

各種せん断加工に対する FEM 応力，歪解析の有用性検証

日本工業大学 工学部機械工学科
教授 村川 正夫

(平成10年度研究開発助成 AF-1998011)

キーワード：上下抜き，ファインブランキング，シェーピング，FEM シミュレーション

1. ま え が き

本研究では，上下抜き法，ファインブランキング (FB) 法およびシェーピング法の各種の精密せん断加工に対して，FEM 解析を行ない，その現象把握および最適加工条件設定への活用方法に関して検討した。

まず，上下抜き法に関しては，同加工法は打抜き加工で問題となるかえりを原理的になくし得る加工法であるが，通常の打抜き加工は 1 工程で完了するのに対し，上下抜き法の場合は，2 工程以上の加工工程を経るため，とりうる加工条件の組み合わせが多く，従来いくつかの研究はあるものの^{1)~5)}，必ずしも加工条件と加工現象との関係が明確に定量的に把握されていなかった。

そこで本研究では，各種上下抜き法の加工条件と加工現象との関係を FEM 解析を利用して定量化することを検討した。その結果，工具食込み量，工具クリアランスなどの打抜き条件とかえり無し打抜きの成功または非成功形態との関係を定量的に把握することができ，かえり無し打抜き成功域に関して，定量的に検討することができた。

次に，FB 法に関しては，FB 加工においては製品の特に凸形状部に大きなだれが発生しやすく，その大きさが製品使用上問題となることが多い。すなわち，図 1 に示すように，FB 加工で多く製造される部品として図 (a) に示した歯車があるが，この場合，歯の頂点付近で大きなだれが発生しやすく，それは歯幅不足につながるために機能上問題となる。また，図 (b) のような凸形状部にねじ固定用の穴が配置されたような形状の部品も自動車用部品などでしばしば用いられるが，この場合，だれによりボルト頭座面の平面度が確保されないといった問題が発生する。現状これらの製品形状や FB 加工条件は，経験や一部の実験結果⁶⁾に基づいて設定されているようであるが，もしも製品形状とだれの大きさの関係がシミュレーション (解析) により定量的に明らかになれば，加工条件の設定，製品設計

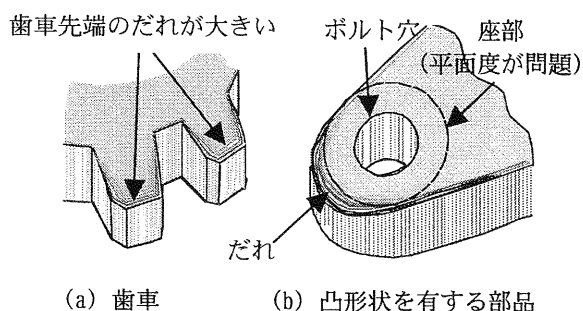


図 1 精密打抜き (FB) 加工でだれが問題になる製品

の効率化や試作トライ数の削減などに結びつき，FB 製品製造上有用であろう。

そこで，本研究では，3次元有限要素法 (以下 3D-FEM と呼ぶ) を利用する解析方法について検討した。その結果，FB 加工において大きな問題となる製品のだれに関して，その定量的把握が可能になった。

最後に，(プレス) シェーピング加工法に関しては，同加工法は，せん断加工において良好なせん断面および形状精度を得るための仕上げ加工法の 1 つであるが，加工の良否が取り代などの加工条件に大きく影響されるという問題点がある^{7), 8)}。現状，加工条件と加工の良否との関係は，例えば，取り代が小さいほど良いというような，ごく一般的な傾向はわかっているものの⁹⁾，必ずしも定量的には把握されておらず，例えば，材質と板厚との関係における加工可能範囲など，多くは経験値に頼っているのが現状であるといえる。

そこで本研究では，シェーピング加工法の加工条件と加工の良否との関係について，FEM シミュレーションを利用して定量的に把握することを検討した。具体的には，シェーピング加工時の切口面での停留クラックや破断面発生を含めた FEM シミュレーションを行なうことで，従来の検討に比べ，より詳細かつ定量的に取り代などの加工条件と切口面形状および形状精度などとの関係を把握することを検討した。

