

せん断加工の破壊現象を考慮した 剛塑性有限要素法による変形解析

名古屋大学大学院 工学研究科
助教授 湯川伸樹
(平成9年度研究開発助成AF-97015)

キーワード：せん断加工，延性破壊，FEM，Garson，ポイド

1. 緒言

近年，FEMは多くの塑性加工問題に適用され成果をあげているが，せん断加工に適用した例は限られていた¹⁾⁴⁾。その理由は，(1) ポンチ，ダイス刃先近傍要素の工具への侵入，(2) 非常に狭い範囲に変形が集中することによる要素の大きな歪み，(3) 材料の破壊条件の不明確さなどをあげることができる。(1)の問題を解消するために一般には特異点が使われることが多い。しかしこの場合，工具の刃先形状の差による変形挙動の違いは考慮されず，また特異点の種類によってはその周辺のひずみ連度が無限大になるなどの問題があった。

そこで本研究ではまず特異点を用いず，工具の刃先付近及びせん断域に非常に細かい要素を配置した上でリメッシングを繰り返す手法を検討した。そしてこれにより，(1)及び(2)の問題を解消し，材料に亀裂が入る直前までの解析を可能であることを示した。

また(3)の問題に対しては，空孔の影響を考慮した修正Garson型降伏条件式をシステムに取り入れることにより，問題を解消する試みを行なった。空孔率にある値を設定することにより延性破壊条件式とし，静水圧応力とポイド率に着目し，割れの発生及び進展の予測を行なった。そして円弧近似した工具の刃先の半径およびクリアランスを変化させて解析を行い，ひずみ及び応力分布に対する刃先形状の影響とクリアランスの影響を検討した。

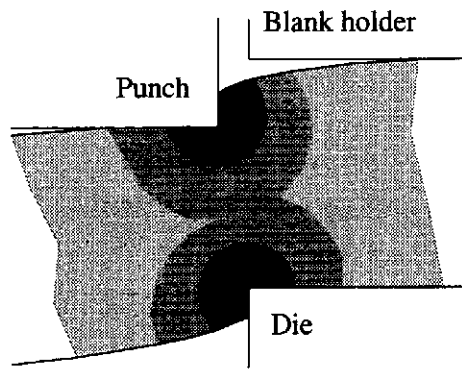
2. 解析方法

2.1 リメッシング

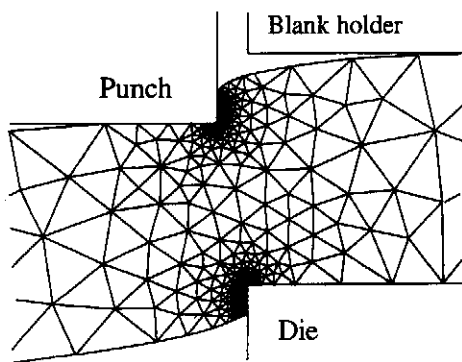
せん断加工では極めて狭い領域に大きな変形が集中するため，有限要素法を用いて解析をしようとすると要素が数ステップですぐに潰れてしまい，解析を続行することが不可能になってしまう。従って，解析途中での要素の再構成（リメッシング）を行うことが必要である。また実際のポンチ・ダイスの刃

先形状を正確に解析に取り込むためには，刃先付近の要素を十分細かくする必要がある。しかし，全ての解析領域を細かい要素で分割することは，計算機の記憶容量，計算時間の点で不合理であるため，初期メッシュ，リメッシュ時共にメッシュサイズを解析領域内でコントロールすることが重要である。本研究では，筆者らが開発したリメッシング機能付き剛塑性有限要素解析プログラム⁵⁾を使用した。このプログラムでは解析領域をいくつかの副領域（サブドメイン）に分割し，それぞれに要素サイズを指定してメッシュ生成を行うことが可能なメッシュジェネレータが組み込まれている。メッシュ生成は，それぞれのサブドメイン内にそれぞれのメッシュサイズ間隔で節点を配置し，それらを適切に結び付けることによって行われる。また本研究においては，要素が大きく変形するポンチとダイスの刃先周辺領域及びせん断域内とその他の領域とでは必要とするメッシュのサイズは大きく異なっている。従って，要素サイズの差の大きいサブドメイン同士を隣接させてメッシュ生成を行うと，その境界付近で最初から大きく歪んだ要素ができてしまう。そこでサブドメインを数段階用意し，メッシュの大きさを徐々に変化させるような工夫を採用することで，隣り合うメッシュのサイズが大きく変化しないような要素配置とした。

