くさび形工具によるアルミニウム円板の切断加工シミュレーション

畑中 伸夫*・山口 克彦*・高倉 章雄*
飯塚 高志*・成田 憲一**

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 54, No. 9 (2004), pp. 361-366

FEM simulation of cutting process of circular aluminum sheet with wedge shape punch

Nobuo HATANAKA*, Katsuhiko YAMAGUCHI*, Norio TAKAKURA*
Takashi IIZUKA* and Kenichi NARITA**

Cutting of the circular aluminum sheets (1100P-H14, 1100P-O) by indentation of wedge shape punches was investigated as a process to achieve burr-free-cutting. Numerical simulations of the cutting process were conducted using a rigid plastic finite element code developed by the authors. The Jeong expression is used as a fracture criterion and was linked with the simulation. Metal flow and mean normal stress distributions at the deformation region of the sheet were calculated. The effects of nose angle and radius of the wedge shape punch on the cut edge profile are discussed based on the calculated results. To confirm the results of the finite element simulations, cutting experiments were also carried out. Cutting force with punch penetration depth was measured. And the shape of the cut edge was observed using an optical microscope. These experimental results can be explained well by the simulation results. From simulation and experimental results, it was clarified that the cutting process of the circular aluminum sheets of the burr-free was possible with wedge shape punch.

(Received December 8, 2003)

Keywords: FEM simulation, cutting process, wedge shape punch, ductile fracture, aluminum sheet

1. 緒 言

慣用せん断加工による金属板の打抜き加工や穴抜き加工においては、切口面に、だれ、せん断面、破断面およびかえりが生じる。また、打抜かれた製品には「わん曲」が生じ、穴抜き加工においてもせん断部周辺にたわみが生じる。慣用せん断加工におけるこれらの問題を解決し、理想切断面に近づけるために各種の精密せん断加工法が研究・開発されている。しかし、精密せん断加工を行うには多機能な加工機械が必要であり、厚板や脆性材料の場合には、これらの加工法によっても精密せん断加工を行うことは困難である。

かえりが発生しない切断方法として、くさび形工具の押込みによる切断がある。くさび形工具を用いた切断では、上下の刃先からほぼ同時にき裂が発生・進展して会合することから、かえりなし切断が実現される。この種の切断法はおおむね次の三つに大別される。一つ目は、V字形のくさび形工具を上下から板材に押込むことによって切断する方法^{1),2)}である。この研究においては、すべり線場法による解析と、加工硬化させた純銅板を使った実験が行われている。二つ目は、下敷の上に材料を置き、上から片刃状の工具を押込むことによって切断を行う方法^{3)~5)}である。この方法は従来、紙、布、皮革の切断に用いられてきた方法であるが、プラスチックに適用するために下敷にみぞを付け、みぞの中に柔軟体を

埋めることも試みられている。三つ目は、この改良型と通常のパンチとダイスによるせん断加工の中間的といえる方法で、ダイスやパンチの刃先を鋭角にして切断する方法^{6)~8)}である。

著者は、各種の刃先形状を持つ直線状のくさび形工具をアルミニウム板に上下から押込むことにより、かえりなし切断を実現する方法について、切断実験および剛塑性有限要素シミュレーションにより検討^{9)~11)}してきた。その結果、かえりがまったくない切断が可能であること、切口面の切断機構および様式はくさび形工具の刃先形状によって4種類に分類¹¹⁾できることを明らかにした。そして、その理由をシミュレーションにより求めた平均垂直応力および破壊係数の分布^{9),11)}により説明した。

しかし、工業的に有用性が高い打抜き加工や穴抜き加工については検討されていない。また、リング状くさび形工具の切断においては切断面が閉曲線となるため、直線状工具による切断と比較して工具近傍の材料流動が半径方向に拘束され異なった挙動を示すと予測される。本論文においては、打抜き加工および穴抜き加工における切断面を改善するために、リング状くさび形工具をアルミニウム板の上下から押込む切断法について、実験および剛塑性有限要素法シミュレーションにより検討した。そして、切断面の形状に及ぼす刃先形状および材料特性の影響を明らかにし、リング状くさび形工具を用いることにより、だれ、かえりがなく平滑な切断面をも

