

せん断加工特性に及ぼす金型弾性変形の影響

名古屋大学大学院 工学研究科 マテリアル理工学専攻
助教 吉田佳典
(平成 17 年度研究開発助成 AF-2005009)

キーワード：せん断加工，金型弾性変形，有限要素解析

1. 研究の目的と背景

せん断加工は材料の分離加工として，その高生産性および高歩留り性から広く用いられている。しかし，加工部にはだれ，かえりおよび破断面などの不具合が生じるため，最適加工条件を求めるための研究が盛んに行われてきた。また近年，計算技術の急速な発達によって数値解析によって理論的に研究する例が増加してきた¹⁻⁵⁾。

せん断加工の加工品質を左右する加工パラメータの1つにパンチ-ダイス間クリアランスが挙げられる。これは打抜き形状に応じて，例えば平面ひずみ打抜きまたは軸対称打抜きおよび異形抜きなどの形態に応じて経験的に決定される。打抜き工具は加工中に弾性変形を生じるため，クリアランス変化を見込んだ初期設定が重要となる。しかしながら同一工具においても，被加工材が変化すれば荷重レベルが変化し，クリアランス変化量が変化することは想像に難くない。また，これらが定量的に調査された例はあまり見られない。さらにばり高さをはじめとする加工品質に及ぼす影響について調査した例も少なく，詳細な研究が必要であると考えられる。

本研究では，延性破壊を考慮した剛塑性有限要素解析を用いて工具が剛体の場合での平面ひずみおよび軸対称せん断加工について変形解析を行った。き裂進展ならびにばり高さについて実験結果と比較する事によってその解析精度を検証するとともに，せん断加工条件との関係性を考察した。また，金型にひずみゲージを設置することによって，軸対称せん断加工中のパンチ-ダイス間クリアランスの変化を実測し，解析結果と比較することによって金型弾性変形がばり高さに及ぼす影響について考察した。

2. 実験方法

本研究においては平面ひずみおよび軸対称せん断加工において加工部性状に及ぼすクリアランスの影響について調査した。また軸対称せん断においては打抜き半径の影響についても考察し，金型弾性変形量の実測を行いこれに及ぼす鋼種の影響について調査した。

2.1 せん断加工実験

平面ひずみおよび軸対称せん断における亀裂進展の違いについて，またばり高さに及ぼす打抜き条件の影響について調査することを目的にせん断加工実験を行った。

被加工材には SPCC を用い，板厚は $t=1.2\text{mm}$ で一定とした。パンチ半径及びパンチ幅を $R=2.0, 4.0$ および 8.0mm とし，クリアランスを $c=2.5, 5.0, 7.5$ および $10\%t$ (板厚に対する割合) と変化させた。打抜き条件はダイスによって被加工材を固定し，カウンターパンチの無い慣用抜きとした (Fig. 1)。

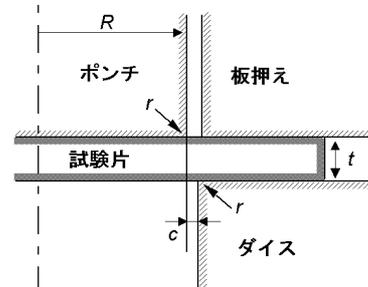


Fig. 1 実験模式図

2.2 金型弾性変形量測定実験

軸対称せん断加工中におけるクリアランス変化を計測し，ばり高さとの比較を行うことを目的として金型弾性変形量測定実験を行った。

被加工材には S60C, SPCC および SUS301 を用い，板厚は $t=1.2\text{mm}$ で一定とした。打抜き半径は 8mm で一定とし，初期クリアランスは $C=0.12$ および 0.03mm (それぞれ板厚の 10 および $2.5\%t$) の 2 水準とした。打抜き条件は前節せん断実験と同様に板押えとダイスによって被加工材を固定し，カウンターパンチの無い慣用抜きとした。