Fig.1にリメッシング時のサブドメインならびにそれをもとにしてメッシュを作成した例を示す。本研究では中間節点をもつ三角形二次要素を採用したため，材料の外形状を表わすのにリメッシング前の節点全てを採用すると，材料の自由表面には設定したメッシュサイズより短い節点間距離で節点が存在することになり，細長い形状のメッシュが数多く発生する。これを防ぐためには，自由表面上の節点を材料の形状が大きく変わらない程度に省くことが必要となる。そのため節点の重要性を判定し余り重要でない節点を省く処理をするという方法を用いた。



(a) Example of subdomain



(b) Mesh generated from subdomain (a)

Fig.1 Example of subdomain and mesh

リメッシングを行うタイミングは、要素の節点間距離の変化率をもとに判断した。すなわち、初期もしくはリメッシング直後のメッシュにおける節点間距離と変形後の節点間距離の比率の最大値がある一定値より大きくなったところで、リメッシングを実行した。本研究では、節点間距離の比率が1.6倍となったときにリメッシングを実行した。これによってこの場合、4～6ステップ毎にリメッシングが行われた。

2.2 降伏条件式

空孔の影響を考慮した降伏関数の一つにGurson型降伏関数がある。これは無限媒体中に1個の球形または円筒状空孔が存在する場合の解析に基づいたものである⁶⁾。また、Tvergaardは空孔が格子状に規則的に並ぶ多孔質体の連続体モデルの数値計算とを比較してGurson型降伏関数に係数を導入し、修正を提案している⁷⁾。本解析ではTvergaardによる修正Gurson型降伏関数を用いた。降伏関数を次式に示す。

$$F(\sigma_{ij}, \sigma_M, f) = \frac{3}{2} \frac{\sigma'_{ij} \sigma'_{ij}}{\sigma_M^2} + 3f^* \cosh\left(\frac{\sigma_{kk}}{2\sigma_M}\right) - \left(1 + \frac{9}{4} f^{*2}\right) = 0$$

ここで σ_{ij} は空孔を含んだ連続体に作用するCauchy応力、 σ_M は母材の降伏応力である。 f は空孔体積率である。

2.3 損傷発展式

損傷発展式は次式で表わされる。

$$\dot{f} = \dot{f}_{nucleation} + \dot{f}_{growth}$$

$\dot{f}_{nucleation}$ は空孔生成による体積率増分で、 \dot{f}_{growth} は空孔成長による体積率増分である。

空孔生成及び成長にはひずみ誘発モデルを採用した⁸⁾。空孔生成による体積率増分は次式で表わされる。

$$\dot{f}_{nucleation} = D \dot{\epsilon}_M$$

$$D = \frac{f_N}{s_N \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_M - \epsilon_N}{s_N}\right)^2\right\}$$

ここで、 $\dot{\epsilon}_M$ は母材の相当ひずみである。また、 ϵ_M は第二相または不純物などの粒子の体積率、 s_N は粒子分布の標準偏差、 ϵ_N は空孔生成ひずみである。

空孔成長による体積率増分は次式で表わされる。

$$\dot{f}_{growth} = (1-f) \dot{\epsilon}_{kk}$$

ここで $\dot{\epsilon}_{kk}$ は体積ひずみ速度である。

2.4 仮想相当ひずみ

空孔生成は平均応力が引張場でのみ起こると考えられる。損傷発展式における空孔生成項は母材の相当ひずみの関数となっているが、平均応力場が引張である時のひずみのみを積分した仮想相当ひずみを代入している。