2. 上下抜き法に関する検討

2.1 解析および実験方法

検討した打抜きモデルは，直径 $d=16.0\text{mm}$ および板厚 $t=1.0\text{mm}$ の丸形状とし，被せん断材料は，かえり無し打抜きが比較的困難とされているステンレス鋼 SUS304 を用いた。検討したかえり無し打抜き法は，1 工程目で半抜きを行い 2 工程目で対向方向から分離させる方法である 2 工程上下抜き法，および 1 工程目で半抜きを行い 2 工程目で平押し工具を用いて分離させる方法である平押し法の 2 種類とした。

FEM 解析コードには市販の 2次元静的陰解法 FEM 解析コードである DEFORM 2D (Ver 7.0) を用いた。解析モデルは軸対称モデルとし，工具は剛体として，被せん断材は剛塑性体として取扱い，要素は四角形要素を用いた。破断面発生判定に関しては，延性破壊条件式に Ayada らの式¹⁰⁾を用いた。その解析は，はじめにいくつかのクリアランス条件において打抜き実験を行い，同式の係数を決定しておき，同式の計算値がその係数に達した要素を破断したと判定して無効化するという方法で行った。

図 2 および表 1 に 2 工程上下抜き法の解析モデルおよ

び打抜き条件をそれぞれ示す。図(a)は第1工程目の半抜き工程であり、パンチ食込み量 K_1 およびクリアランス Cl_1 が加工条件変数となる。図(b)は第2工程であり、この場合のパンチとダイスとの関係は、通常用いられる相対クリアランスを用いたのでは、第1工程の工具との関係が表現できないので、ここでは、全て第1工程ダイス径 D_1 ($=\phi 16\text{mm}$) を基準とし、それとの比率で整理することとした。よって、第2工程における加工条件変数はパンチ径 P_2 およびダイス径 D_2 となる。また、第2工程パンチ食込み量 K_2 は製品が抜き落とされるまでとした。

一方、平押し法の場合は、第1工程目は前述の2工程上下抜きの場合と同様の打抜き条件とし、第2工程目に平押しを行う解析および実験条件として検討した。

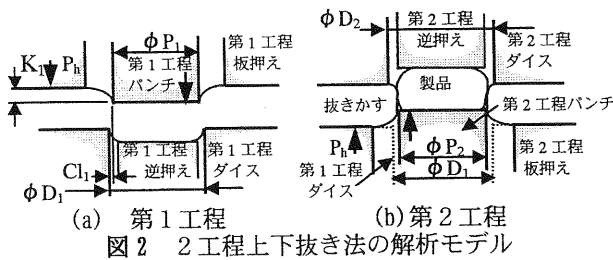


図2 2工程上下抜き法の解析モデル

表1 2工程上下抜き条件

打抜き形状	直径(1工程目ダイス径) $D_1=16.0\text{mm}$ および板厚 $t=1.0\text{mm}$ の丸形形状
被せん断材	SUS304 ($\sigma_B = 637.0\text{MPa}$, $\lambda = 59.0\%$)
1工程目クリアランス Cl_1	-10, -5, -2.5, 0, 2.5, 5, 10, 15 (%t)
1工程目および2工程目パンチ食込み量 K_1, K_2	K_1 または $K_2=0\sim 100\%$ 注) K_2 は基本的に材料が分離するまでとした。
2工程目工具径 P_2, D_2	パンチ径 $P_2/D_1=0.94\sim 1.00$ ダイス径 $D_2/D_1=1.00\sim 1.06$ 注) 2工程目工具径は全て D_1 を基準として無次元量で表した。
板押え力 (P_h)	$50\%P$ (ただし $P = \text{せん断力}$)
逆押え力 (P_r)	$10\%P$

2.2 解析結果および考察

2.2.1 2工程上下抜き法に対する検討

(1) 2工程上下抜き加工形態の分類 FEM 解析によって得られた2工程上下抜き法の典型的な加工形態を分類した結果を図3に示す。図(a~g)はそれぞれ第2工程途中の加工形態を示している。なお、分類上、抜き落とされる側を製品とし、穴側を残りかすと呼ぶことにする。

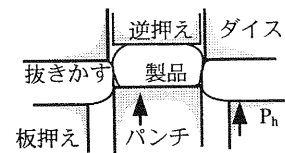
図(a)は第2工程目においてかえり無し打抜きが成功した場合である。すなわち、製品および残りかすともに両面にだれが形成され、かえりが発生しない場合である。