金型はダイス鋼で焼入れを施したものとし，パンチ側面およびダイス孔内壁にそれぞれ 2 箇所にはひずみゲージを周方向に貼付した (Fig. 2)。それぞれ対辺 2 アクティブゲージ法によりブリッジ回路を組み，せん断加工中におけるパンチおよびダイスの周方向ひずみ増分を計測した。計測結果をパンチおよびダイス直径変化に換算し，その差からクリアランス増分量を算出した。同時に打抜き荷重変化も測定した。

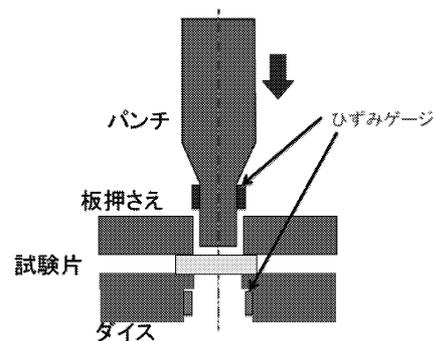


Fig. 2 軸対称せん断金型におけるひずみゲージ貼付模式図

3. 解析方法

3.1 降伏条件及び損傷発展式

本解析では Tvergaard による修正 Gurson 型降伏関数⁶⁾を用いて定式化を行っており、材料流動に及ぼす空孔の影響を考慮している。降伏関数を次式に示す。

$$F(\sigma_{ij}, \sigma_M, f) = \frac{3}{2} \frac{\sigma_{ij}' \sigma_{ij}'}{\sigma_M^2} + 2q_1 f^* \cosh\left(\frac{q_2 \sigma_{kk}}{2\sigma_M}\right) - (1 + q_3 f^{*2}) = 0 \quad (1)$$

ここで σ_{ij} は空孔を含んだ連続体に作用する Cauchy 応力、 σ_{ij}' は偏差応力、 σ_M は母材の降伏応力である。 f^* は空孔体積率 f の関数で有効空孔率であり、 q_1 および q_2 は Tvergaard⁶⁾ によって導入された修正パラメータである。

次に損傷発展式を以下に示す。

$$\dot{f} = \dot{f}_{nucleation} + \dot{f}_{growth} \quad (2)$$

空孔生成モデルは次のように示される。

$$\dot{f}_{nucleation} = D \dot{\epsilon}_M \quad (3)$$

ここで $\dot{\epsilon}_M$ は母材の相当ひずみ速度であり、生成項の係数 D は次のように表される。

$$D = \frac{f_N}{s_N \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_M - \epsilon_N}{s_N}\right)^2\right\} \quad (4)$$

ϵ_M は母材の相当ひずみであり、 f_N 、 s_N 、 ϵ_N はそれぞれ空孔生成の原因となる材料内要素の体積率、標準偏差、空孔に必要な塑性ひずみを示し、共に材料定数である。

空孔成長モデルは次のように示される。

$$\dot{f}_{growth} = (1-f) \dot{\epsilon}_{kk} \quad (5)$$

$\dot{\epsilon}_{kk}$ は体積ひずみ速度であり、空孔の成長は空孔周りのひずみにより支配されていることを示す。

3.2 き裂形状の表現

破壊の表現方法として本解析では、材料内の各点において体積空孔率 f を計算し、破壊はこれがしきい値（破壊臨界空孔率 f_F ）を上回った箇所で発生したと判断した (Fig. 3)。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、き裂の表現は空孔率が f_F 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。したがって破壊領域に材料が存在していることになるが、上で示した定式化によって空孔率が高い領域では応力を負担しないように取り扱う。

3.3 空孔生成臨界ひずみモデル

前節までに、材料内の各物体点において空孔体積率を計算し、その値がしきい値を越えた領域で破壊発生を認定するという延性破壊を考慮した剛塑性有限要素解析システムを構築した。この中で Gurson-Tvergaard 型降伏条件モデル (以下 GT モデル)^{6,7)} を用いて定式化を行い、空孔体積率の変化を記述する損傷発展式を用いて解析を行う。その中で空孔生成速度が最大となるひずみ、すなわち空孔生成臨界ひずみ ϵ_N は応力状態に関係なく材料によって決まる定数として解析を行われてきた。しかし空孔生成臨界ひずみについては応力状態に強く依存する^{8,9)}。

