

シェービング加工における切り口面生成過程のFEM解析

笹原弘之*

1. はじめに

シェービング加工は良好な切り口面が得られる精密せん断の一つであり、取りしろであるさん幅が非常に小さいため、図1に示すように加工初期段階は切削と同様に刃先Aと加工くず自由面側のBを結ぶ線上にせん断変形域が存在し、加工終期にはパンチとダイを結ぶAB'上でせん断変形が集中し、いわゆる通常のせん断加工と同様の変形機構となる⁽¹⁾。加工工程のほとんどが切削的機構によることから、シェービング加工の精度は慣用せん断より優れているが、平滑な仕上げ面を得るためにはさん幅や材料の厚みに制約を受ける⁽²⁾。そのため高精度、高品位な加工条件を求めて実験的な研究が多く行われてきたが⁽³⁾⁽⁴⁾、迅速かつ定量的な加工条件の選定、加工状態の把握のために解析的なツールが望まれている。

近年、各種の有限要素法パッケージの普及もあり、せん断加工においてはシミュレーションによる理論解析が広く行われるようになってきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。しかし、シェービング加工のように取りしろが小さい場合についての解析はあまり見あたらない。そこで、本研究では高品位な加工面が要求されているシェービング加工の切り口面生成過程について解明することを目的としている。最終的には弾性ひずみや残留応力をも検討が可能となるよう考慮し弾塑性有限要素法を用いて定式化を行った。また、切削様式、せん断様式の材料分離に対応できるように、節点分離条件および破壊の条件を導入した。それにより切削様式からせん断様式への変形期への移行、せん断期における材料の延性破壊の発生について、弾塑性有限要素法によりシミュレーションを行った。

2. 研究方法

2.1 解析モデル

シミュレーションは二次元平面ひずみ状態を仮定し、弾塑性有限要素法により行った。図2に初期有限要素モデルを示す。X方向要素数40、Y方向要素数24、総節点数1026となっている。ダイ刃先は丸みのない鋭利なものを仮定する。固定されたダイに対し、パンチの接触しているAB上の節点と材料左端のBC上の節点にパ