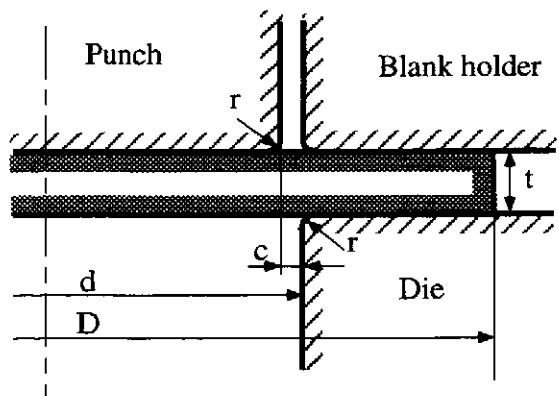
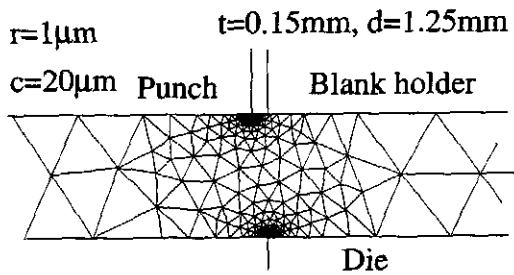


Fig.2 Calculation condition

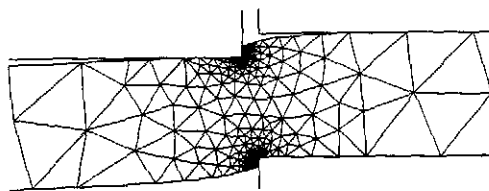
3. 解析例

3.1 変形解析の例

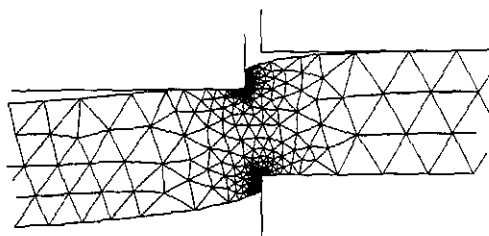
板押さえによってダイスに固定された板材を打抜くせん断加工を、平面ひずみ問題として解析した。まず亀裂の発生を考慮しない通常の剛塑性FEM解析によって計算した例をFig.2に示す。板厚は $t=0.15\text{mm}$ 、ダイス間距離は $d=1.25\text{mm}$ で、ポンチ及びダイス刃先半径は $r=1\mu\text{m}$ (板厚の0.67%)、工具材



(a) 0th step (initial mesh)



(b) 60th step (20%t)



(c) 90th step (30%t)

Fig.3 Meshes at each stage

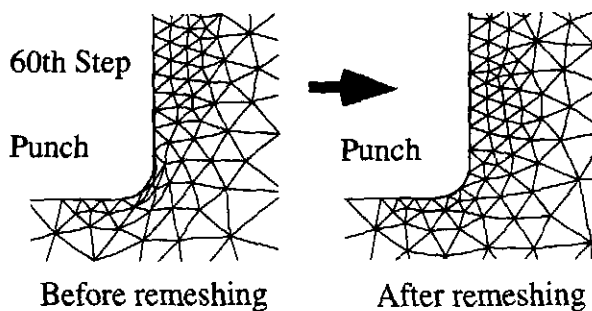
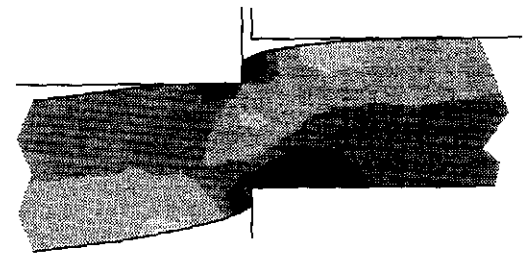


Fig.4 Meshes near punch corner

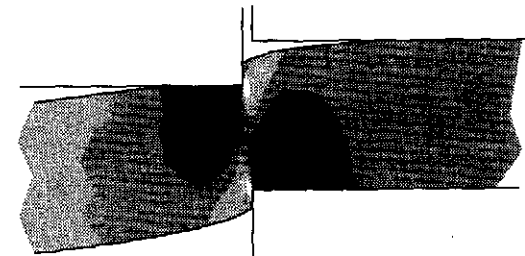
料間の摩擦係数は $\mu=0.1$ とした。クリアランスは $c=20\mu\text{m}$ (板厚の13%)である。計算中のメッシュの例をFig.3及びFig.4に示す。ポンチ及びダイス刃先付近においても加工が進行してもメッシュが正規の形状に近い形を保っている様子がわかる。