Hancock および Mackenzie¹⁰⁾ らは、Rice および Tracy¹¹⁾ の微小空孔成長モデルを一般の弾塑性体に拡張し、破壊発生ひずみは応力三軸度の指数関数で表現できることを示した。空孔生成臨界ひずみについても上記モデルと同様に指数関数で表現し、次式で示されると仮定した。

$$\epsilon_N = A \cdot \exp\left(B \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}\right) \quad (6)$$

ここで、 ϵ_N は空孔生成臨界時の相当ひずみ、 σ_m は平均垂直応力、 $\bar{\sigma}$ は相当応力、 A, B は材料定数である。

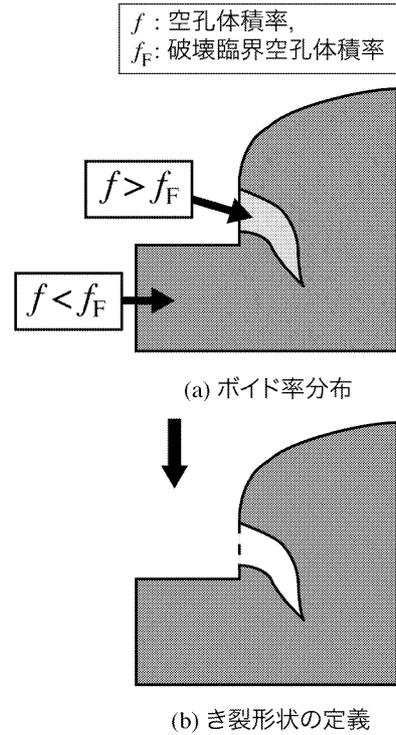


Fig. 3 セン断解析におけるき裂形状の表現方法

3.4 解析条件

せん断加工変形解析において、材料は剛塑性体、工具は剛体とし、剛塑性有限要素解析コード RIPAD2D を用い解析を行った。軸対称および平面ひずみせん断について、それぞれパンチ半径及びパンチ幅を $R=2.0, 4.0$ および 8.0 mm とし、クリアランスを $c=2.5, 5.0, 7.5$ および $10\%t$ (板厚に対する割合) と変化させた。パンチ及びダイス刃先は円弧で近似しその半径 $r=8.0\mu\text{m}$ とした。加工片は板厚 $t=1.2$ mm、鋼種は SPCC について行い、変形抵抗は引張試験より求めた。解析に用いた破壊パラメータを Table 1 に示す。

Table 1 SPCC における破壊パラメータ

Tvergaard's modified coefficient	$q_1 = \frac{3}{2}, q_2 = 1$
Initial void volume fraction	$f_0 = 0.001$
Void nucleation parameters	$f_N = 0.30$ $s_N = 0.10$
Void volume fraction at void coalescence	$f_c = 0.10$
Void volume fraction at final failure	$f_F = 0.16$
Void nucleation strain parameters	$A = 0.95$ $B = -3.08$

4. 結果と考察

4.1 せん断加工実験および解析結果

Fig. 4 に打抜き半径 2.0mm, クリアランス $C=10\%t$ の場合のパンチ刃先周辺におけるき裂生成および進展の解析結果を示す. 加工の進度を板厚に対するパンチ押し込み量の比率で表し, これをパンチ押し込み率と呼ぶ. 加工初期段階ではき裂はパンチ刃先で生じ, 徐々に内部に進展してゆく.

Fig. 5 にポンチ幅 4mm, クリアランス 10% t における平面ひずみせん断について, き裂形状についての解析, 実験結果を示す. 解析で得られたき裂形状が実験結果と良く一致をしている. 特に, き裂の進展方向, すなわちダイス側面に対する角度が良い一致を示していることがわかる.

