

# アルミニウム薄板回転打抜加工における変形解析

Analysis of the rotary machining process for the aluminum sheet

鈴木 茂和・福澤 康\*・永澤 茂\*・松本 英男\*・酒寄 勇\*\*

福島工業高等専門学校 機械工学科

\*長岡技術科学大学

\*\*江東彫刻

Shigekazu Suzuki, Yasushi FUKUZAWA\*, Shigeru NAGASAWA\*,

Hideo Matsumoto\* and Isamu SAKAYORI\*\*

Department of Mechanical Engineering, Fukushima National College of Technology

\*Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology

\*\*Koto Engraving Corporation

(2009年9月18日受理)

This paper describes the rotary machining process of the aluminum sheet. Rotary die cutting machining methods are widely used in the packaging or printing industry, for the paperboard, labels, laminated resin sheets, ductile metal film and etc. In this work, to clarify the cutting mechanism of the rotary cutting process using the cross cutter with pure aluminum sheet, the FEM simulation and the practical cutting experiments with the designed small size machine were carried out. From results of the FEA simulation and cutting experiments, deformation behavior of the aluminum sheet was discussed.

**Key words:** Cutting, Rotary machining, FEA, Aluminum sheet

## 1. 緒言

包装用板紙、パッケージ用紙器、絶縁シール等に用いられている打抜き加工は、複雑で多様な形状の型でも安価に精度良く提供することができるため、多くの分野において用いられている加工法である。この打抜き加工は切刃の動きの違いから、平盤打抜き加工と回転打抜き加工の2種類に分けることができる。

平盤打抜き加工は、木製もしくは鉄製の型に切刃と折り目をつける押罫刃をコンピュータで作成した抜型の指示に従って組み込み、それを面板の上に置かれた被加工物に対し、垂直に押し付けることによって所定の形状に加工する法である。

回転打抜き加工は、Fig. 1に示すように円柱の側面に切刃を機械加工により削りだしたカッターロールと平滑な表面を持つ剛性の高いアンビルロールを同時に回転させ、両ローラの中に被加工物を通すことによって所定の形状に加工する方法である。

平盤打抜き加工は、要求される加工形状に適した刃型の交換が容易であるが、構造上、面板と刃先が衝突するため刃型の寿命は短い<sup>1)</sup>。そのため平盤打抜き加

工は多種多様で小ロットな製品の生産に用いられている。回転打抜き加工は連続的かつ高速加工が可能なことからインラインに配置されることが多い。また、切刃の高さ調節を簡単に行うことができるため、シール、ラベル材等の半切り加工(上紙のみを切断する加工)にも適している。

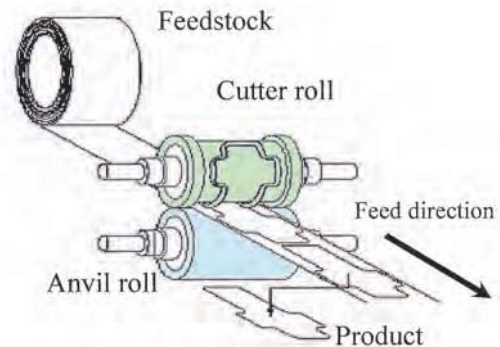


Fig. 1 Overview of rotary die cutting

本研究では回転打抜き加工における被加工物変形機構を明らかにすることを目的として、有限要素法により、切断過程における被加工物の変形挙動や応力状態を調べた。また、実際の回転打抜き加工の試験機による