ポンチを板厚の30%押し込んだ状態 (Fig.3 (c)) における σ_x と σ_y の分布をFig.5に示す。この図から分かるように σ_y の高い圧縮場がポンチ底部及びダイス上部に発生する。また σ_y の引張場は、ポンチ横部に現れている。 σ_x の圧縮場もポンチ及びダイスの横部に見られ、側圧力が工具にかかっていることがわかる。

Fig.6は圧下率30%時の平均応力 σ_m 分布である。引張応力領域がポンチとダイスの横部に現れてい



(a) σ_x



(b) σ_y

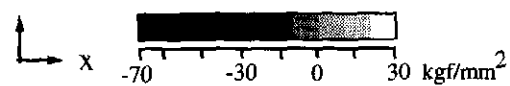
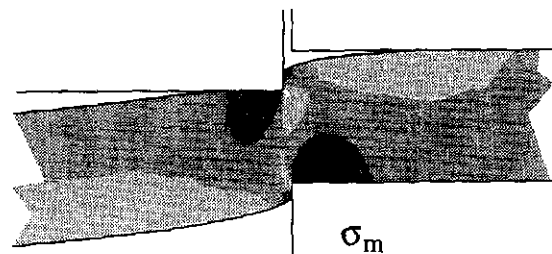


Fig.5 Distribution of normal stresses



σ_m

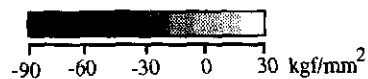


Fig.6 Distribution of mean stress

る。材料破壊は引張の平均応力と密接に関係しており、亀裂の発生はこの領域で起こるものと考えられる。割れがこの引張平均応力が最大となる点で発生すると仮定すると、バリの大きさはポンチ横部の引張応力が最大となる点のポンチ底からの高さ h を計算することによって予測できると考えられる。

Fig.7にポンチの押し込み率に対する先に述べた h と、実験結果から測定されたバリ高さとの比較を示す。板材及び工具寸法は板厚 $t=3.0\text{mm}$ 、板幅 $D=45.0\text{mm}$ 、ダイス間距離 $d=25.0\text{mm}$ 、ポンチ及びダイスの刃先半径 $r=20\mu\text{m}$ (板厚の0.67%)、クリアランス $c=0.2, 0.4\text{mm}$ (それぞれ板厚の6.7%, 13.3%)とした。実験値において亀裂が発生する押し込み率は、板材が破断したときのだれとせん断面の長さを合計し、板厚で除したものをを用いた。実験結果にかなり

