

精密せん断加工の切り口面生成機構の解析的予測

東京農工大学 工学部機械システム工学科
助教授 笹原弘之
(平成11年度奨励研究助成AF-99027)

キーワード：シェーピング，切り口面生成機構，有限要素法解析

1. 研究の目的と背景

せん断加工は，一对の切れ刃を持つ工具によって材料を切断する単純な作業で瞬時に終了する加工である。切削加工など他の切断加工に比べ非常に能率的であり，機械部品製造において極めて多く用いられている。とくに，打ち抜きや穴あけなどのせん断加工は，その高い生産性から他に代わる加工法が存在せず，量産手段としては不可欠なものである。せん断製品の加工精度を向上させるために様々な精密せん断法が提案され，破壊加工であるにもかかわらず精密加工の領域に達しつつある。また，図1に示すように，せん断加工の切り口面は，だれ(Shear droop)，せん断面(Shear plane)，破断面(Rupture plane)，かえり(Burr)からなっている。そのため精度向上には加工面を制御することが要求され理論解析が望まれている。シェーピ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，さん幅が非常に小さいため，図2に示すように加工初期段階はせん断変形面がパンチとダイを結ぶ線上ではなく，AB上に存在し切削的機構となり，加工終期になるとパンチとダイを結ぶ線AB'上でせん断変形が起これん断的機構となる²⁾。加工工程のほとんどが切削的機構によることから，シェーピング製品の精度は全ての点で慣用せん断より優れており，特にだれの大きさは慣用せん断に比べ極めて小さくすることができる。しかしダイ刃先はいわば切削工具に相当し少しでも刃先が鈍くなると良好な加工面は得られなくなるため慣用せん断のダイよりも寿命が短く，また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などの欠点もある。それらを解決するために工具摩耗現象の解明の研究³⁾や，加熱シェーピング法や高速シェーピング法の開発が行われている。村川ら⁴⁾は高速シェーピング法について実験を行いシェーピング速度やさん幅が加工面に及ぼす影響を調べた。その結果，最適な加工条件を用いれば高精度の切り口面が得られることを確認している。しかし解析によりシェーピング加工の加工面の生成について研究された例はあまり見あたらない。現在，有限要素法を用いた塑性加工のシミュレーションが盛んに行われており，せん断加工においてもシミュレーションによる理論解析が広く望まれている。小森ら⁵⁾は，剛塑性有限要素法を用い，材料破壊後の亀裂の進展挙動をシミュレーションできるプログラムを開発した。また，犬

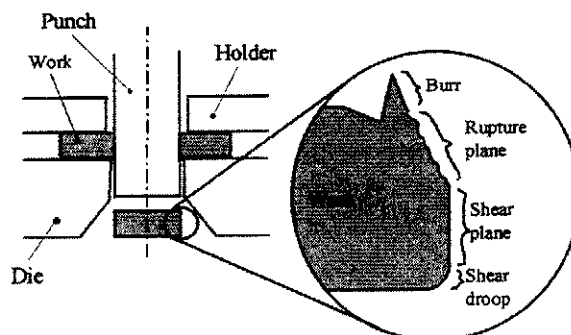
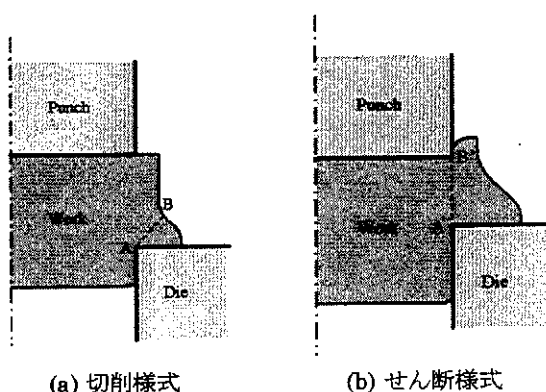


図1 せん断加工面



(a) 切削様式 (b) せん断様式

図2 シェーピングにおける変形様式の変化

飼ら⁶⁾は，剛塑性有限要素法を用いて工具刃先付近に細かい要素を配置し，リメッシングを繰り返すことにより，せん断加工の亀裂が入る直前までのシミュレーションを行った。しかし，これらの研究では剛塑性有限要素法が用いられており，弾性ひずみや残留応力が考慮されていない。また，シェーピング加工のようにさん幅が非常に小さい場合のさん幅の影響についての解析もほとんど行われていない。そこで本研究では，切削期からせん断期への移行，せん断期でのせん断面での材料の延性破壊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い，加工面の生成状態について解明することを目的とする。