実験と有限要素解析によって得られる形状の比較を行った。

## 2. 切刃の運動

回転打抜き加工では切刃が回転運動を伴って被加工物に食い込むため、両刃形状の切刃では切口形状は進行方向に対し、前方と後方で非対称になる。ここで、カッターロールの刃先半径を $r_c$ 、被加工物の厚さを $t$ 、押し込み深さ $h$ とする時、切刃の横送り速度と被加工物の搬送速度との同期が取れるならば、これらの関係は次式で表される<sup>2)</sup>。

$$V_f = V_c [1 - (t-h)/r_c] \quad (1)$$

ここで、 $V_f$ : 被加工物運搬速度、 $V_c$ : 切刃先端周速度である。この刃の軌跡はFig. 2(a)のように描くことができる。このとき刃先は被加工物に埋め込まれた一本の垂直線上を、姿勢角度を変えながら降下するような軌跡を描く。また、被加工物の搬送速度が工具先端の周速に一致して強制搬送されているとみなせる場合( $V_c = V_f$ )、刃先と被加工物との進行方向の速度差を生ずる。速度差は噛み込み位置で最大となり、下死点で0となる。この場合の刃の軌跡をFig. 2(b)に示した。刃先の軌跡は被加工物に対して垂直方向ではなく、右側から左側へ向かう姿勢から食い込んだ後、次第に垂直方向へ降下する。これらの軌跡からわかる切口形状の特徴を次に挙げる<sup>2)</sup>。

- (1) 被加工物が刃先によって自然搬送される場合、Fig. 2(a)に近いと考えられる。この時、切り離され

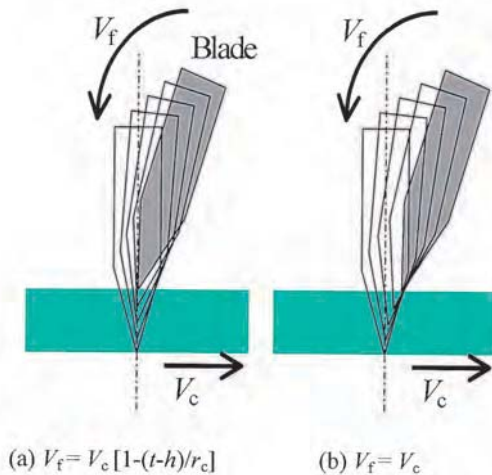


Fig. 2 Locus of the rotary cutter blade tip

- た後方側の端面は、板表面に対して垂直となる。  
 (2) 被加工物が刃先周速に一致して強制搬送されるとFig. 2(b)の条件であり、この時、後方側の端面の上部には飛び出した形状が残る一方、板材の下部では切口端面は板表面に対して垂直である。  
 (3) 何れの搬送速度条件の場合も被加工物の前方側の端面は、上部に大きなだれを形成する傾向がある。

## 3. 有限要素法と回転打抜き試験

### 3.1 有限要素法

有限要素法には市販のプログラムMSC. MARCを用いて解析を行った。実際に回転打抜き試験に使用した試験機をモデル化した解析モデルをFig. 3に示す。カッターロールの刃先半径とアンビルロールの半径は共に40mmとし、剛体と仮定した。切刃先端とアンビルロールとの隙間は下死点において0とした。カッターロールおよびアンビルロールの回転速度は0.1 rad/s (約1 rpm) とした。

切刃形状は一般的に使用されている刃先頂角40度の両刃とし、Fig. 4に示すように切刃先端幅  $w = 20 \mu\text{m}$ 、刃先角部半径  $r = 2.5 \mu\text{m}$  とした。被加工物はアルミニウム薄板A1050Pを想定し、長さ80 mm、厚さ0.4 mm とした。被加工物の両端はy方向に変位拘束を行い、