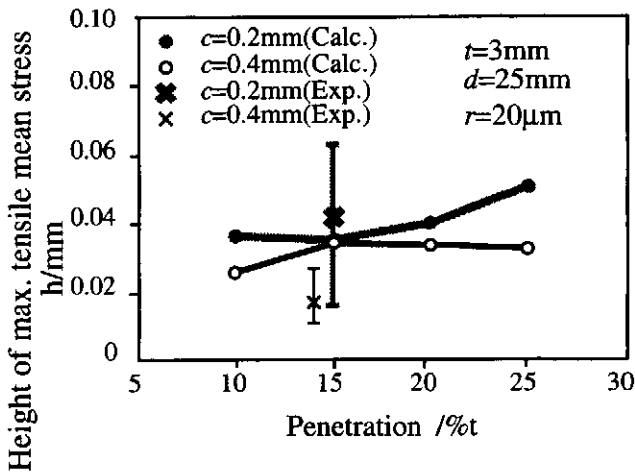


Fig.7 Change of height 'h' of maximum tensile mean stress

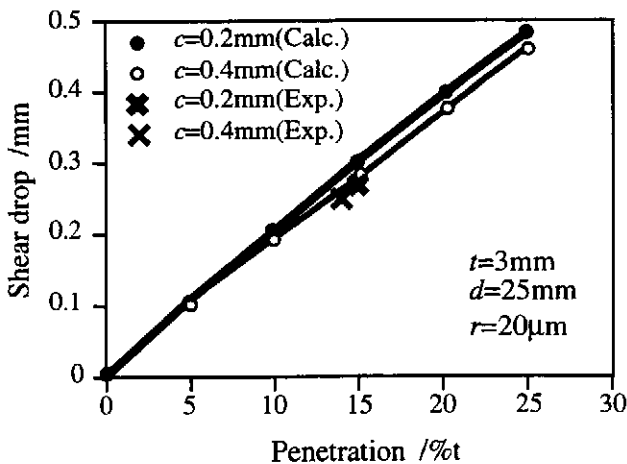


Fig.8 Change of shear drop

のばらつきが見られるものの全体として計算結果と実測値はほぼ一致しており、本研究の手法である程度バリ高さの予測が行えるものと考えられる。同一条件の計算におけるだれ量の変化をFig.8に示す。この計算値も実測値と良く一致している。

打抜き加工を連続して行う際には、様々な形態の工具磨耗が発生する。本研究では磨耗のモデルとして、工具刃先半径を単純に大きくしたものの解析を行なった。Fig.9は工具刃先半径を $r=1, 2.5, 5\mu\text{m}$ としたそれぞれの、圧下率30%における平均応力の分布を示す。工具刃先半径が大きくなると引張平均応力領域が大きくなっているのがわかる。しかし、刃先半径が大きくなるにつれて引張平均応力の最大値は小さくなっており、これは磨耗した工具を使用した場合割れの発生が遅くなることを意味している。また、工具刃先半径が大きくなると平均応力が引張りで最大になる点の高さ h は大きくなる。これは工具が磨耗するとバリが大きくなって行くことに相当している。

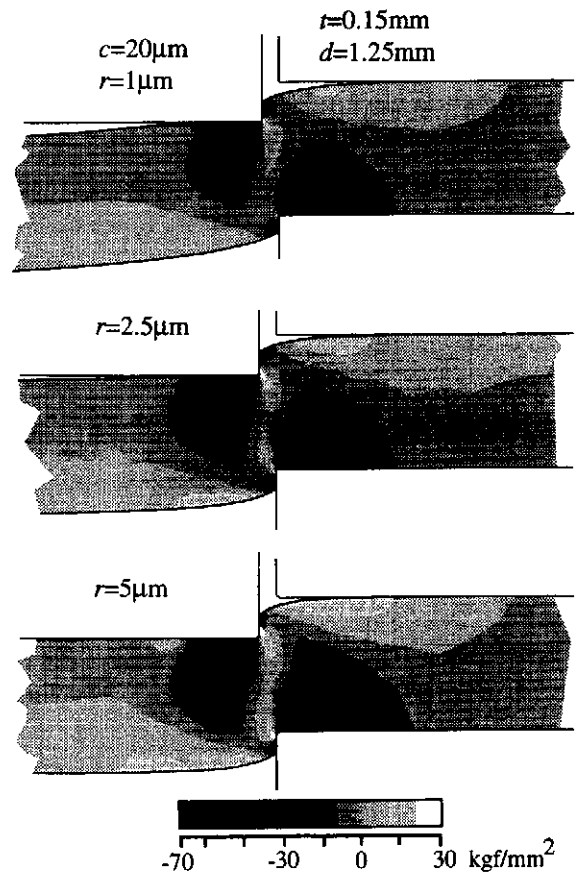


Fig.9 Influence of tool corner radius on distribution of mean stress(30%t)

3.2 亀裂の発生予測

ここまでの解析で、せん断加工における亀裂発生前までの応力分布や、それを基にした亀裂発生位置の予測等が可能であることを示した。しかしながら、亀裂発生後の板の変形挙動、亀裂の進展方向等については、材料の破壊現象を考慮した解析を行なう必要がある。そこで、2節で示したGurson型降伏関数を解析に組み込み、亀裂の発生・進展を含めたせん断加工の解析を行なった。

Fig.2に示したものと同様の打抜き加工における亀裂発生過程の例を示す。材料はS60Cを用い、板厚は $t=3.0\text{mm}$ 、板幅は $D=45\text{mm}$ 、ダイス間距離は $d=25\text{mm}$ 、とした。また、工具刃先は円弧で近似しその半径を変化させることによって工具磨耗の影響を