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

表1 解析条件

Work material	70%Cu-30%Zn brass	
Punch speed	mm/sec	500
Clearance	mm	0.01
Work piece thickness	mm	2.0
Scrap strip allowance	mm	0.1

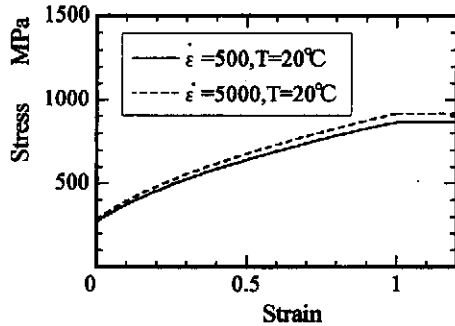


図3 流動応力特性

となっている。工具刃先は丸みのないシャープなものとする。固定されたダイに対し、パンチの接触しているABと材料左端のBCにパンチ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・離脱の判定も行うようになっている。

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%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い。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。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。

また、シェービング加工の進行に伴って、まずは切削様式の切りくずが生成するが、本シミュレーションでは図5に示すようにダイの通過予定面上の節点を次々と分離させることにより実現した⁷⁾。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さん幅の1/50以内に到達している。
 - 2) 前回分離した切りくず側の節点がダイ面上にある。
- また、工具・切りくずの接触面は、切削の解析で妥当性が

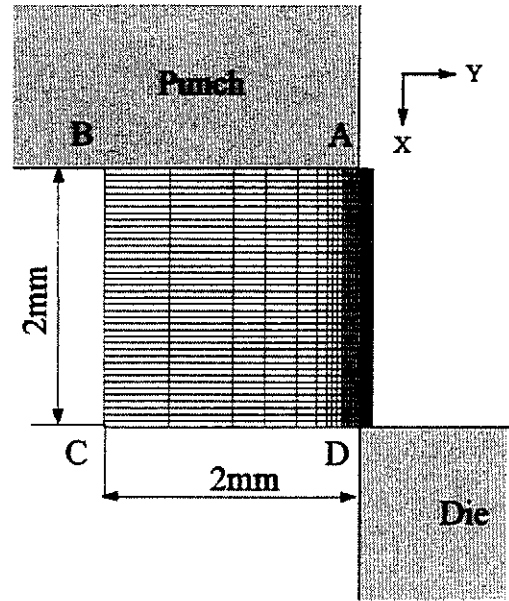
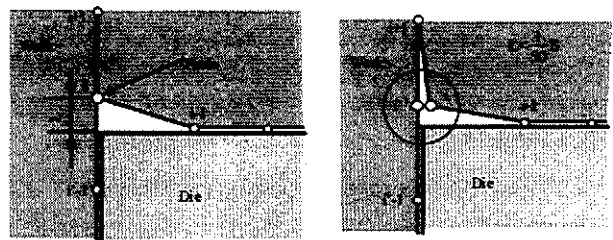


図4 有限要素モデル



(a) 節点分離前

(b) 節点分離後

図5 工具刃先での節点分離

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¹⁰⁾。ただし σ_t 、 τ_t は工具面上の垂直応力と摩擦応力、 τ_e は着目点の切りくずのせん断流動応力、 λ は摩擦特性定数である。本解析では $\lambda=0.1$ とした。

さらに、加工が進むとシェービング加工では、加工終期はせん断的機構となり亀裂が発生し材料が破断分離する。古閑ら¹⁰⁾は、せん断加工において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の等高線が発生し、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している。また竹増ら¹¹⁾によると、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、実験では亀裂が発生するという結果が得られている。Fauraら¹²⁾は、シミュレーションにおける材料分離の条件としてひずみの大