また **Fig. 6** において, 平面ひずみモデルと軸対称モデルのき裂進展の様子を比較した. 軸対称モデルではき裂の停留が見られる. これは加工中における, 試験片のわん曲形の違いにより, き裂部の応力状態に差が生じたためだと考えられる.

Fig. 7 にき裂発生時のポンチ押し込み量に及ぼすクリアランス, ポンチ半径の影響を示す. 実験値と解析値が良い一致を示していると考えられる. また, 打抜き半径 2mm ではクリアランスが減少すると, き裂の発生が遅れていることがわかる. そこで **Fig. 8** にクリアランスの変化による応力三軸度分布の比較を示した. クリアランスが小さい方が刃先周辺の応力三軸度が小さく空孔生成が抑制されていると考えられる.

Fig. 9 に打抜き半径 2.0mm, クリアランス $C=10\%t$ の場合のパンチ刃先周辺におけるばり高さについての実験および解析結果の比較を示す. 打抜き半径の減少とともにばり高さは減少しており, この傾向は実験結果とよく一致している. しかしながら実験結果はいずれの条件においても解析結果を上回っている.

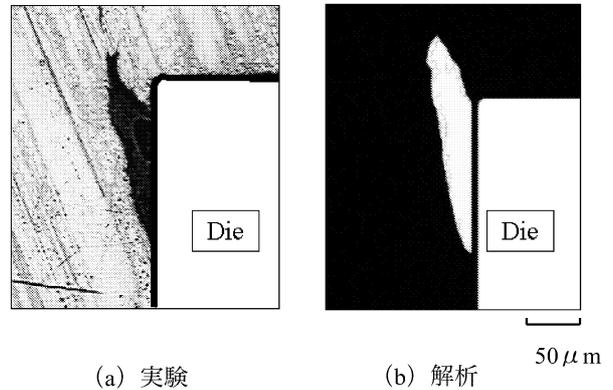


Fig. 5 き裂形状の比較 (押し込み率 53% t , 打抜き幅 4mm, $C=10\%t$, 平面ひずみせん断)

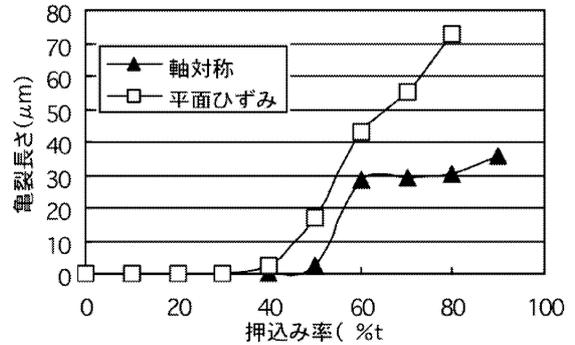


Fig. 6 平面ひずみおよび軸対称せん断におけるき裂進展の比較 (打抜き半径/幅 2mm, $C=2.5\%t$, 解析結果)

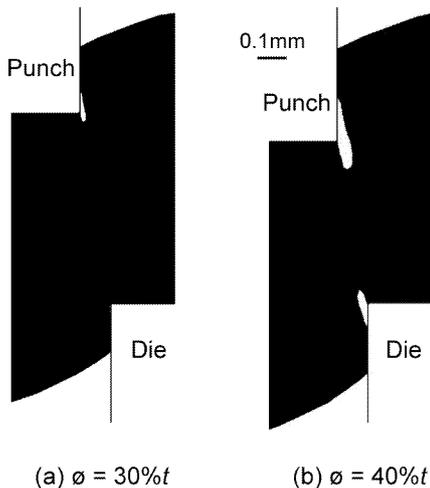


Fig. 4 解析におけるき裂生成ならびに進展の様子 (打抜き半径 2mm, $C=10\%t$)