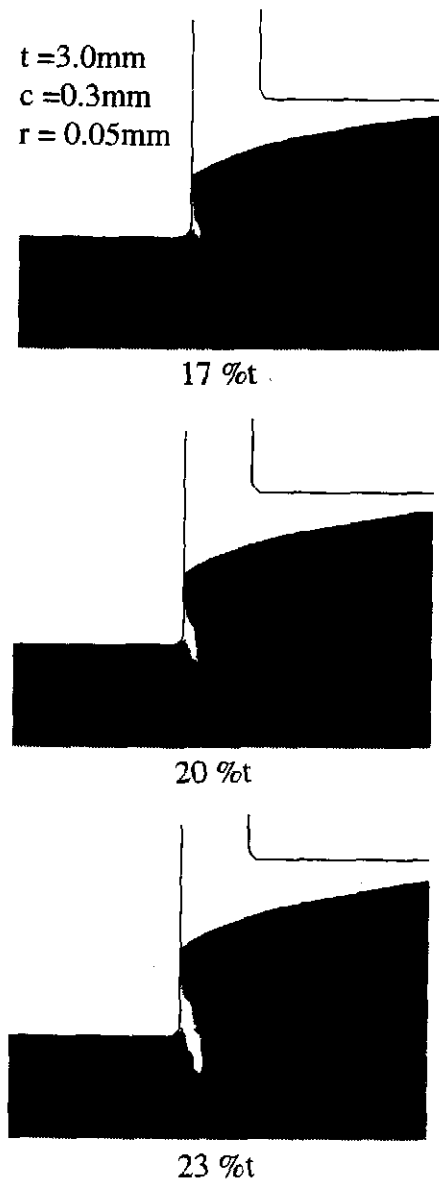


Fig.10 Crack initiation and growth

解析に取り入れた。工具-ダイス間クリアランスの影響を調査するために、 $C=0.2, 0.3, 0.4\text{mm}$ (それぞれ板厚の6.7%, 10%, 13.3%)と変化させて解析を行った。亀裂は、 $f=0.25$ を越えた時点で発生したと仮定したが、その際に要素を取り除くなどの特別な処理は行わずに計算を進めた。亀裂の表現は、数値を越えた領域をポストプロセッサで白く表示することで行っている。

Fig.10に $r=50\mu\text{m}$ 、 $c=0.3\text{mm}$ としたときの圧下率20% t での空孔率分布を示す。亀裂が発生し、進展する様子が再現されている。ポンチ横部の空孔率が最大の点を計測することによってバリ高さの予測が可能であると考えられる。

4. 結言

剛塑性FEM解析を用い、工具刃先付近に細かい要素を配置してリメッシングを繰り返して行なうことにより、せん断加工の変形解析が行なうことが出来た。そして以下の結果を得た。

- (1) せん断加工が進むにつれ、ポンチ及びダイス側面に平均応力が引張りとなる領域が現れ、拡大してゆく。
- (2) ポンチ側面の最大引張平均応力位置は、工具刃先半径が大きくなると高くなる。これはバリが大きくなることに相当する。
- (3) 空孔の影響を考慮した降伏条件式をFEM解析に導入することによって、破壊を含んだせん断加工の変形解析を実現し、工具刃先から空孔が生成、成長する様子が確認された。

謝辞

本研究の遂行にあたり、(財)天田金属加工機会議術振興財団の研究助成を受けたことを付記し、財団および関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高石和年・前田禎三：塑性と加工，21 - 236 (1980)，784.
- 2) 小森和武：塑性と加工，38 - 433 (1997)，129.
- 3) 竹増光家・尾崎龍夫・山崎進：塑性と加工，36 - 418 (1995)，1318.
- 4) Etienne Taupin, Jochen Breitling, Wei-Tsu Wu, Taylan Altan :J. Mater. Process. Technol., 59 (1996)，68.
- 5) 湯川伸樹，石川孝司，難波広一郎：塑性と加工，36 - 410 (1995)，248.
- 6) A.L.Gurson:Trans.ASME.J.Eng.Mat.Tech., 99(1977),2.
- 7) V.Tvergaard:Int.J.Fract.,17(1981),389.
- 8) J.Home,et al.:Int.J.Fract.,81(1972),99.