* 京都工芸繊維大学工学学部 (〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)。Kyoto Institute of Technology (Matsugasaki, Sakyou-ku, Kyoto-shi, Kyoto, 606-8585). E-mail: n_hatanaka2002@ybb.ne.jp

** 京都工芸繊維大学大学院 (京都市)。Graduate School, Kyoto Institute of Technology (Kyoto-shi, Kyoto).

Table 1 Mechanical properties of materials

Material		A1100P-H14	A1100P-O
Yield strength	σ_y (MPa)	120	35
Ultimate tensile strength	σ_B (MPa)	125	90
Total elongation	ϕ (%)	10	37
r-value ($\epsilon=0.05$)		0.67	1.16
Fracture strain	ϵ_f	1.39	1.75
Plastic coefficient	F (MPa)	161	168
Work hardening exponent	n	0.07	0.26
Initial strain	ϵ_o	0.15	0.02

Fig. 1 Schematic diagram of Cutting set-up.

つ良好な打抜き加工，穴抜き加工が可能であることを示した。また，シミュレーションに延性破壊条件式^{10),12)}を導入して，切断面における，き裂の発生・進展状況を検討した。さらに，直線状くさび形工具による切断特性^{9)~11)}と比較・検討した。

2. 実験およびシミュレーション方法

2.1 実験方法

実験に使用した材料は，板厚 3 mm の市販の硬質純アルミニウム板 1100P-H14 (Al-H と表記) および同材料を 350°C, 1 時間焼なました軟質純アルミニウム板 1100P-O (Al-O) である。各材料の機械的性質を **Table 1** に示す。切断実験に使用した試験片形状は辺長 100 mm の正方形である。

Fig. 1 に本研究で使用した実験装置の概要を示す。切断実験は，ダイセットに直径 50 mm のリング状くさび形工具を取り付け，ロックアウトにより材料を上下から固定した状態で工具を材料に押込むことにより実施した。工具の刃先形状が切断特性に影響を与えと考えられるが，本研究においては **Table 2** に示すように，内刃 (Inner: ci で表記)，両刃 (Center: cc) および外刃 (Outer: co) の 3 種類，刃先頂角 $\alpha=30^\circ$, 60° ，刃先円弧半径 $r=0.1$ mm, 0.5 mm の 5 種類について検討した。なお，表中の各図 (刃先形状) の左側がリング中心である。以後，刃先の形状は **Table 2** の最下欄に示すように上述の記号を組合せて表記する (たとえば，両刃， $\alpha=60^\circ$, $r=0.1$ mm の場合 cc601)。また，比較のため直線状くさび形工具による Al-H の切断実験を行った。直線状工具の刃先形状は，左右対称で刃先頂角 $\alpha=30^\circ$ ，刃先円弧半径 $r=0.1$ mm である¹¹⁾。

Table 2 Type of wedge shape punch

Shape type	Inside	Center		Outside
Tool shape				
Wedge angle α (deg)	30	30	60	30
Edge radius r (mm)	0.1	0.1	0.5	0.1
Naming	ci301	cc301	cc305	cc601
			cc601	co301

Fig. 2 Initial meshes and boundary conditions.

2.2 シミュレーション条件

切断加工シミュレーションは，著者らが開発した剛塑性有限要素法コードを使用して実施した。想定した材料は実験と同様に板厚 3 mm の Al-H および Al-O である (**Table 1** 参照)。材料は等方均質とし，Mises の降伏条件式に従うと仮定した。また，加工硬化則は Swift 型の次式で近似した。

$$\bar{\sigma} = F(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n \quad (1)$$

ここで， $\bar{\sigma}$: 相当応力， ϵ_0 : 初期相当ひずみ， $\bar{\epsilon}$: 相当ひずみ， F : 塑性係数， n : 加工硬化指数である。