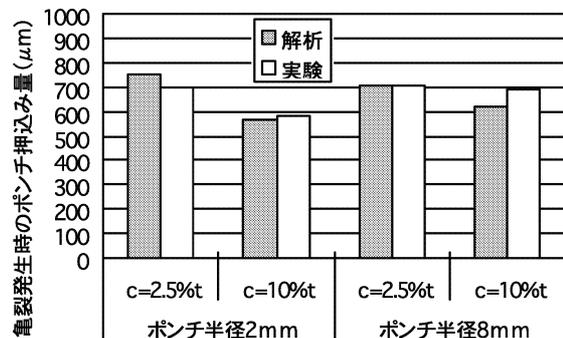


Fig. 7 き裂発生時のポンチ押し込み量に及ぼすクリアランスおよび打抜き半径の影響 (軸対称せん断)

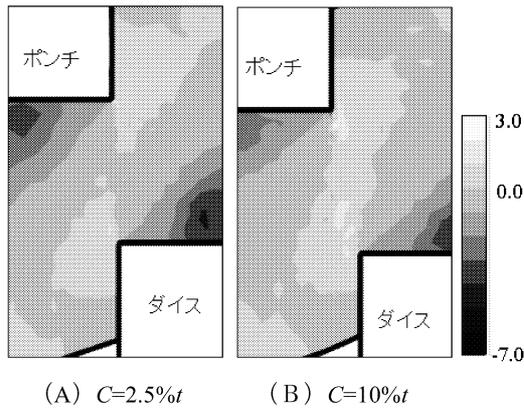


Fig. 8 せん断加工部における応力三軸度分布 (打抜き半径 2mm, 押込み率 50%t, 軸対称)

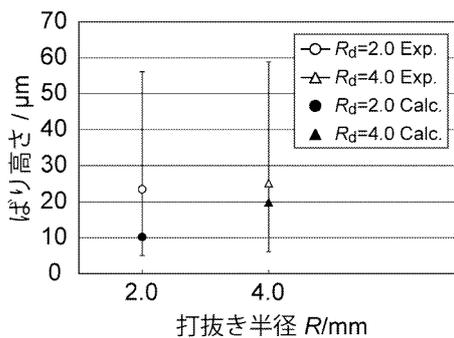


Fig. 9 ばり高さにおける実験および解析結果の比較 (打抜き半径 2mm, $C=10\%t$)

4.2 金型弾性変形解析結果

Fig. 10 に S60C の打抜き半径 8mm, 初期クリアランス $C=10$ および $2.5\%t$ 条件下における, 軸対称せん断荷重-ストローク曲線ならびにクリアランス増分-ストローク曲線を示す. 荷重について $C=2.5\%t$ においてはだれ生成過程が終了すると思われる最大荷重点を通過した後, せん断断面形成が始まりこれとともに緩やかに下降している. クリアランス増分はこれと良い対応を示しており, 最大荷重点において約 $1.0\%t$ の増加を示した. 一方, $C=10\%t$ においてはせん断断面形成開始直後のストローク位置 0.5mm 弱の地点で, 荷重が急激に下がっており, これは破断面の形成を示している. その後に荷重があがっているがこれは二次せん断面の形成を示しており, 実験結果と対応していることを確認した. クリアランス増分はやはりこれに対応しており, き裂生成における荷重解放によって急激にクリアランスが減少している.

Fig. 11 に SPCC における軸対称せん断荷重-ストローク曲線ならびにクリアランス増分-ストローク曲線を示す. S60C と同様に, 初期クリアランスの増加に伴って荷重は下がり, き裂生成時期も早まっている. 後者の傾向は Fig. 7 と対応しており, 解析精度の高さを示している. 荷重の最大値は 20kN すなわち S60C の約 $2/3$ であり, これは変形抵抗の差であると考えられる. また, クリアランス増加量も S60C に比べて非常に小さい. さらに, き裂発生後の

荷重降下が S60C に比して急であり, これらは SPCC が軟質であるためパンチ進行が素材によって妨げられにくく, 荷重解放後の弾性回復量が小さいために荷重曲線がほぼ垂直になったものと考えられる.

