が問題となることがある。このため、変形の大きい箇所について自動的に要素を細分化し、効率よくかつ、高精度解析を実現するアダプティブメッシュ法の採用可能な場合がある。解析対象を空間に関して離散化したものがメッシュであるが、離散化誤差を見積り、メッシュを改善し、必要とする精度で結果を得ようとするのがアダプティブメッシュである。

アダプティブメッシュ法については、P法、H法、R法の3種類の方法があり、許容誤差を満たさないメッシュは、P法では、応力の集中している部分の要素を細分化せずに、該当要素の内挿関数の次数を上げ、H法は、応力の集中している部分の要素の細分化を行い、R法は、応力集中部へ要素の節点を移動させ、解析精度を向上させるものである。

今回の球頭カップ形状の絞り問題では、アダプティブH法の設定を行う。

### 6.9 計算条件の設定

ここでは、コンピュータ解析特有の条件の設定を行う。解析時の加工に費やす時間を入力し、解析結果を出力する頻度を設定する。また、出力される解析内容の選択を行う。

### 6.10 解析計算の実行

解析計算を行うプログラムをソルバーと呼ぶ、計算を実行させる前には、神様に祈るような気持ちになるのは私だけであろうか。上記のプリプロセッサでの設定に不備・不具合がある場合、計算の途中でプログラムがエラーを起こしてしまい解析がストップしてしまう。非線形解析では、線形静解析に比べて設定すべき項目が数多く、また、その内容もはるかに難しいものとなっている。

また、解析計算がエラーなく終了したからといって安心はできない。上記のプリプロセッサでの設定で誤りがある場合は、正確なプレス成形過程は再現されはしない。例えば、材料物性値の値を例にするならば、素材のヤング率の単位を間違えてしまったときなどは、実際のプレス成形とはかけ離れた変形を起こしてしまう。

### 6.11 結果の表示と評価

有限要素法解析の結果をいかに把握するかは重要なことである。計算機による処理が完了すると、グラフィック表示、グラフ表示、リスト表示の形式で出力結果を得ることができる。グラフィック表示機能としては、板厚、応力、ひずみ、接触圧力分布等のコンター図や変形状態のアニメーション表示ができ、またグラフ表示機能としては、接触反力や節点の位置、速度、加速度等の時刻歴グラフ、要素の応力、ひずみ、板厚の時刻歴表示ができる。

図4は、パンチストローク別の板の変形状態をシミュレーションしたものである。パンチストロークが13.47mmの位置では、パンチ球頭部により材料が張出されている。パンチストロークが44.08mmの位置では、変形が大きいダイ肩部に接触する要素が、アダプティブメッシュにより再分割が行われている。パンチストロークが62.45mmの位置では、材料の異方性による板厚増加の違いが発生し、圧延方向に対し45°方向の部分に耳が発生している。パンチストロークが75.00mmの位置では、板押え力の不足によりフランジ部にしわが発生している様子がシミュレートされている。