板材の変形は **Fig. 2** に示すように軸対称変形を仮定し，上下の変形も対称であることから第 1 象限のみを解析の対象とした。工具は剛体とし，工具の押込み量は 1 ステップあたり 0.005 mm とした。また，要素の極端なゆがみによる誤差を避けるために，工具の押込み 15 ステップごとにリメッシュを実施した。要素分割は四角形要素を用い，**Fig. 2(a)** および **(b)** に示すように工具刃先部分に最小要素 (辺長は約 0.02 mm) を配置した。初期要素分割は 1433 節点，1322 要素である。また，材料流動を観察するために，工具近傍に **Fig. 2(c)** のような格子を設定した。図中点 A は，初期要素分割において，工具刃先の真下の板厚中心に位置する点である。

工具形状は実験と同様に，**Table 2** に示す 5 種類について行った。また，直線状工具についても実験の場合と同じ刃先形状について行った。摩擦係数 μ については Al-H および Al-O について，SKD11 で製作した平面工具により潤滑状態を変えて引抜き実験を行うことにより測定した。その結果，無潤滑状態では摩擦係数 $\mu=0.2$ ，潤滑状態では $\mu=0.1$ となっ

Table 3 Fracture threshold of materials

Material	Al100P-H14	Al100P-O
Fracture threshold C	1.48	1.71

た。しかし、著者らが先に行った直線状くさび形工具によるアルミニウム板の切断に関する検討からリング状くさび形工具による切断においても潤滑材の効果は期待できず、無潤滑状態と仮定して $\mu=0.2$ を用いてシミュレーションを実施した。

2.3 延性破壊条件式

シミュレーションにおいてき裂の発生を検出するために、破壊条件式が必要である。本研究では、実験結果と比較的よく一致し、使用実績^{9)~11),14)}がある H. Jeong により提案¹³⁾された次の延性破壊条件式を使用した。

$$F_v = \frac{1}{C} \int_0^{\bar{\epsilon}} \frac{\sigma_{\max}}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{\max}$: 最大主応力, $\bar{\sigma}$: 相当応力, C : 破壊基準である。 F_v は任意のひずみ $\bar{\epsilon}$ までの積分値であり、これを破壊係数と呼ぶことにする。すなわち、破壊係数 $F_v=1$ を満たした要素（以下、破壊要素と呼ぶ）は破壊したものとした。破壊要素の検出は、15 ステップ（押込み率 0.05）ごとに行った。

き裂の進展は「隣接する要素が破壊したとき、その要素間の結合が解かれ、き裂が進展する」と仮定し、節点分離法¹⁴⁾を用いた。破壊基準 C は平板の引張試験の結果から算出^{10),15)}した。シミュレーションに使用した各材料の破壊基準を **Table 3** に示す。

3. シミュレーション結果

3.1 工具の押込みに伴う材料流動

Fig. 3 は、工具の押込みに伴う材料流動のシミュレーション結果である。材料は Al-O, 刃先形状は cc301 である。工具の押込み深さ s は初期板厚 t_0 で除して無次元化して示している。Fig. 3(a) に示すように、工具の押込み率 $s/t_0=0.2$ において刃先近傍の格子は大きく変形しているが、板厚中心部はほとんど変形していない。Fig. 3(b) および (c) に示すように、押込みの進行に伴って工具側面の材料は左右へ流動するとともに、工具に接する材料表面には盛上がりが形成される。また、板厚中心部においても圧縮変形が生じるとともに、材料は全体としてリングの外側へ流出することが点 A の移動によりわかる。

Fig. 4 は材料流動に及ぼす刃先形状の影響を示す。材料は Al-O, 押込み率は $s/t_0=0.8$ である。いずれの場合も刃の側面にそった格子は大きく変形し、材料表面には盛上がり形成されている。盛上がり高さは、co301 の場合には外側が高くなるが、他の場合には内側が高くなる。Fig. 4(c) に示す cc601 の場合、刃の内側の格子変形は ci301 の内側の変形と、外側の格子変形は co301 の外側の変形とよく似た変形を示す。Fig. 4(d) に示す刃先半径が $r=0.5\text{ mm}$ と大きい cc305 の場合には、刃先下の格子は板厚中心までほぼ均一に圧縮される。刃先下部の材料は ci301 の場合はリング状工具の内側へ流入するが、他の場合には外側へ流出することが点 A の移動から

Fig. 3 Metal flow with punch penetration (Al-O, cc301). **Fig. 4** Metal flow for various punch edge shape (Al-O, $s/t_0=0.8$). **Fig. 5** Metal flow for various materials (cc301, $s/t_0=0.8$).