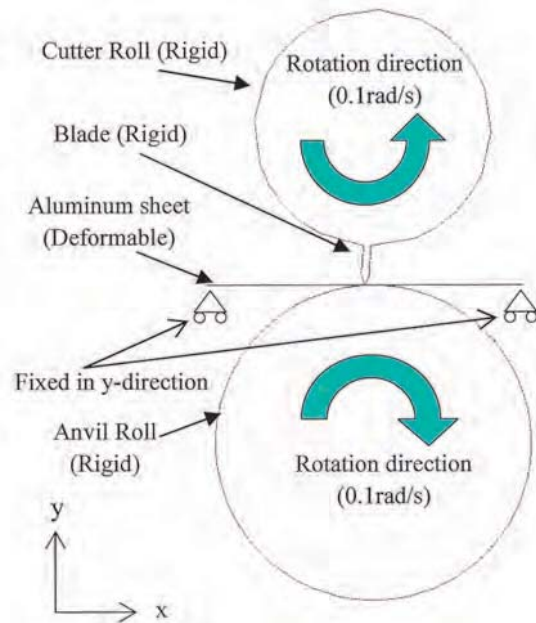


Fig. 3 FEA model of Rotary die cutting

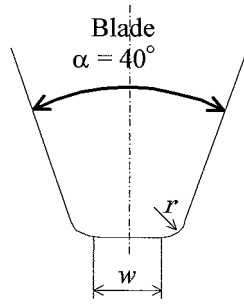


Fig. 4 Blade configuration

被加工物の両端が切断変形によって浮き上がらないようにした。切刃と接触する被加工物の中心部分0.6mmの範囲で9600個に要素分割し、中心から離れるにつれて要素を粗く作成した。

また、使用した材料定数及び解析条件をTable 1に示す。要素は四角形四節点とし、被加工物は等方性弾塑性体とした。塑性変形はn乗硬化則に従うものとした。

本解析において切刃押し込み量は板厚の80%以上押し込むため、切刃の押し込み量が増加すると、切刃近傍の要素の変形が著しくなり、解が収束しなくなることから、要素の形状を再構築 (remesh) する必要がある。任意要素の1つの内角が175°を超えているか、または5°未満であれば要素の再構築が必要であると判断し、要素の再構築を行うように設定した。

Table 1 Precondition of Finite Element Analysis

Condition group	Type	Selected parameter
Mesh generation	Elem. type	QUAD(4)
	Num. of elem.	14616
Material properties	Material types	Isotropic (Elastic-Plastic) ・ Young's Mod. $E$ : 88GPa ・ Poisson ratio $\nu$ : 0.3 ・ Plastic coeff. $F$ : 224MPa ・ Work-hard. expo. $n$ : 0.08
Contact	Contact bodies	Cutter roll and Blade: Rigid body ・ $\Phi_c = 0.1$ rad/s Anvil roll: Rigid body ・ $\Phi_a = 0.1$ rad/s Aluminum: Deformable
	Friction model	Coulomb
	Friction coeff.	Blade-Aluminum: 0.15 Anvil roll-Aluminum: 0.15
Boundary condition	Both ends of Al.	Fixed displacement in y-direction
Auto rezoning	Re-meshing method	Overlay quad
	Re-meshing criteria	Advanced Element distortion
	Re-meshing parameters	Element edge length 0.005mm

### 3.2 回転打抜試験

試作した回転打抜試験を用いてアルミニウム薄板の押抜加工を行い、被加工物の形状観察を行った。使用した試験機をFig. 5に示す。カッターロールの刃先半径及びアンビルロール半径は解析モデル同様40mmとした。切刃はカッターロール軸方向に切刃が加工されているクロスカッターを用いて、その長さは80mmとした。被加工物はアルミニウム (A1050P) とし、厚さ0.395mm、幅20mm、長さ100mmの薄板材を用いた。材料の送りは切刃と被加工物及びアンビルロールと被加工物の摩擦によるものとし、被加工物に張力は付与しないものとした。

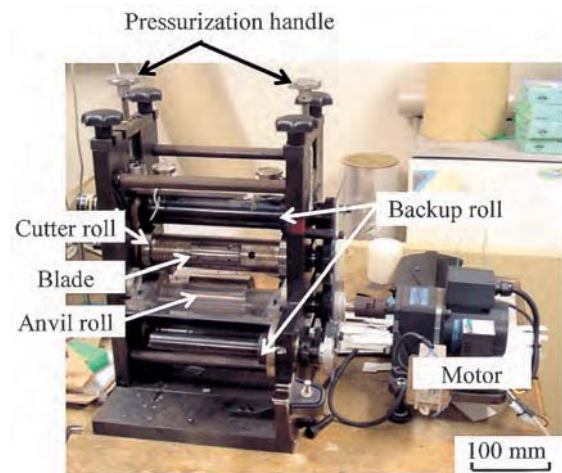


Fig. 5 Rotary die cutting machine

### 4. 切刃押し込み量と被加工物の変形

有限要素解析における切刃押し込み量の定義をFig. 6に示す。変形前の被加工物の板厚を $t$ 、切刃先端の中心部分からアンビルロール表面までの垂直方向の距離を $d$ とし、切刃の押し込み率 $h$ を式(2)で定義する。