図5は、塑性ひずみをコンター表示したものであ

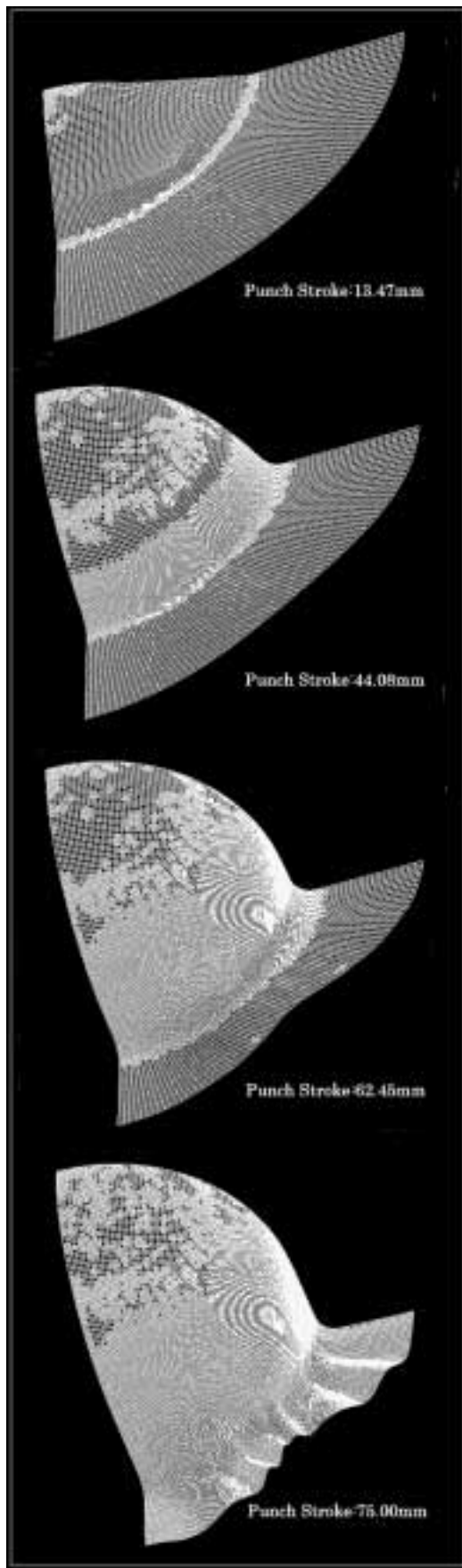


図4 パンチストローク別の変形状態

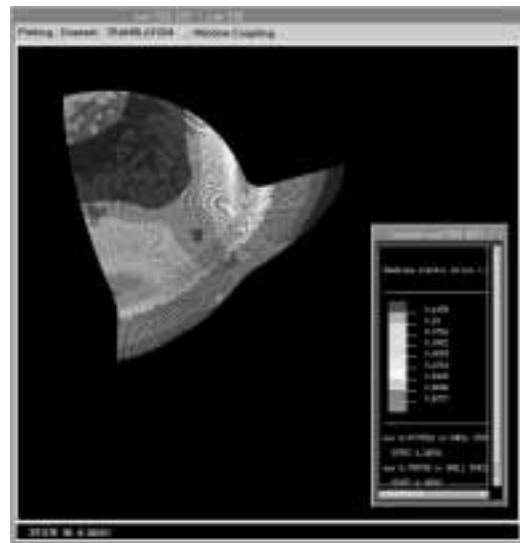


図5 塑性ひずみのコンター表示

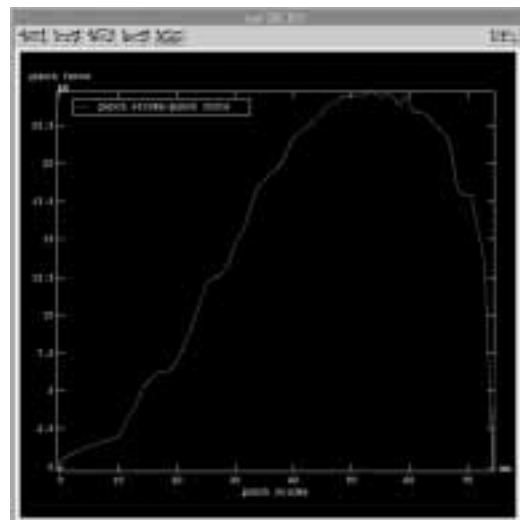


図6 パンチストロークと荷重の関係

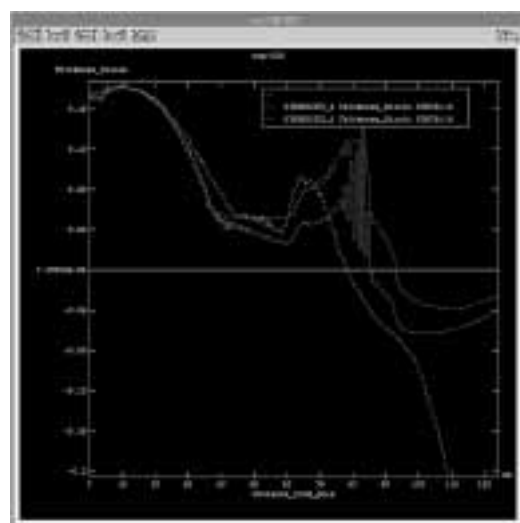


図7 圧延方向と板厚ひずみの関係

る。カラーバーの色の違いにより、板材の受けるひずみの大きさの違いが表示される。

図6は、パンチストロークと荷重の関係をグラフ表示したものである。有限要素法モデルを1/4としているので、荷重はこの4倍した値に直す必要がある。

図7は、圧延方向と板厚ひずみの関係をグラフ表示したものである。成形品形状を板の圧延方向に対し0°、45°、90°の方向に断面をカットした部分の、パンチストローク別の板厚方向ひずみをプロットした。

## 7. まとめ

最近の構造解析は、塑性加工や自動車の衝突のように、高度な非線形問題にも広く用いられるように

なってきた。正確な入力や専門知識はもちろんのこと、解析ソフトウェアやコンピュータを自在に扱える能力をも必要とする。

また、コンピュータを操作することにより、数値データを結果として得ることができるが、その時を作業の終了時点としてはいけない。むしろ、この時点が真の始まりともいえ、この得られた解析結果から、実成形、金型設計に有効な情報を、いかに多く読みとり、それを適用できるかが真の技術として求められている。そして、高度な構造解析を担当する人材の確保、教育が大きな課題となっている。

### 〈参考文献〉

- 1) 日本ESI(株)：『Pam-Stamp Training Guide』。
- 2) 富田佳宏：『弾塑性力学の基礎と応用』、森北出版株式会社。
- 3) 日本塑性加工学会：『非線形有限要素法』、コロナ社。

図書のご案内

好評発売中!

# ACCESS 2002

金属力学研究センター・  
職業能力開発院東京専門学校一貫

A5判/358ページ/定価2,200円(税別)

## 在職者訓練の理論と実際

—成人学習者の負的支援—

職業能力開発総合大学校 教授 戸田勝也

B5判/418ページ/定価3,200円(税別)

お申込み・お問い合わせは  
社団法人 雇用問題研究会

〒108-0012 東京都中央区日本橋通町1-6-11  
TEL#03-5295-0780 FAX#03-5295-0837  
URL#http://www.koyosero.or.jp