わかる。

Fig. 5 は、材料流動に及ぼす材料特性の影響を示す。加工硬化指数の小さい Al-H の場合、盛上がり高さは Al-O に比べ大きくなっているが横方向への変形は小さく、局所的に大きな変形を生じていることを示している。

Fig. 4 において、ci301 および co301 の場合には、外側および内側の切断面は、盛上がりが生じるものの、だれ・かえりがなく、板厚中心線にはほぼ垂直である。このことから、穴抜き加工・打抜き加工にこれらの刃先形状を用いることによって良好な切断面を得ることができると考えられる。

3.2 盛上がり高さと材料流動

Fig. 6 は工具の押込みに伴う材料の盛上がり高さ h および刃先真下の板厚中心点 A の横方向変位 d を示す。材料は Al-

Fig. 6 Rise-up height and flow with punch penetration (Al-O).

Fig. 7 Variation of mean normal stress distribution with punch penetration (Al-O, cc301).

Oである。いずれの刃先形状においても押込みの増加に伴い盛上がり高さ h は増加し、点 A は横方向に移動する。cc301 の場合には、リング状工具の内側の h は増加を続けるが、外側の h は $s/t_0=0.4$ 以降増加を停止する。また、横変位 d は $s/t_0=0.4$ 以降、増加を始める。これより、cc301 の場合には押込みの初期は盛上がり変形が、 $s/t_0=0.4$ 以降は外周部への流出が材料の基本的な変形となる。ci301 の場合には、盛上がり高さ h の変化は cc301 の場合とほぼ同様であるが、横方向への変位 d が $s/t_0=0.6$ 以降に負の値を取る。これは、材料が工具の内側へ向かって流動することを示している。co301 の場合、内側・外側ともに盛上がりは、押込み率 $s/t_0=0.4$ 以降停止する。また、横方向への変位 d は $s/t_0=0.6$ 以降に増加をはじめる。

3.3 平均垂直応力の分布

Fig. 7 は工具の押込みに伴う平均垂直応力の変化を示している。材料は Al-O、刃先形状は cc301 である。Fig. 7(a) に示すように押込み率 $s/t_0=0.2$ において、刃の左側面から刃先近傍に 100 MPa の圧縮応力領域が広がり、刃先には 200 MPa の圧縮応力が生じている。Fig. 7(b) および (c) に示すように押込み率 $s/t_0=0.4\sim0.6$ においては、刃先の 200 MPa および 100 MPa の圧縮領域が小さくなるとともに、板厚中心部に 100 MPa の引張応力領域が発生・拡大する。押込み率が $s/t_0=0.8$ に達しても、刃先近傍は 100 MPa の圧縮応力に保たれているが、この圧縮領域に板厚中心部の 100 MPa の引張領域が接近する。

Fig. 8 は、刃先形状が平均垂直応力の分布に及ぼす影響を示す。材料は Al-O、押込み率は $s/t_0=0.8$ である。Fig. 8(a)

Fig. 8 Effect of wedge shape on mean normal stress (Al-O, $s/t_0=0.8$).

Fig. 9 Effect of material properties on mean normal stress (cc301, $s/t_0=0.8$).