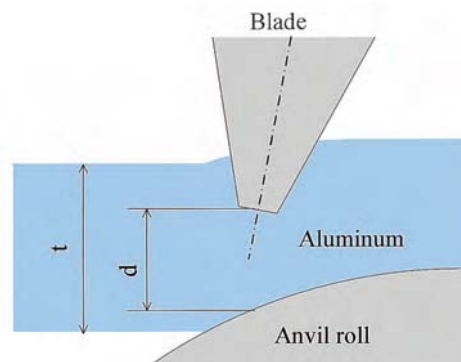


Fig. 6 Depth of Blade depth

$$h_i = (t-d)/t \times 100 \quad (2)$$

切刃押し込みと被加工物変形の様子をFig. 7に示す。切刃回転から0.2秒後に被加工物表面と切刃が接触し、0.6秒後には被加工物裏面とアンビルロール表面が接触する。その後は切刃ロールの回転と共に切刃が被加工物に押し込まれ、1秒後には材料のくびれが生じた。その後、くびれ部がさらに成長し、アンビルロール表面と被加工物裏面の距離が増加した。くびれが成長するのは、くさびの押し込みによって被加工物が左右方向に流れ、切刃先端下部に引張応力が生じるためであると考えられる。

切刃押し込み量による被加工物変形の様子を調べるためFig. 8に主応力分布、Fig. 9に主塑性ひずみ分布を示す。主応力分布では被加工物であるアルミニウムの引張り強度150MPaを2倍した300MPaを破断の基準として灰色の領域で示した。

(1)  $h_i = 24\%, 41\%$

切刃の押し込み率の増加するにつれ切刃先端近傍に存在する引張り応力が高くなっており、楔による引張分離効果が働いていることがわかる。切刃の斜面に沿って大ひずみ領域が広がり、被加工物の上部では少し盛り上がっている。