Fig. 12 に SUS301 軸対称せん断荷重-ストローク曲線ならびにクリアランス増分-ストローク曲線を示す. 最大荷重は 60kN で最も高く, S60C の約 2 倍の値を示した. また, 初期クリアランス $C=2.5\%t$ 条件下において破断が早期に生じており, 荷重は 0 になっている. 二次せん断は生じておらず, 実験結果と一致している. 荷重解放直後から荷重が 0 になるまでのストロークが長く, き裂生成からせん断終了までに工具に蓄えられるひずみエネルギーが高く, またせん断完了までの時間も極めて短いことが考えられる.

4.3 ばり高さにおける解析結果の差異について

Fig. 9 に示された打抜き半径 2.0mm, 初期クリアランス $C=10\%t$ の場合の円盤側ばり高さについての実験および解析結果の比較について, 解析結果が実験結果を上回った. これは金型弾性変形の測定結果から明らかなように, せん断加工中には初期クリアランスよりも大きなクリアランスで下降が進行するため, この影響でばり高さは予測よりも高い値になったものと予測される.

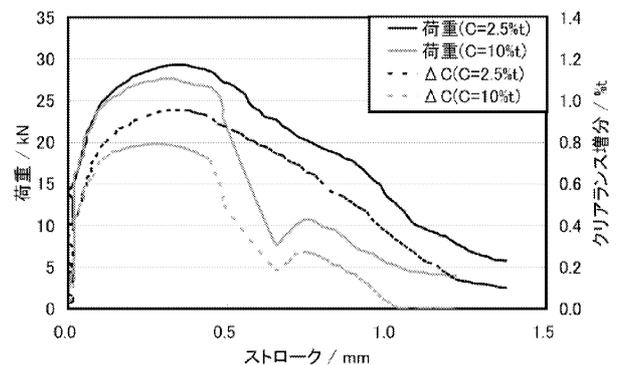


Fig. 10 S60C 軸対称せん断における荷重およびクリアランス増分に及ぼす初期クリアランス C の影響 (打抜き半径 8mm)

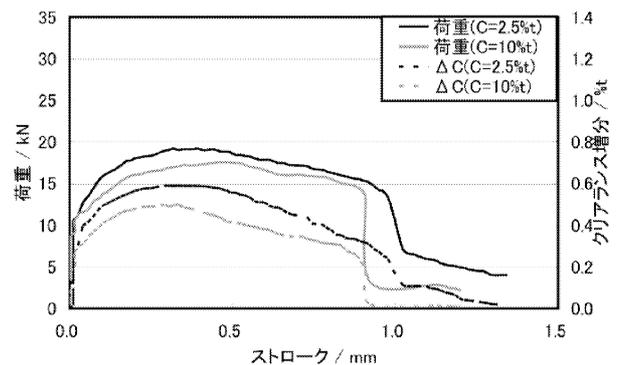


Fig. 11 SPCC 軸対称せん断における荷重およびクリアランス増分に及ぼす初期クリアランス C の影響 (打抜き半径 8mm)

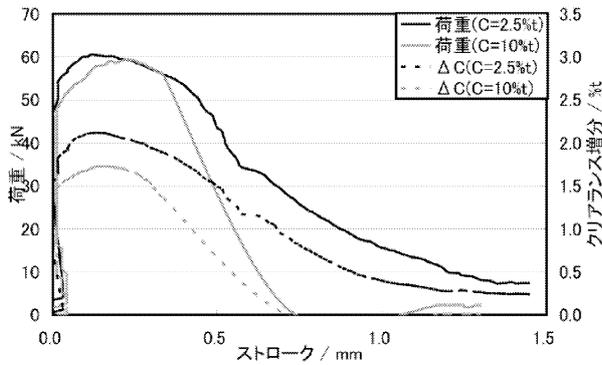


Fig. 12 SUS301 軸対称せん断における荷重およびクリアランス増分に及ぼす初期クリアランス C の影響 (打抜き半径 8mm)