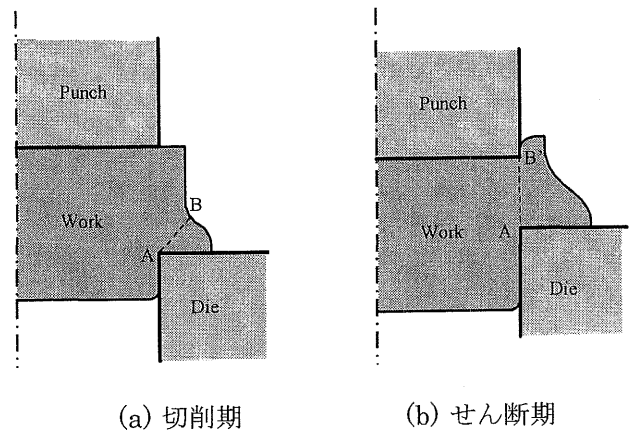


図1 シェービングにおける変形様式の推移

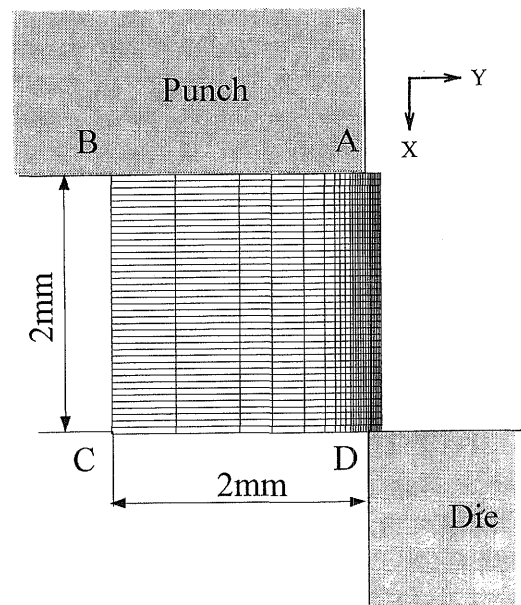


図2 有限要素初期モデル

ンチの下方への移動速度を与え加工を行う。後述するように、パンチの側面、ダイの側面、すくい面では摩擦を考慮し、材料の工具面との接触・離脱の判定も行っている。

表1に解析条件を示す。シェービング加工の加工面に最も影響を与えるのはさん幅であり、板厚の4~7%

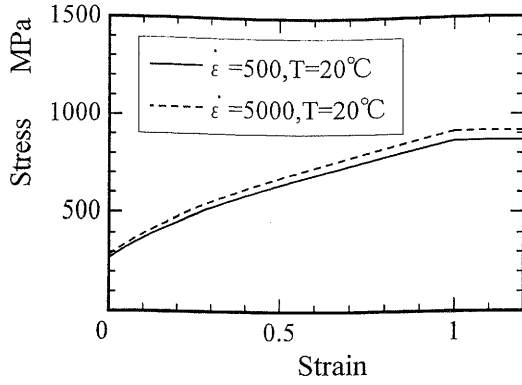


図3 流動応力特性

表1 解析条件

被加工材		7-3 黄銅
パンチ速度	mm/sec	500
クリアランス	mm	0.01
加工物厚さ	mm	2.0
さん幅	mm	0.1

が標準値とされているが、本研究ではさん幅を板厚の5%とした。また、シェービング加工におけるクリアランスは慣用せん断の場合よりもかなり小さく、本研究では0.01mmとした。

工作物には7-3黄銅を想定し、図3に示すような、単軸圧縮試験より求めた流動応力特性を用いた。また、ポアソン比0.37、ヤング率107.1Gpaとした。

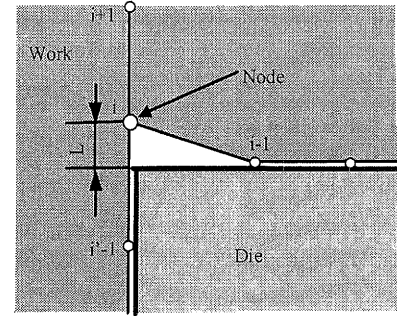
2.2 弾塑性解析の定式化

弾塑性解析においては、大変形に対応するよう有限要素の変形に起因する幾何学的非線形を導入し、塑性変形時の要素の非圧縮性の拘束の緩和を行った⁷⁾。

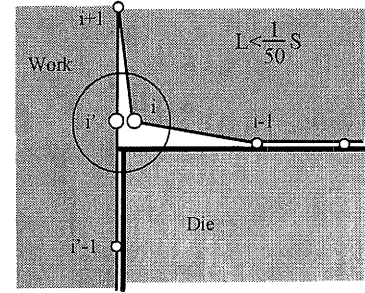
$$\{\dot{F}\} = ([K_M] + [K_G] + [K_F])\{V\} \quad (1)$$

ここで $\{\dot{F}\}$ と $\{V\}$ は節点力の変化率と節点速度ベクトル、 $[K_M]$ はRiceら⁸⁾の汎関数により非圧縮条件を緩和した剛性マトリクス、 $[K_G]$ は幾何剛性マトリクス、 $[K_F]$ は荷重補正マトリクスである。

シェービング加工の進行に伴って、まずは切削様式の加工くずが生成し、ついで加工終了期近くではダイとパンチ刃先を結ぶ線上でせん断が集中し延性破壊が生じると考えられる。その過程で、本研究では二つの材料の分離および破壊条件を導入した。一つは図4に示すようにダイ刃先の通過予定面上の節点を次々と分離させる方法である⁷⁾。またもう一つは、詳細は後述するが、ひずみと静水圧の関数を仮定した延性破壊条件である。本来、切れ刃部分での材料の分離もせん断変



(a) 節点分離前



(b) 節点分離後

図4 ダイ刃先での節点分離

形域での破断も、同一の材料の破壊挙動であり、統一的に扱えれば理想的である。しかし、現在提案されているいくつかの破壊条件は基本的にはひずみの関数とするものであり、その仮定によると加工時の破壊の結果として生成する切り口面には、切削面であろうとせん断面であろうと破壊の臨界条件のひずみが残留することになってしまい差が現れない。ひずみ以外の静水圧や主応力差などを関数に導入してもさほど大きな変化は見込めない。これが第一の節点分離条件を導入した理由である。