それに対して図(b)および(c)はかえり無し非成功例の第1形態である。図(b)の場合、第1工程時に形成された製品側のだれが第2工程打抜き途中で消滅し、製品にかえりが発生する場合である。なお、残りかすには両面にだれが形成され、かえり無し打抜きが成功する。図(c)は前記と逆の形態で、残りかす側のだれが第2工程打抜き途中で消滅し、残りかすにかえりが発生する場合である。

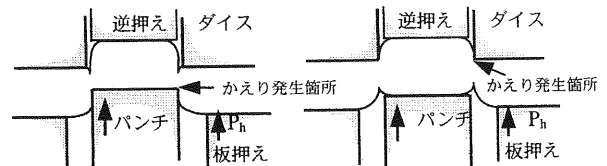
図(d)および(e)はかえり無し非成功例の第2形態である。図(d)の場合、第2工程のパンチが、打抜き途中で打抜き穴側面を切削していく場合で、この場合、残りかす側

に切削によるかえりが発生してしまい、残りかすのかえり無し打抜きが非成功となるものと考えられる。図(e)は前記と逆の形態で、第2工程におけるダイスが、打抜き途中で製品側の側面を切削していく場合で、製品のかえり無し打抜きが非成功となるものと考えられる。

図(f)および(g)はかえり無し非成功例の第3形態である。図(f)の場合、第2工程におけるパンチが第1工程で半抜きされた半抜き製品の直径に比べ小さすぎる場合に、製品にパンチの食いつき跡が残り、それより外周の部分にかえり様の環状突起が発生する場合である。これは厳密にはかえりとは異なるが、かえり無し打抜きの目的を鑑み、この場合も、かえり無し打抜き非成功とするのが妥当であると考えられる。図(h)は前記と逆の形態で、第2工程におけるダイスが第1工程で半抜きされた打抜き穴の直径に比べ大きい場合に、残りかすにダイスの食いつき跡が残り、内周の部分にかえり様の環状突起が発生する場合である。