Fig. 13 に金型を弾性体として取り扱い、被加工材 SUS301 の打抜き半径 8mm、初期クリアランス $C=10$ および 2.5% 条件下における、パンチ周方向ひずみ-ストローク曲線を示す。金型のポアソン比は 0.3 とし、ヤング率は $E=540$ および 270GPa として解析を行った。いずれのケースも実測値を下回り、今回の範囲内では一致を見ることはできなかった。

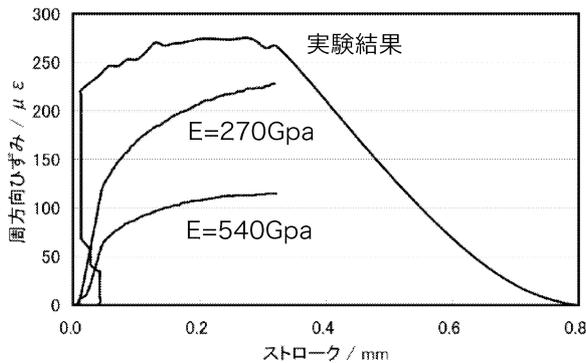


Fig. 13 SUS301 軸対称せん断におけるパンチ周方向ひずみの実験および解析結果の比較 (打抜き半径 8mm, 初期クリアランス $C=10\%$)

5. 結言

平面ひずみおよび軸対称せん断加工における加工部性状について実験結果と解析結果を比較することによって、クリアランスがせん断品質に及ぼす影響を考察した。また、軸対称せん断における金型弾性変形量を実測し、これに及ぼす鋼種の影響について考察した結果以下の知見を得た。

- 空孔の影響を考慮した破壊条件を用いることにより、亀裂形状及び進展方向において実験結果とよい一致を示した。
- 軸対称せん断において、クリアランスが小さくなると、亀裂発生が遅くなることがわかった。これは、応力三軸

度の低下により、空孔生成が抑制されたためであると考えられる。

- 軸対称せん断において、ばり高さの解析結果は実験結果と比較的良好一致を示した。しかしながら解析結果はいずれの条件においても実験結果を上回っていた。
- 金型弾性変形の影響で、せん断加工の進行に伴ってクリアランスは増加し、特に初期クリアランスが小さいほど大きくなった。特に SUS301 が顕著で、最大で $\Delta C=2\%$ 増加した。これは変形抵抗の高さに依存する。
- 軸対称せん断において、ばり高さの解析結果は実験結果と比較的良好一致を示した。しかしながら解析結果はいずれの条件においても実験結果を上回っており、これは金型弾性変形によって、加工中にクリアランスが増加したためであると考えられる。

謝辞

本研究は平成 17 年度財団法人天田金属加工機械技術振興財団研究開発助成によって行われた。ここに深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 湯川伸樹, 犬飼佳彦, 吉田佳典, 石川孝司, 神馬敬, 塑性と加工, **39**-454 (1998) 1129.
- 2) 小森和武: 塑性と加工, **38**-433 (1997), 129.
- 3) Hambli, R.: Int. J. Mech. Sci., **43** (2001), 27690.
- 4) 吉田佳典・湯川伸樹・石川孝司・細野定一・村瀬道徳: 塑性と加工, **44**-510 (2003), 735.
- 5) 吉田佳典, 村瀬泰章, 湯川伸樹, 石川孝司, 塑正と加工, **46**-532 (2005), 392.
- 6) Tvergaard, V.: Advances in Applied Mechanics, **27** (1983) 83.
- 7) Chu, C. C., Needleman, A.: Journal of Engineering Materials and Technology, **102** (1980) 249.
- 8) 大塚昭夫・宮田隆司・西村誠二・木村雅保・馬淵宗人: 材料, **29**-322 (1980), 717.
- 9) 大塚昭夫・宮田隆司・桜井勉・飯田浩: 材料, **34**-381 (1985), 622.
- 10) Hancock, J. W., Mackenzie, A. C.: J. Mech. Phys. Solid, **24** (1976), 147.
- 11) Rice, J. R., Tracy, D. M.: J. Mech. Phys. Solid., **7** (1969), 201.