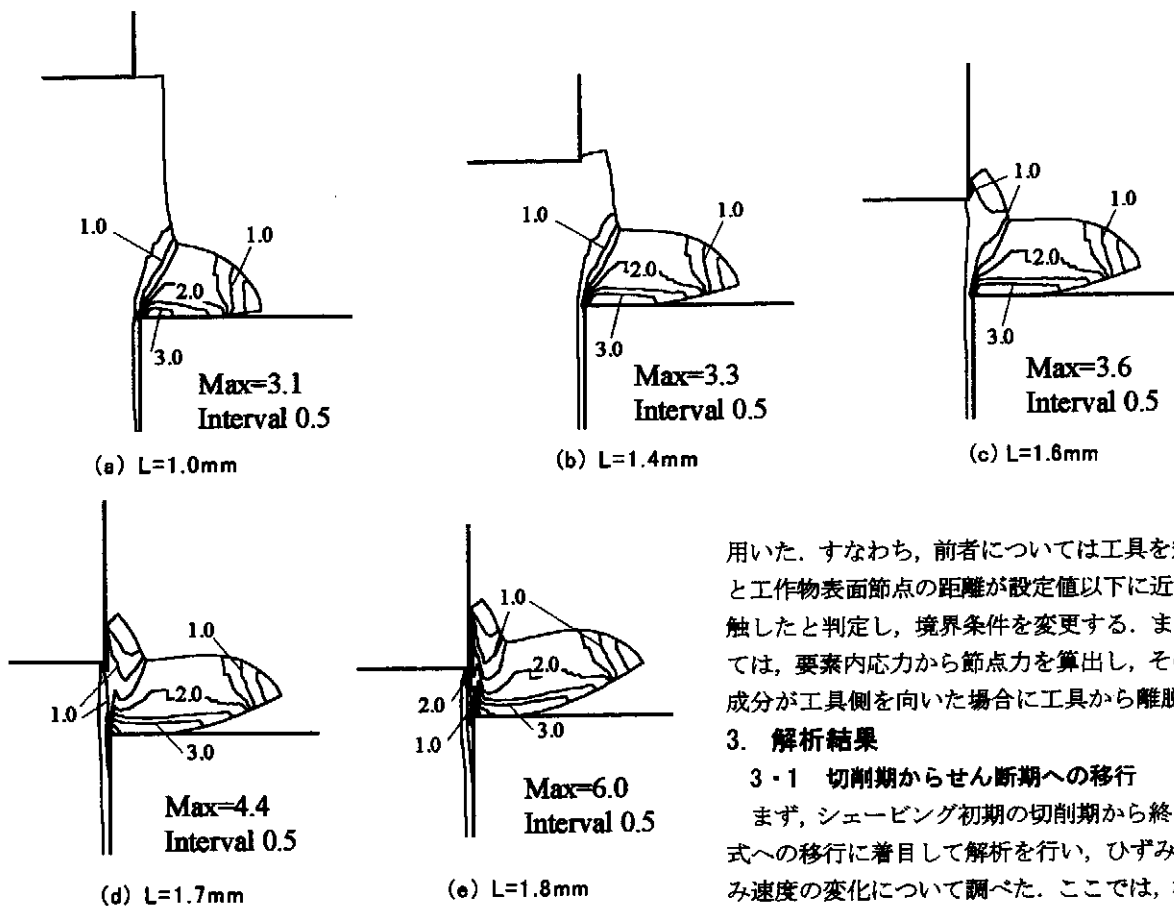


図6 加工進行に伴う相当塑性ひずみの変化

きさを用いており、他のシミュレーションでもひずみや最大主応力などが用いられている^{13),14)}。本研究ではひずみと静水圧により判定する方法をとる。

せん断期の延性破壊¹⁵⁾の発生条件を式(2)に示す。基本的にはひずみ基準の条件であるが、静水圧が引っ張り状態であるほど破壊が発生しやすくなるものとした。

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

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。

破壊した材料の分離の方法は、節点を分離させるのではなく破壊の生じた要素の剛性を極めて小さくすることでほとんど応力を受け持たせないようにした¹⁶⁾。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、要素特性の変更により急激に応力を受け持つことができなくなり、応力の不釣り合いが生じる。そのため、弾性要素になったことで起こる変形が落ち着くまで工具を止めて数回計算を行い、応力の不釣り合いが十分小さくなってから再び通常の切削過程の計算を行うこととしている。