に示す ci301 の場合、刃先には 100 MPa の圧縮領域が存在する。また、Fig. 4(a) に示したように材料はリングの内部に向かって流入するため、刃の左側には圧縮応力領域が広く形成されている。また、板厚中心部には引張応力領域が発生している。Fig. 8(b) に示す co301 の場合、リングの外側へ材料が流出するため、刃先下部の材料も引張変形の影響を強く受け、広い範囲に引張応力領域が広がる。また、刃先の圧縮応力は極めて狭い範囲に限定され、応力値も低い。Fig. 8(c) に示す cc601 の場合には、Fig. 4 の格子変形の場合と同様、刃の左側の応力分布は ci301 と右側は co301 とよく似た分布になっている。Fig. 8(d) に示す cc305 の場合、刃先下部には引張応力領域は存在せず、広い範囲に強い圧縮応力が分布しており、据込みに似た応力分布を示す。

Fig. 9 は、平均垂直応力の分布に及ぼす材料特性の影響を示す。Fig. 9(b) に示す Al-H 材の場合、刃の左側は広範囲に圧縮応力を出しているが、刃先下部には引張応力が発生していない。これは、Al-O 材に比べ Al-H 材の場合には変形が盛上がりなど局所的であり、刃先下部の材料が大きく流動することがなく、引張変形が小さいためである。

3.4 破壊係数の分布と最終分離

破壊係数 F_v の分布は、いずれの刃先形状においても押込み率 $s/t_0=0.6$ まで低い値であった。しかし、押込みの増加に伴って、Fig. 7 および Fig. 8 に示したように板厚中心部に高い引張応力領域が発生すると F_v の高い領域が出現する。Fig. 10 はパンチの押込みに伴う破壊係数の分布を示す。材料は Al-O、刃先形状は co301 である。材料内において Fig. 10(a) に示すように $s/t_0=0.8$ で F_v の高い領域が板厚中央部に出現し、 $s/t_0=0.9$ で破壊要素が板厚中心部に発生した。その後、Fig. 10(c) に示すようにき裂は進展して、 $s/t_0=0.96$ において材料は分離・切断された。切断後の形状を Fig. 10(d) に示す。

Fig. 10 Variation of fracture value with punch penetration (Al-O, co301).

このシミュレーション結果から、リング状くさび形工具による板材の切断では、板厚が0になる寸前まで工具が押込まれると、まず板厚中心部に破壊要素が発生し、その後、この点からき裂が発生、刃先に向かって進展することにより分離が完了する。これにより、かえりなし切断が実現される。

3.5 直線状くさび形工具による切断

リング状くさび形工具の押込みに伴う盛上がり高さの変化を Fig. 6 に示した。しかし、直線状くさび形工具による切断の場合^{9),10)}には盛上がりは、実験結果およびシミュレーション結果ともに観察されなかった。盛上がりが生じる原因はリング状工具の場合には半径方向への材料流動が困難なためであり、直線状工具の場合には板材の横方向への流動が容易なため生じないと考えられる。

また、直線状くさび形工具による切断加工のシミュレーションでは、平均垂直応力の分布は工具を中心に左右対称となり、工具近傍を除いて応力は極めて低く、Fig. 7 のようにリング内側に比較的高い圧縮応力が生じる分布とは大きく異なる。しかし、いずれの場合も工具下部における応力分布は刃先において圧縮応力となり板厚中心部において引張応力となる定性的傾向は同じである。

リング状くさび形工具による切断では、Fig. 10 に示したように板厚中心部からき裂が発生し、刃先に向かって進展する。一方、直線状くさび形工具による切断においては、押込みの初期から刃先近傍に破壊係数が破壊基準より大きい領域が生じ、刃先に微小き裂が発生する。しかし、微小き裂は大きく進展することなく、引続く押込みにより押しつぶされるため痕跡は観察できない。微小き裂の発生と押しつぶしが連続的に生じることにより切断が進行し、最終分離にいたる。

4. 実験結果および考察

4.1 切断荷重特性

Fig. 11 は工具の押込みに伴う切断荷重の変化を示す。(a) は実験結果、(b) はシミュレーション結果である。Fig. 11(a) において、いずれの材料および刃先形状の場合にも工具の押込みに伴って荷重は増加するが、押込み率 $s/t_0 = 0.7 \sim 0.9$ において最大値に達した後、減少した。その後、荷重は $s/t_0 = 1.0$ 付近で極小値をとり、再び増加した。 $s/t_0 = 1.0$ 、すなわち板

Fig. 11 Effect of punch shape on cutting force (Al-O).