この節点分離は次の二つの幾何学的条件が満たされたときに行うこととした。

- 1) 分離予定節点のダイ刃先からの距離が $2 \mu\text{m}$ 以内に到達している。
- 2) 前回分離した加工くず側の節点がダイ面上にある。なお、上記1)の距離の条件を10倍、1/10倍としても解析結果の大勢にはほとんど影響がないことを確認している。また、この手法は材料特性としての破壊条件を不問としているが、物理的には鋭利なダイ刃先においては材料は刃先に滞留することなく、仕上げ面または加工くずへと分離することを仮定したものである。取り代に対して図示の程度の大きさの有限要素分割を適用すれば、節点の分離によって変形が不連続になることも解析結果には大きな影響を及ぼさない⁹⁾。

さらに加工が進むと、加工終期にはせん断変形が集

中し延性破壊による亀裂が生じ材料が破断分離する。実験的には、材料分離が行われるパンチとダイ刃先間を貫通するような亀裂が発生するための条件は、刃先間を結ぶ大きなせん断ひずみ増分が発生し、しかも亀裂が発生する方向に対し垂直な方向に、周囲に比べ大きい最大主応力が作用し、静水圧が引っ張りに近づくことであると推察されている⁽⁹⁾。また、実験で亀裂が発生するのは、シミュレーションにおいてひずみが3.0以上の高ひずみ領域が会合するのとほぼ同じ加工距離であるという結果も得られている⁽¹⁰⁾。ひずみ、静水圧、最大主応力などの条件式への取り込み方は種々考えられる^{(6)~(6), (11)~(13)}が、本研究でもひずみが大きいほど、また静水圧が大きな引っ張りであるほど破壊が生じやすいと考え、次のような延性破壊の条件を仮定した⁽¹⁴⁾。

$$\varepsilon > \varepsilon_0 - \alpha \frac{p}{\sigma} \quad (3)$$

ここで、 ε , p , σ はそれぞれ相当ひずみ、引っ張りを正とする静水圧、相当応力であり、 ε_0 , α は定数である。

破壊したと判定された要素はその剛性を極めて小さくしほとんど応力を受け持たせないようにした⁽¹⁵⁾。具体的には、弾性要素としヤング率を元の材料のヤング率の1/1000とした。ただし、要素特性の急激な変化に

よりその周囲で応力に不釣り合いが生じる。その対策として、要素剛性を小さくしたことに起因する応力の不釣り合いが十分小さくなるまで工具を止めて数回の増分計算を行い、その後再び工具を進捗させるよう計算を行うこととしている。

また、工具-加工くずの接触面は、切削の解析で妥当性が得られている

$$\frac{\tau_t}{\tau_e} = 1 - \exp\left(\lambda \frac{\sigma_t}{\tau_e}\right) \quad (2)$$

で表される非線形摩擦境界として扱う⁽¹⁶⁾。ただし σ_t , τ_t はダイ面上の垂直応力と摩擦応力、 τ_e は着目点での材料のせん断流動応力、 λ は摩擦特性定数である。本解析では $\lambda=0.1$ とした。

工具と工作物節点の接触、および接触節点の工具からの離脱の判定は、前者は幾何学的な条件、後者は力学的な条件を用いた。すなわち、前者については工具面を規定する輪郭線と工作物表面節点の距離が設定した微小値以下に近づいた場合に接触したと判定し、境界条件を変更する。また、後者については、要素内応力から節点反力を算出し、その工具に垂直な成分が負の値を持った場合に工具から離れ自由な境界条件とす