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を規定する輪郭線と工作物表面節点の距離が設定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力を算出し、その工具に垂直な成分が工具側を向いた場合に工具から離脱するとした。

3. 解析結果

3-1 切削期からせん断期への移行

まず、シェーピング初期の切削期から終了期のせん断期への移行に着目して解析を行い、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6に相当塑性ひずみ分布の変化を示す。同図(a),(b)においてダイ刃先から取り代方向へ等高線が伸びており、パンチ側ではひずみは発生していない。この状態は全く切削状態そのものであり、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。さらに加工が進むとパンチ刃先と側面でもひずみが大きくなり、ダイ刃先からパンチに向かってひずみが増加していく様子が見られる。

図7にひずみ速度の分布を示す。同図より、せん断変形域が移動していく様子が見られる。同図(a)において、ダイ刃先から取り代方向にせん断変形域があり、切削の機構であることが分かる。同図(b)以降、少しずつひずみ速度の高い部分がパンチ側へ移動していき、同図(c)ではダイとパンチを結ぶ線状に主な変形が移りつつある。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だけが変形しており切削的な変形はほとんどなくなり、いわゆるせん断的機構により加工が進んでいる。

図8に静水圧分布を示す。引っ張りを正としており、図中の塗りつぶした部分は引っ張りの領域である。加工初期において静水圧はダイ側面の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、パンチ側面でも引っ張りの静水圧が発生し、引っ張りの領域は会合する。また、ダイ刃先部分は引っ張りとは境界で、パンチ側面が引っ張りの領域となってい