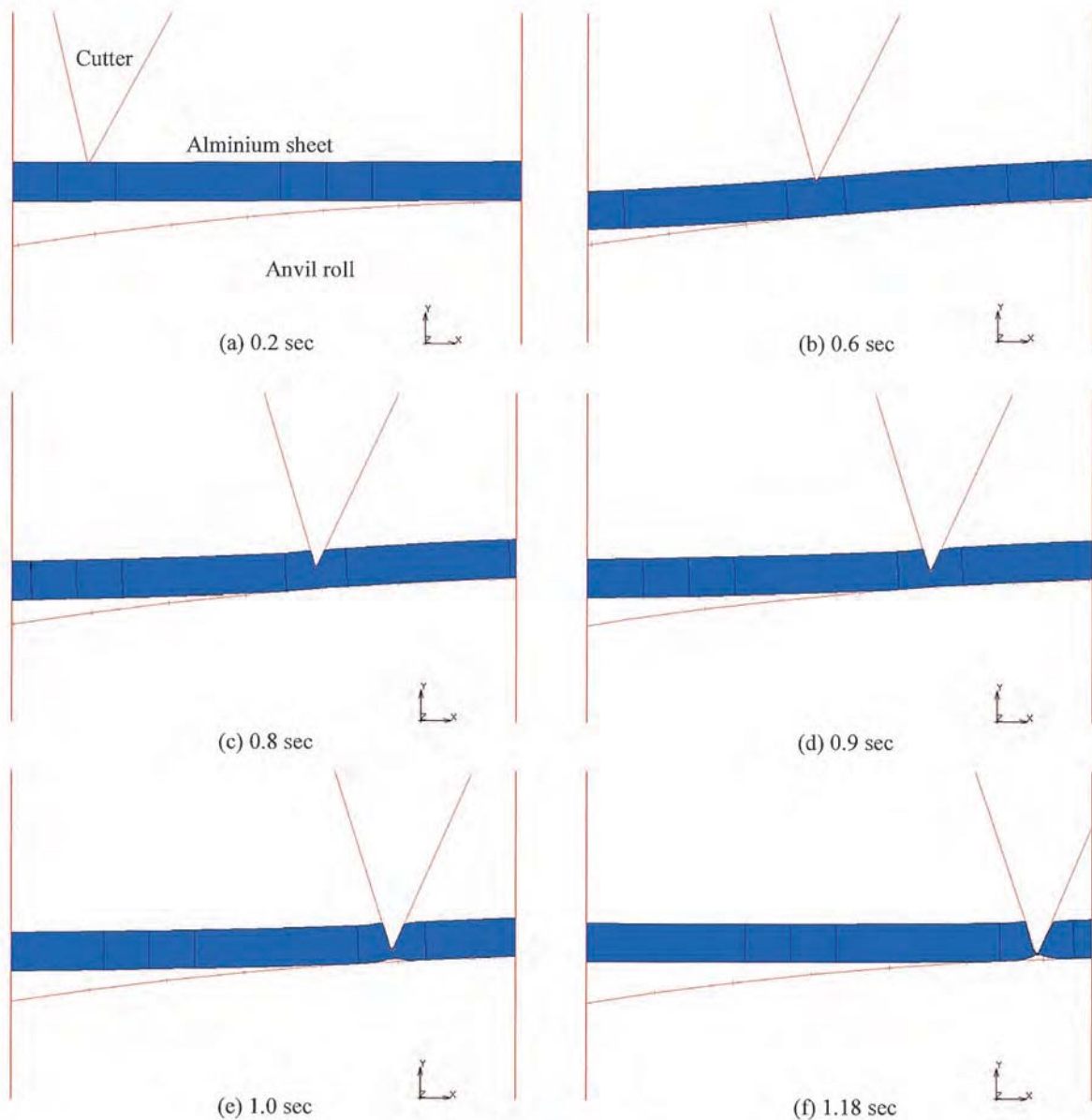


Fig. 7 Indentation process

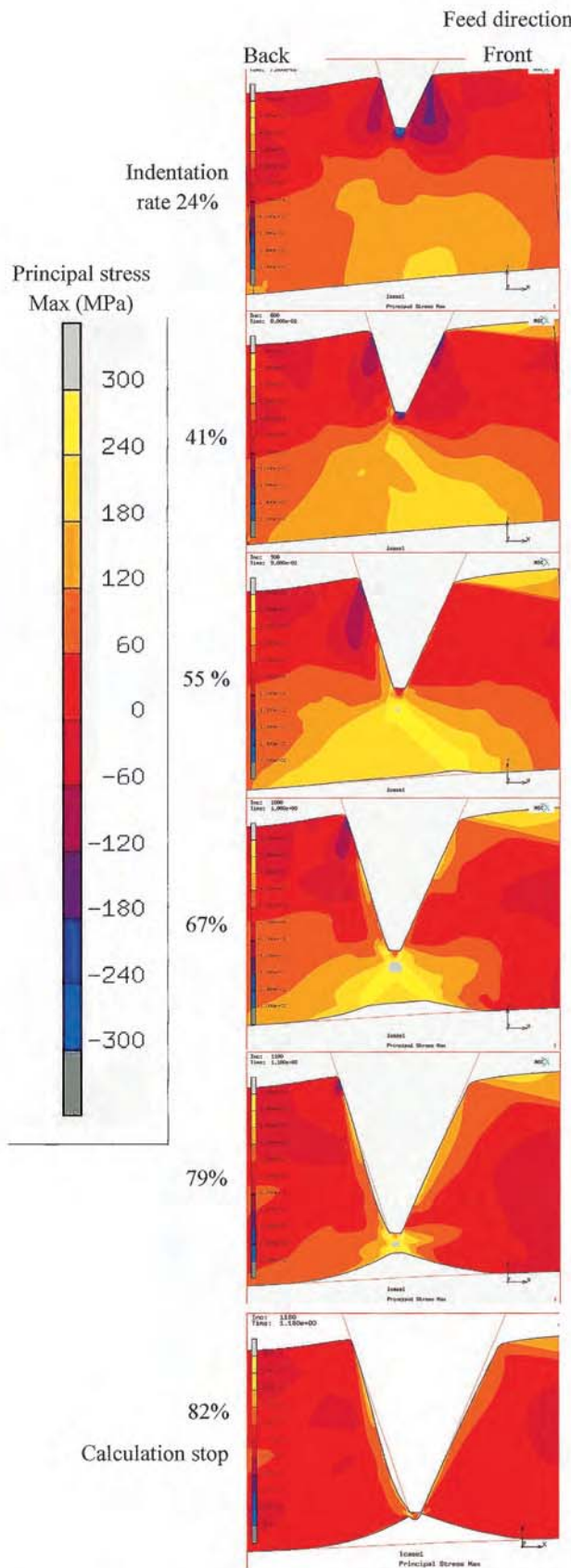


Fig. 8 Principal stress max distribution by simulation

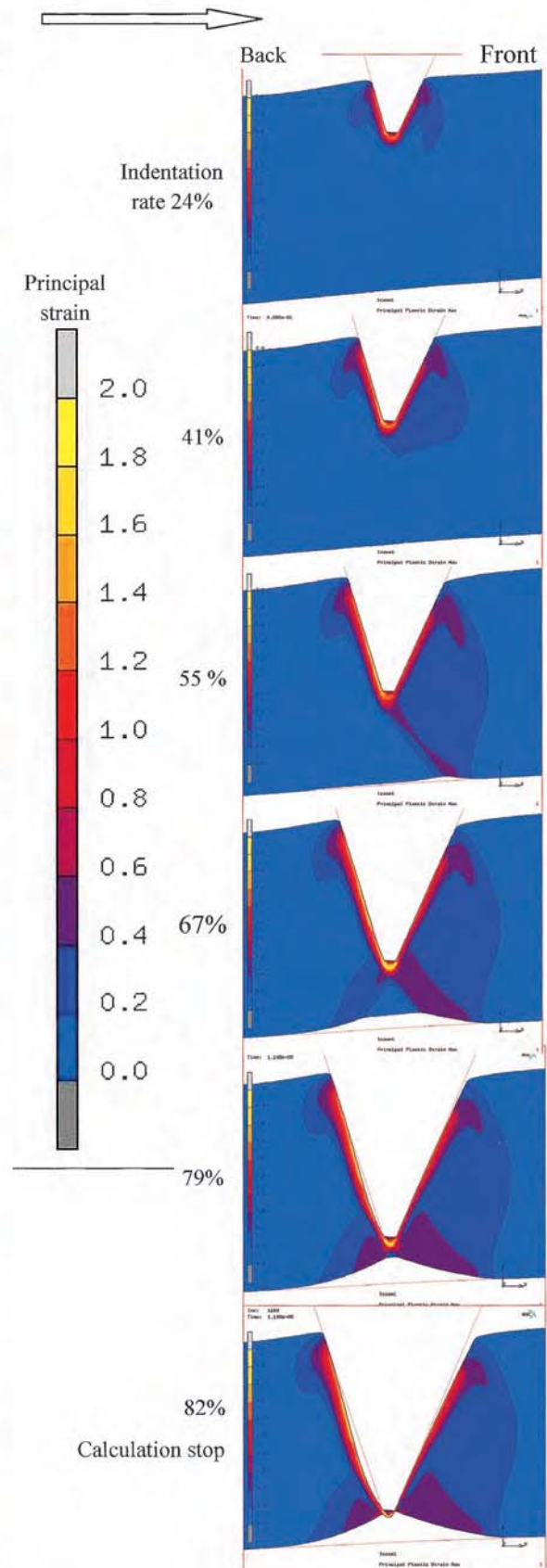


Fig. 9 Principal plastic strain max distribution by simulation

(2)  $h_t = 55\%$

楔による引張分離効果によりさらに引張応力の大きい領域が見られるようになった。引張り応力の高い黄色の領域が切刃先端から前方側下部にかけて斜めに分布し、被加工物の下面ではこの黄色の領域からネッキングが生じている。ひずみ領域においても切刃先端から前方側下部にかけてひずみの領域が広がっている。これは下死点の手前にある切刃が前方側に傾斜した状態で被加工物に押し込んでいること、そして被加工物とアンビルロールの接触している部分が右上がり傾斜していることによって被加工物の変形流動が送り方向側に強く働くためではないかと考えられる。