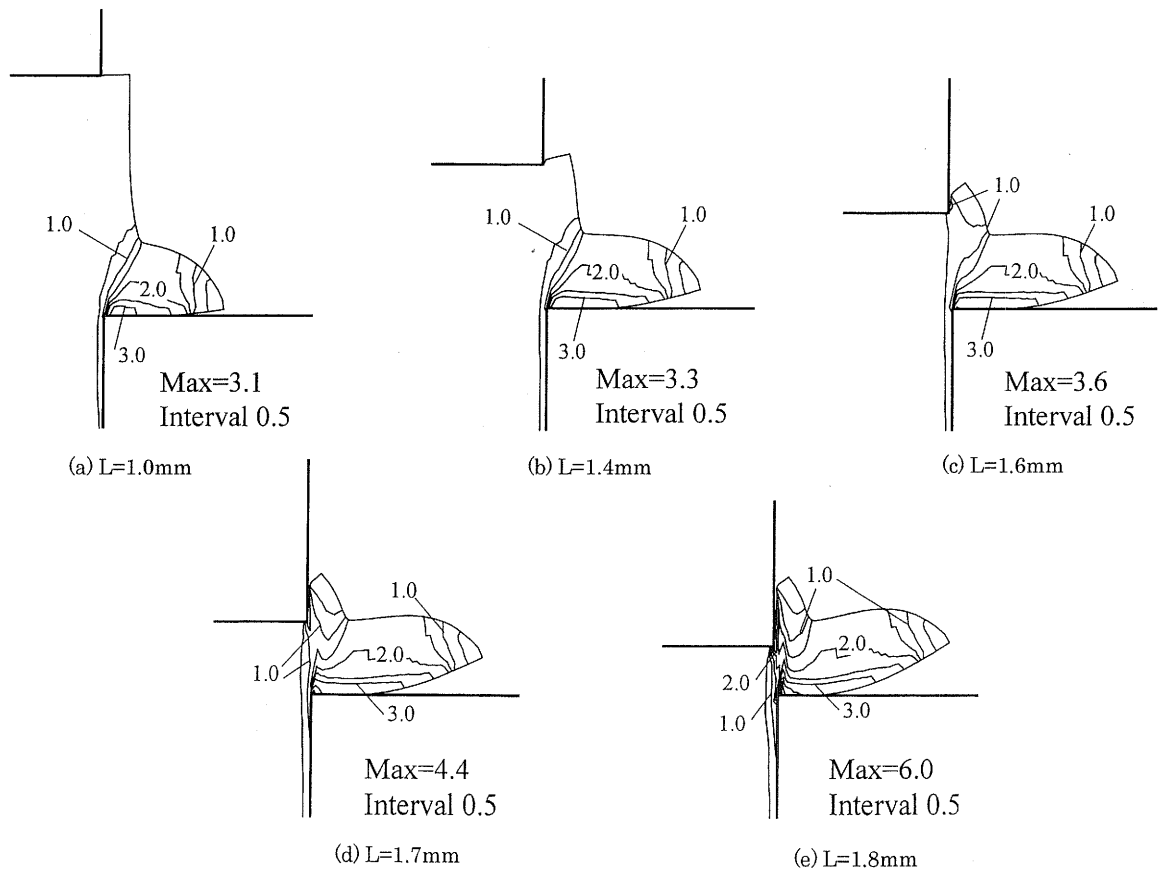


図5 相当塑性ひずみ分布の推移

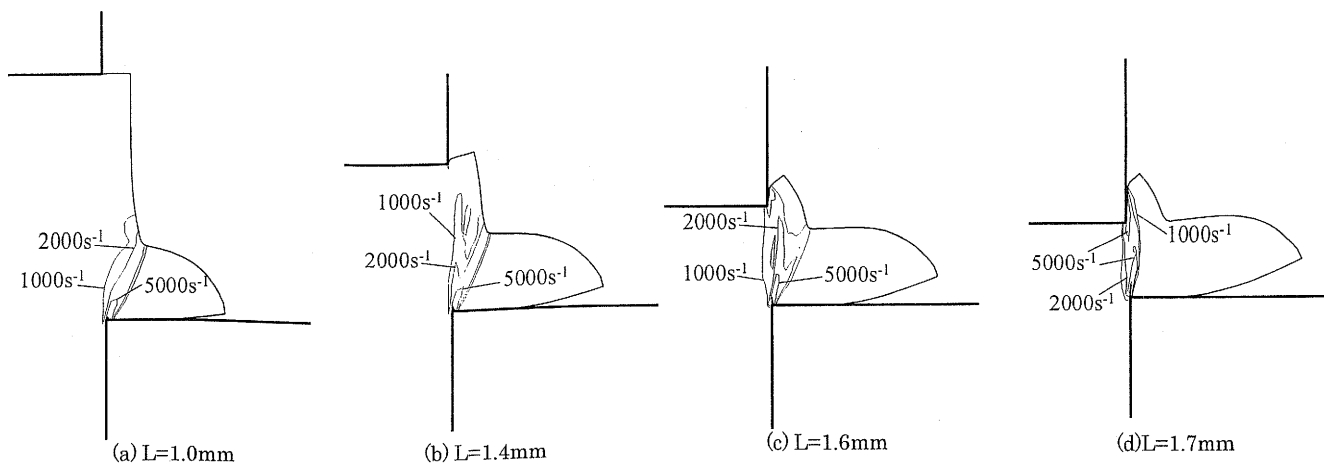


図6 ひずみ速度分布の推移

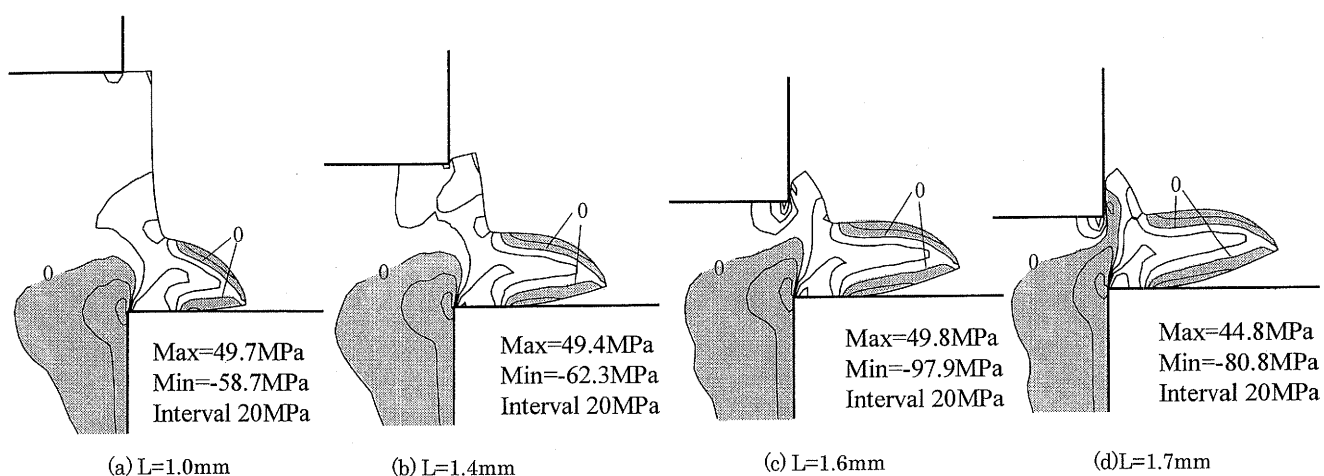


図7 静水圧分布の推移

ることとした。

3. 解析結果

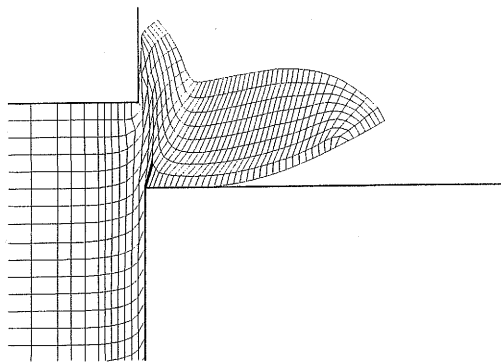
3.1 切削期からせん断期への移行

まず、シェービング初期から終了期までの変形状態の変化に着目し、ひずみ、静水圧、ひずみ速度の変化について調べた。ここでは、材料の延性破壊による亀裂発生を考慮していない。