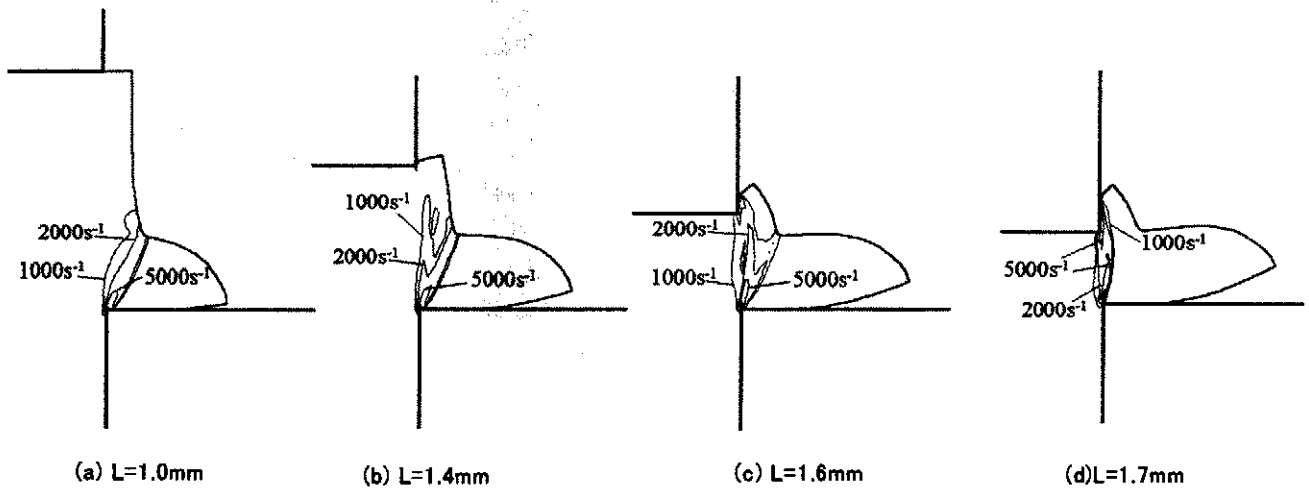


図7 加工進行に伴うひずみ速度分布の変化

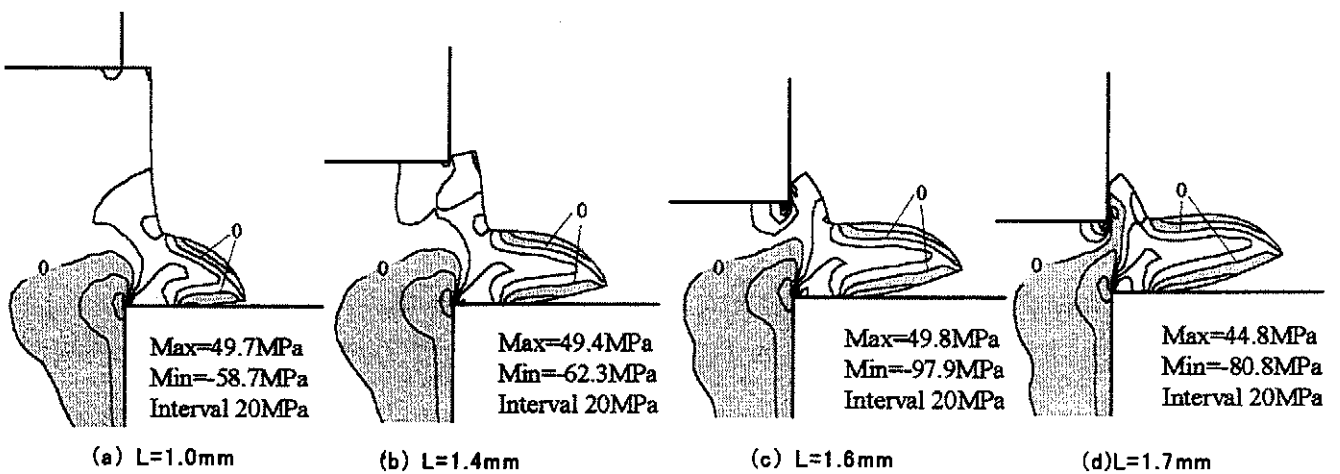


図8 加工進行に伴う静水圧分布の変化

る。パンチ刃先に引っ張りの領域が表れる以降でも、パンチ刃先は引っ張りと圧縮の境界であり、同様にパンチ側面が引っ張りの領域となっている。これはせん断加工の特徴でもあるが、その様子が表れている。

3・2 最終せん断期での材料の延性破壊

ここでは最終せん断期での材料の延性破壊までをシミュレートした結果を示す。汎用的な延性破壊条件はないため、式(3)の延性破壊発生条件における定数の違いによる影響を調べるため、定数を表1に示すような組み合わせについて解析を行った。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。

図9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た要素である。同図(a)において、まずダイ刃先部で破壊が生じた。加工が進

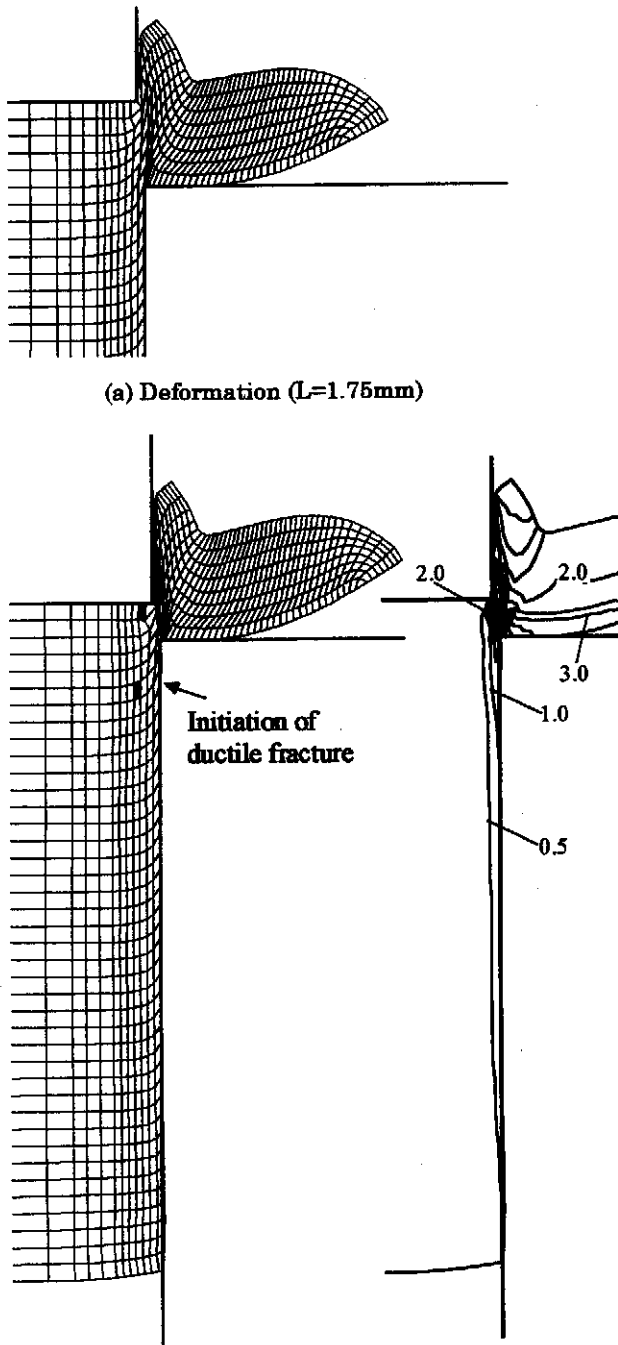
むと、同図(b)に示すように、亀裂はダイから発生したものはパンチに、パンチ側から発生したものはダイに向かってそれぞれ進展していくが、パンチにおいては側面で破壊が発生しており、かえりが発生することが予想される。しかし、メッシュが粗く、特にパンチ側においては要素が大きく伸びて変形していることが精度を低下させている。