(3)  $h_t = 67\%$

切刃先端近傍で引張応力300MPaを超える灰色の領域が広くなり、主応力分布は切刃先端を中心にy軸対称に近い事がわかる。ネッキングは成長し、 $h_t = 55\%$ では切刃先端の前方側下部に見られたネッキングが切刃の真下に前後に対称な形となって広がっている。

(4)  $h_t = 78\%$

切刃先端とネッキングの頂点との距離はかなり近くなり、引張り応力の高い部分が切刃先端に集中している。切刃の斜面と被加工物の間に隙間が生じている。被加工物の前方側では上部で、後方側では切刃先端から中部にかけて切刃との間に隙間が生じる。これは、切刃が下死点近づくとつれて切刃の傾斜が連続的に変化してきたためである。回転打抜き加工において被加工物の切口形状が前後で異なるのは主にこの切刃の傾斜の変化によるものであると考えられる。

(5)  $h_t = 82\%$

切刃先端とネッキングの頂点との距離がさらに近づき、破断に近い状態であると考えられる。切刃先端に残留部が観察される。

3. 数値解析結果と実験結果の比較

数値解析による変形形状と実験によって得られた形状の比較をFig. 10に示す。数値解析によって得られた被加工物切断面の角度は送り76度と63度であり、実験によって得られた角度は72度と62度であった。どちらも前後で形状の違いが同じように確認された。切断面の角度の違いは、数値解析においてき裂を考慮していないため切断されずつながったままで、応力が開放されず、弾性変形による戻りが無いためである。

4. まとめ

回転打抜き加工における数値解析の結果、以下の知見を得ることができた。

- 1) 押し込みが進むにつれ楔による引張分離効果が働き、切刃先端から下部にかけて引張応力が生じる。
- 2) 押し込み率55%で主応力分布は前後に非対称で、切刃先端から前方側下部にかけて斜めに引張応力の高い領域が広がる。
- 3) 押し込み率82%の時には切刃先端とネッキングの距離はかなり近くなり、残留部が観察される。
- 4) 主ひずみ分布では切刃斜面に沿って大ひずみ領域が広がる。

参考文献

- 1) 松本英男：薄板材の回転打抜き加工プロセスにおける切断過程の解析，長岡技大修士論文，2007
- 2) 永澤茂編著：板紙材の型抜き加工-入門編-，亀田ブックサービス，2004

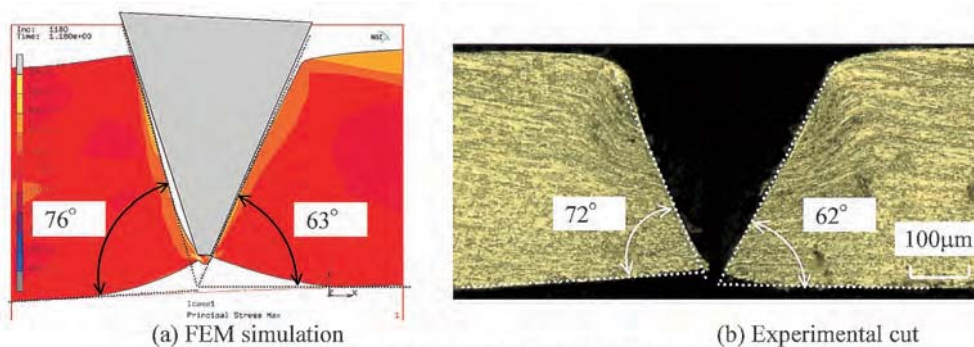


Fig. 10 Practical cut shape of work sheet