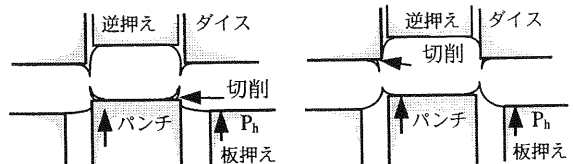


(a) かえり無し打抜き成功



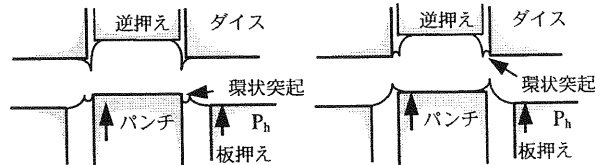
(b) 非成功 1-1

(c) 非成功 1-2



(d) 非成功 2-1

(e) 非成功 2-2



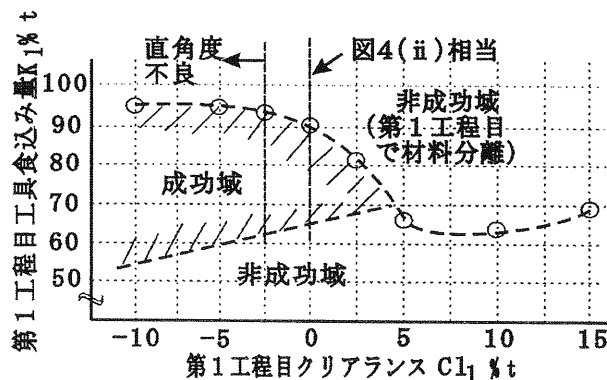
(f) 非成功 3-1

(g) 非成功 3-2

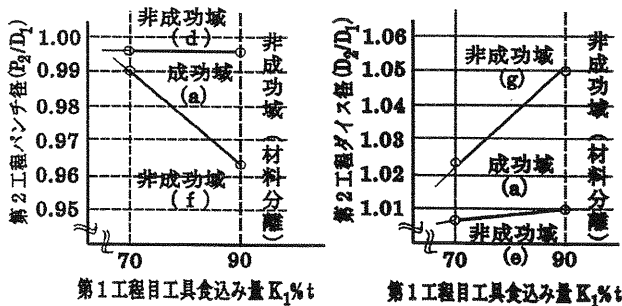
図3 FEMで解析された2工程上下抜き法における典型的な加工形態

(2) かえり無し打抜き成功域のFEM解析による検討 図4(i)は第1工程クリアランス Cl_1 およびパンチ食込み量 K_1 に対するかえり無し打抜き成功域をFEM解析により調べた結果である。その結果は、 Cl_1 に関しての成功域はおおよそ $Cl_1=2.5\%$ 以下の正および負の範囲であり、また、 K_1 に関しての成功域は、正の $Cl_1=2.5\%$ においては $K_1=70\sim 80\%$ (成功域範囲10%) 程度の範囲であり、負の $Cl_1=-10\%$ においては成功域が $K_1=55\sim 95\%$ (成功域範囲40%) 程度と大幅に大きくなる。ただし、 Cl_1 が負になる

と、図示はしないが、切り口面の直角度が悪化してくる傾向となる。したがって、理論的には、 Cl_1 がおよそ $Cl_1=2.5\%t \sim -2.5\%t$ の範囲が、良好な切り口面がかえり無し打抜きが成功する領域であることがわかった。次に、第2工程パンチ径 P_2/D_1 および第2工程ダイス径 D_2/D_1 に対する、かえりなし打抜き成功域を FEM 解析により調べた。例えば $Cl_1=0\%t$ の場合の成功域を図(ii)に示すが、この場合、 $K_1=90\%t$ においては、 $P_2/D_1=0.965 \sim 0.995$ までの比較的広い第2工程工具径範囲がかえり無し打抜き成功域（加工形態は図3中の(a)）となる。すなわち、パンチ径に関しては図中成功域の上側非成功域は、 P_2 が大きすぎて加工形態 (d) 領域で、下側非成功域は逆に P_2 が小さすぎて加工形態 (f) 領域となる。同様に、 D_2/D_1 に関して、図に示したように成功域および加工形態が決定される。さらに、他の Cl_1 についても図4(ii)とほぼ同様の結果が得られている。



(i) 第1工程クリアランス Cl_1 および工具食込み量 K_1 に関する成功域



(ii) $Cl_1=0\%t$ の場合の第2工程パンチ径 P_2 およびダイス D_2 に関する成功域（図中記号は図3の記号と対応する）

図4 FEM 解析による2工程上下抜き法におけるかえり無し打抜き成功域

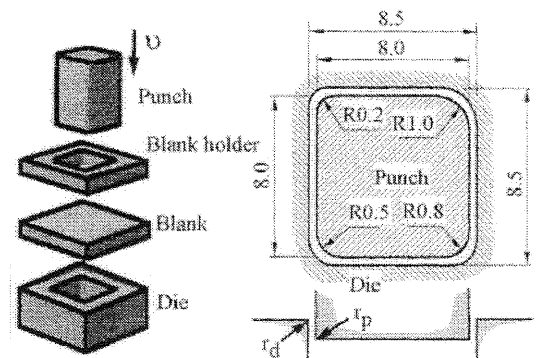
2.2.2 平押し法の場合に関する検討

平押し法におけるかえり無し打抜き成功域を FEM 解析により調べた結果は、第1工程クリアランスが $Cl_1=0\%t$ 以下の負のクリアランス範囲で成功域が存在し、負に小さくなるほど成功域範囲が広がってくるが、同時に、この場合も2工程上下抜きの場合と同様、切り口面の直角度が悪化してくる。したがって、およそ $Cl_1=0\%t \sim -5\%t$ の範囲が、かえり無し打抜きが成功し、かつ、良好な切り口面が得られる領域であることがわかった。