同図(c)には加工面での相当ひずみの分布を示すが、切削前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・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。破壊条件は不問としても、延性破壊が生じる部分もこの辺りである。従ってこの手法により切削期で生じる切り口面とそれ以外の切り口面を予測できるということになる。

本シミュレーションでは、メッシュが粗いことが要改善点として挙げられる。このために亀裂の進展・会合が思うように進まず、材料の完全分離にまでは至らなかった。さらに詳細に切り口面性状について解析するためには、せん断的機構により分離すると思われる部分の有限要素分割を細かくするあるいは適宜リメッシュを行うなどの必要があ

表2 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



(a) Deformation (L=1.75mm)

(b) Deformation(L=1.89mm) (c) Strain distribution

図7 延性破壊の発生 ($\epsilon_0=5.0$, $\alpha=0.4$)

る。

4 結 言

- (1) 本手法により、シェーピングにおける切削的機構から最終的なパンチ-ダイ間でのせん断変形への移行が解析的に求めることが可能であることを示すことができた。
- (2) 材料の延性破壊条件を取り入れることにより、切り口面の生成機構について示すことが可能となった。その際パンチ側に比べひずみが大いダイ刃先から破壊が生じき裂となることがわかった。また、ダイでは刃先から、パンチでは工具側面から亀裂が発生する。そのため、パンチ

側でかえりが発生すると考えられる。

参考文献

- 1) 日本塑性加工学会編：せん断加工，コロナ社
- 2) 中川威雄：ファインブランキング，日刊工業新聞社
- 3) 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
- 4) 村川正夫，古閑伸裕，荻野勝俊：高速プレスシェーピングに関する研究，第43回塑性加工連合講演会(1992)，19
- 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
- 6) 犬飼佳彦，吉田佳典，湯川伸樹，石川幸司，神馬敬：せん断加工の剛塑性FEMによる変形解析(第1報)，塑性加工春季講演会論文，38-439(1997)，422
- 7) 帯川利之，白井英治：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。
- 8) J. R. Rice, R. M. McMeeking, D. M. Parks and E. P. Sorensen : Recent Finite Element Studies in Plasticity and Fracture Mechanics, Comp. Math. Appl. Mech. Eng., 17/18 (1979) 411.
- 9) 白樫高洋，白井英治：工具すくい面の摩擦特性，精密機械，39-9(1973)，966
- 10) 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)，
- 11) 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
- 12) F.Faura, A.Garcia and M.Estremis : Finite element analysis of optimum clearance in the blanking process, Journal of Materials Processing Technology, 80-81(1998), 121-125
- 13) D.Brokken, W.A.M.Brekelmans, F.P.T.Baaijens : Numerical modeling of the metal blanking process, Journal of Materials Processing Technology, 83(1998), 192-199
- 14) 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
- 15) 帯川利之，田口克行，笹原弘之，白樫高洋，白井英治：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
- 16) SHIRAKASHI Takahiro : Feasibility of Gentle Mode Machining of Brittle Materials and Its Condition, New Developments in the Finishing of Advanced Materials(1999)，1