厚が0になるまで工具を押込んでも材料は切断されておらず、 $s/t_0 = 1.1$ に達して分離・切断が終了した。

Al-H の場合、 $s/t_0 = 0.5$ まで ci301 と co301 で荷重に差異はなく、また Al-O の場合にも差異は小さい。しかし、両材料とも $s/t_0 = 0.5$ を越えると刃先形状の違いにより差異が大きくなる。最大荷重は Al-H の方が Al-O に比べ大きく、また内刃 (ci301) の方が外刃 (co301) に比べ大きくなった。最大荷重に達する押込み率は、ci301 の場合には両材料とも $s/t_0 = 0.9$ であり、co301 の場合には $s/t_0 = 0.7$ であった。

Fig. 11(b) のシミュレーションの結果において、最大荷重の大きさ、最大荷重に達する押込み率は実験結果と同じ傾向を示した。しかし、荷重が極小値を取った後、再び増加する現象は現れなかった。また、Al-O の場合、実験では押込み初期から ci301 の方が少し大きくなったが、シミュレーションにおいては $s/t_0 = 0.5$ までほぼ同じ大きさになった。

実験結果およびシミュレーション結果ともに、荷重は Al-H の方が大きくなった。これは Al-H の場合には塑性係数 F が大きく変形初期から大きな変形抵抗を示すこと、 n 値が小さいため Fig. 5 に示したように変形が狭い範囲に限られるためである。また、両材料とも刃先形状によらず、 $s/t_0 = 0.5$ 付近まではほぼ同じ値を示す。これは、押込み率 0.5 までは主要な変形が刃先形状にかかわらず盛上がり変形するためである。一方、押込みがさらに進むと Fig. 6 に示したように、点 A が ci301 の場合には内側へ、co301 の場合には外側へ移動し、主要な変形が横方向への材料流動となる。ci301 の荷重が co301 に比べ大きくなる理由は、押込まれた工具の体積に相当する材料が ci301 の場合にはリングの内側へ流入するため塑性拘束による変形抵抗が大きく、co301 の場合には外側へ流出するため抵抗が相対的に小さいためである。

Fig. 12 Shape of cutting profile.

荷重が最大値に達した後、減少する理由は、工具の押込みに伴い工具側面が材料と接触する面積が増加することによって横方向の分力が増加し、工具下の板厚が薄くなった部分に引張力が作用することが原因である。一方、極小値をとった後、荷重が増加する理由は、当該領域近傍の材料が加工硬化することによる変形抵抗の増加、残留板厚に対する刃先円弧半径の相対的な増大により材料を横方向へ流動させる応力の減少が原因である。この結果、刃先近傍における材料の変形機構が切削から圧縮に変化したと考えられる。すなわち、上下刃先に挟まれた材料は圧縮的な変形 (Fig. 4(d) 参照) を受け、変形が極めて困難な『デッドメタル』になっており、切削的機構による変形よりも大きな荷重を必要とするためである。

また、工具刃先が板厚 $s/t_0=1.0$ まで押込まれても板が切断されない理由は、材料の流動抵抗の増加による荷重の増加により、実験装置および刃先の剛性が影響を与えていると考えられる。

本論文においては実験・シミュレーションともに無潤滑で実施した。潤滑状態を変えてリング状くさび形工具による切断実験を行ったが、潤滑状態の違いによる切断荷重特性に差異は認められなかった。また、著者らが先に行った直線状くさび形工具によるアルミニウム板の切断加工¹⁰⁾においても潤滑の効果はほとんど現れなかった。この原因は押込みの初期に工具刃先と材料間に塗布されていた潤滑剤がそぎとられ、材料と工具が直接接触する無潤滑の状態になるためである。