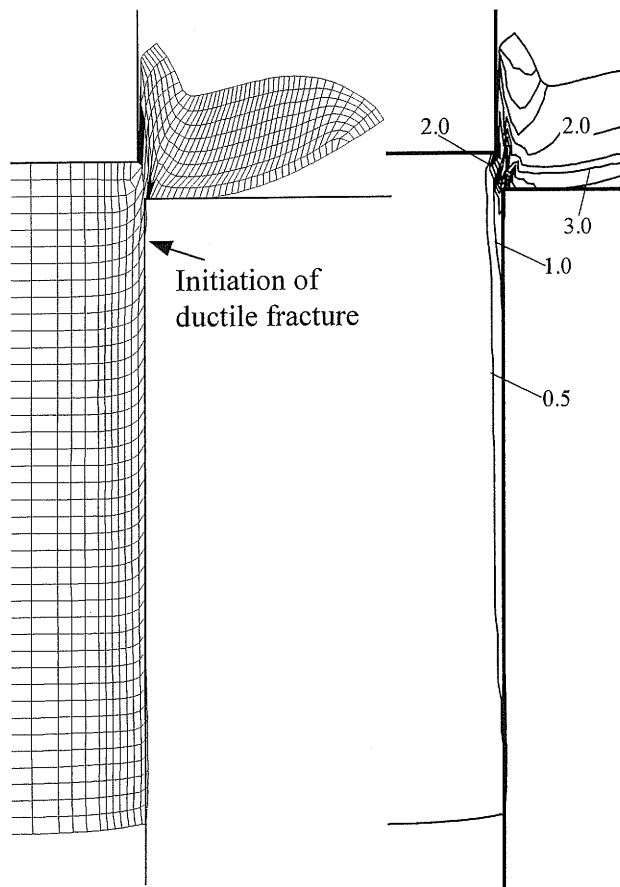
図5に相当塑性ひずみ分布の変化を示す。同図(a),(b)においてひずみはダイ刃先から取り代方向に生じており、パンチ付近ではひずみはほとんど生じていない。このように取り代が切りくず状に除去される状態は切削そのものである。いわゆる切りくず部分では工具側のひずみが大きく、ほぼ定常切削のような状態となっていることがわかる。同図(c)以降、さらに加工が進むとパンチ付近でも変形が生じ、ひずみ大の部分がパンチ刃先とダイ刃先を結ぶ線上に集中していく様子が見られる。

図6にはひずみ速度の分布を示す。同図より変形域が移動していく様子が見られる。同図(a)においては、ダイ刃先から取り代方向に変形域があり、刃先と取りしろ表面を結ぶ領域でせん断変形が生じ、切りくず状に取り代が除去されていく過程である。同図(b)以降では、少しずつひずみ速度の高い領域が前方のパンチ側へ移動していき、同図(c)ではダイ刃先とパンチ刃先を結ぶ線上に主な変形領域が移りつつある。さらに加工が進み、同図(d)では、ダイとパンチをつなぐ線上付近だけが変形しており、切削的な変形はほとんどなくなっていることがわかる。それに伴って、加工くずの形状は長靴状となることが見られる。

図7に静水圧の分布を示す。引張りを正としており、図中の塗りつぶした部分は引張りの領域を示す。加工初期において静水圧は、加工くず内を除けばダイ側面の加工部分のみで引っ張りになっていることが分かる。加工が進むとダイ側面に沿っていた引っ張りの領域が同図(c),(d)のようにパンチに向かって広がっていき、



(a) 変形状態 (L=1.75mm)



(b) 変形状態(L=1.89mm) (c) ひずみ分布

Fig.8 延性破壊の発生 ($\epsilon_0=5.0, \alpha=0.4$)

パンチ側面でも引っ張りの静水圧が発生し、ダイからパンチへと連続した領域に引っ張りの領域が存在するようになる。

3.2 最終せん断期での材料の延性破壊

次に式(3)の延性破壊条件も導入した際の結果を示

表2 試行した定数 ϵ_0 と α の組み合わせ

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ϵ_0	4.0	4.0	4.0	4.5	4.5	4.5	5.0	5.0	5.0
α	0.2	0.4	1.0	0.2	0.4	1.0	0.2	0.4	1.0

す。式(3)中の定数については、試行錯誤的に表2に示すような組み合わせで解析を行った。結果の詳細は省略するが、式(3)からも分かるように、定数 ϵ_0 が小さいほど亀裂が発生しやすかった。また、これらの条件下では、切削様式の変形時には式(3)の破壊条件は満たされなかった。

図8に $\epsilon_0=5.0, \alpha=0.4$ とした場合の結果を示す。黒で塗りつぶした要素が破壊条件を満たしその後ヤング率の小さな弾性要素として扱っている要素である。同図(a)において、まずダイ刃先部の加工くず側で破壊が生じ、パンチ側面でも破壊が発生した。さらに同図(b)ではダイ刃先からパンチへ向けて破壊要素が増えている。また、パンチ側面で加工くずとなっている部分は破壊面であることが予想される。

同図(c)には加工面での相当ひずみの分布を示す。切削期に生じた切り口面ではひずみは1.0以下であるが、最終せん断期には変形域がパンチーダイ間に集中するため大きなひずみが生じていることがわかる。このような状態は、本手法のダイ刃先での節点分離および材料破壊条件の導入により実現されるものである。何らかの方法により破壊条件の適当な定数が同定できれば、この手法により切削期で生じる切り口面とそれ以降のせん断面あるいは破断面となる位置を予測することは十分可能と思われる。しかしながら、現段階では破壊発生後の亀裂の進展・会合までは十分に解析できておらず、今後の課題としたい。

4. 結 言

- (1) シェービング加工における切り口面の生成過程を弾塑性有限要素法で解析する手法を開発した。材料の破壊条件には、分離予定節点とダイ刃先との幾何学的距離、および、ひずみと静水圧による延性破壊条件を採用した。
- (2) 本手法により、シェービング加工における変形状態が、切削の変形状態から最終的なパンチーダイ間でのせん断変形へと移行する過程を解析的に求めることが可能であることを示した。
- (3) 切削の変形時に生成した加工面のひずみは1.0以下と小さいが、加工終期にはダイとパンチの刃先を結ぶライン上に集中しそれ以上の大きなひずみが生じる。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、天田金属加工機械技術振興財団の平成11年度奨励研究助成AF-99027の援助を受けたことを付記し、同財団に深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) 中川威雄, ファインブランキング, 日刊工業新聞社.
- (2) 日本塑性加工学会編, せん断加工, コロナ社.
- (3) 古閑伸裕・村川正夫・工藤武, Visioplasticityによるせん断加工現象の解析, 塑性と加工, 33-383 (1992), 1362-1367.
- (4) 古閑伸裕・湯川伸樹・及川好・村川正夫・神馬敬, Visioplasticityによるせん断工具摩耗現象の解明, 塑性と加工, 37-428 (1996), 957-962.
- (5) 小森和武, せん断加工の数値シミュレーション, 塑性と加工, 38-433 (1997), 129-134.
- (6) Taupin E. ほか3名, Material fracture and burr formation in blanking results of FEM simulations and comparison with experiments, *Journal of Material Processing Technology*, 59 (1996) 68-78.
- (7) 帯川利之・臼井英治, チタン合金(Ti-6Al-4V)の鋸歯状切りくず生成のFEMシミュレーション(第1報), 精密工学会誌, 58-6 (1992), 1092-1097.
- (8) Rice J. R. ほか3名, Recent Finite Element Studies in Plasticity and Fracture Mechanics, *Comp. Math. Appl. Mech. Eng.*, 17/18 (1979) 411.
- (9) 例えば, 笹原弘之・帯川利之, 二相合金切削の有限要素法シミュレーション, 精密工学会誌, 64-7 (1998), 1083-1087.
- (10) 竹増光家, 尾崎龍夫, 山崎進, パーティクル流れモデルによる板材のせん断加工の数値解析, 塑性と加工, 36-418 (1995), 1318-1323.
- (11) Faura F., Garcia A. and Estrems M., Finite element analysis of optimum clearance in the blanking process, *Journal of Materials Processing Technology*, 80-81 (1998), 121-125.
- (12) Brokken D., Brekelmans W. A. M. and Baaijens F. P. T., Numerical modeling of the metal blanking process, *Journal of Materials Processing Technology*, 83 (1998), 192-199.
- (13) Dae-Chelol Ko, Byung-Min Kim, Jae-Chan Choi, Finite element simulation of the shear process using the element-kill method, *Journal of Materials Processing Technology*, 72 (1998), 129-140.
- (14) 帯川利之・田口克行・笹原弘之・白樫高洋・臼井英治, せん断形切りくず生成の有限要素法シミュレーション, 精密工学会誌, 59-5 (1993), 821-826.
- (15) Shirakashi T., Feasibility of Gentle Mode Machining of Brittle Materials and Its Condition, *Proc. U.S.-Japan Symposium on High-Efficiency Damage-free Finishing of Advanced Materials*, Oklahoma, (1999), 1.
- (16) 白樫高洋, 臼井英治, 工具すくい面の摩擦特性, 精密機械, 39-9 (1973), 966-971.