4.2 切口面観察

Fig. 12 は切断後の切断面を示している。Fig. 12(a) の材料は Al-O、刃先形状 ci301、(b) は Al-O、co301、(c) は Al-H、ci301、(d) は Al-H、co301 である。両材料とも ci301 の場合には、材料の内周部にくさびの形状が残るが、外周部は、だれ・かえりはなく切断面も板厚中心に対し垂直な切断面が得られた。また、co301 の場合にも、だれ・かえりはなく切断面も板厚中心に対して垂直になっている。

しかし、いずれの場合にも切口面中央部に突起が生じた。突起の大きさは板厚方向に約 0.2mm、横方向に約 0.3mm であった。突起の生じる原因は、刃先部分の円弧による塑性変形および前述の圧縮的な変形により『箔状』に薄くなった部分

が切断後に残存するためと考えられる。

5. 結 言

リング状くさび形工具を用いてアルミニウム円板の切断実験および剛塑性有限要素法によるシミュレーションを行い、直線状くさび形工具による切断と比較することにより、以下の知見を得た。

(1) 工具の押込みに伴う材料の変形は、刃の近傍に集中する。板厚中央部の材料は、リング状工具の場合、内刃の場合を除き外側へ流出する。

(2) リング状工具の押込みに伴い材料表面には盛上がりが生じる。内側の盛上がりは押込みとともに高くなるが、外側は板厚中央部が外側へ流動を始めると増加を停止する。盛上がり高さは、外刃の場合を除き内側のほうが高くなる。直線状工具の場合には盛上がりは生じない。

(3) 工具刃先部の平均垂直直応力は押込みが進行すると漸減するが圧縮応力場である。一方、工具下の板厚中心部では押込み率 0.6 以降、引張応力領域が発生・拡大する。これらの傾向はリング状および直線状工具とも定性的に同じである。

(4) リング状工具による切断においては、板厚中心部に引張応力領域が生じ、拡大するに伴い破壊係数が板厚中心部で急激に増加し、破壊要素が発生する。発生したき裂は板厚中心部から刃先に向かって進展することにより切断される。

(5) 直線状工具による切断においては、押込みの初期から刃先近傍部分に破壊要素が発生する。しかし、破壊領域は拡大することなく引続く押込みにより押しつぶされる。この現象が連続的に生じることにより、材料表面から切断が進行する。

(6) 外刃・内刃のリング状くさび形工具を用いることにより打抜き加工・穴抜き加工ともにだれ、かえりのない平滑な切断面を得ることができる。

参 考 文 献

- 1) 田村公男, 工藤英明: 塑性と加工, **7** (1966), 360.
- 2) 田村公男: 塑性と加工, **13** (1972), 242.
- 3) 前田禎三, 銘刈春栄, 牧野内昭武: 塑性と加工, **11** (1970), 617.
- 4) 前田禎三, 銘刈春栄: 塑性と加工, **17** (1976), 329.
- 5) 銘刈春栄, 前田禎三: 塑性と加工, **20** (1979), 64.
- 6) 尾崎龍夫, 山崎 進: 塑性と加工, **20** (1979), 406.
- 7) 銘刈春栄: 塑性と加工, **23** (1982), 225.
- 8) 高辻則夫, 時澤 貢, 室谷和雄, 松木賢司, 佐藤全佳, 高井俊宏: 塑性と加工, **33** (1992), 1215.
- 9) 畑中伸夫, 山口克彦, 高倉章雄, 飯塚高志: 日本機械学会論文集 C, **68** (2002), 1303.
- 10) 畑中伸夫, 山口克彦, 高倉章雄, 飯塚高志: 軽金属, **52** (2002), 352.
- 11) 畑中伸夫, 山口克彦, 高倉章雄, 飯塚高志: 軽金属, **52** (2002), 108.
- 12) 後藤 学: 塑性と加工, **38** (1997), 200.
- 13) S. H. Jeong, J. J. Kang, S. I. Oh: Proc. 5th ICTP (1997), 631.
- 14) 畑中伸夫, 関根文太郎, 山口克彦: 日本機械学会論文集 C, **67** (2001), 2352.
- 15) 宅田裕彦: 塑性と加工, **40** (1999), 514.