3. ファインブランキングに関する検討

3.1 シミュレーション（解析）方法

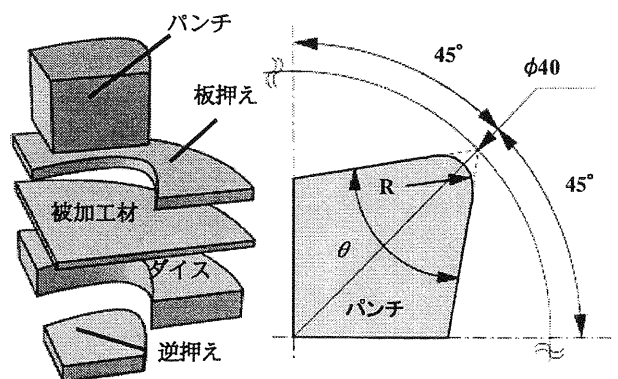
3次元 FEM コードには市販の DEFORM-3D, Ver.3.10 を使用した。同コード、ラグランジアン座標系による静的陰解法 FEM コードであり、要素は四面体要素を用いている。検討した打抜き加工モデルは、はじめに 3D-FEM によるだれの解析の妥当性を検証するための予備的検討として通常クリアランスの打抜き加工を取り上げた。具体的には、解析モデルを図5に、解析条件を表2に示すように、打抜き形状を四角形状とし、各コーナールは異なる大きさを有し、それぞれのコーナにおけるだれの大きさを解析し、同様に、同一条件で実験を行ない、FEM 解析結果の妥当性を検討した。



(a) 工具構成 (b) パンチおよびダイス形状
図5 通常クリアランスの打抜き加工の解析モデル

表2 通常クリアランスの打抜き加工の解析条件

物体モデル	被加工材：剛塑性体 ($t=2.0\text{mm}$)
σ_B : 引張強さ	SUS304, $\sigma_B=649\text{N/mm}^2$, $\lambda=43\%$
λ : 伸び	パンチ/ダイス/板押さえ: 剛体
摩擦係数	$m=0.1$
工具クリアランス	$Cl=10\%t$
コーナール	$R=0.2, 0.5, 0.8, 1.0 \text{ mm}$
工具刃先丸味	パンチ $r_p=0\text{mm}$, ダイス $r_d=0\text{mm}$
パンチ速度	$V=6\text{mm/s}$
板押さえ	隙間固定タイプ



(a) 工具構成 (b) パンチ形状 (凸部)
図6 凸部形状を有するFB製品の1/4解析モデル

表3 凸部形状を有するFB 部品の解析条件

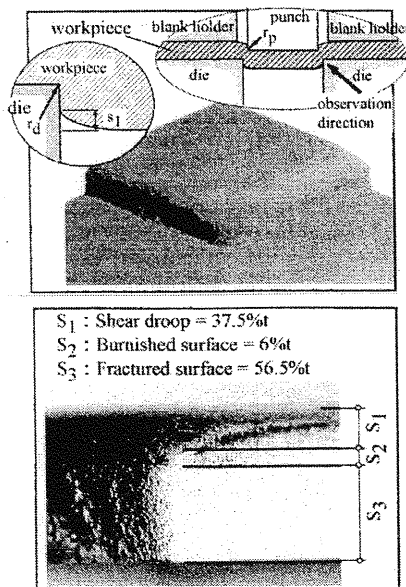
物体モデル	被加工材：剛塑性体 ($t=3.0\text{mm}$ Al100-O, $\sigma_b=75.46\text{N/mm}^2$, $\lambda=48\%$) パンチ/ダイス/ 逆押さえ/板押さえ：剛体
摩擦係数	$m=0.1$
工具クリアランス	$Cl=5\ \mu\text{m}$
凸部先端角度	$\theta = 30, 60, 90, 120^\circ$
凸部先端アール	$R = 0.1, 0.2, 0.4, 1.6\text{mm}$
工具刃先丸味	パンチ $r_p=0\text{mm}$, ダイス $r_d=0\text{mm}$
パンチ速度	$V=10\text{mm/s}$
板押え	隙間固定タイプ

次に、実際に FB 加工における凸部形状とだれの大きさの関係について FEM 解析を行った。具体的には、解析モデルは図 6 に示すような 1/4 モデルとし、解析条件は表 3 に示すように決定し、凸部先端角度および先端アールを変化させて FEM 解析を行い、それらの大きさとだれの大きさとの関係を調べた。被加工材の要素は要素数 20000 程度とし、食込み量 5% (t は板厚) 毎にアダプティブ法によりリメッシングした。材料構成式は引張試験による SS 曲線から決定した。解析結果の妥当性の検証は、今回は中川らによる先行研究¹¹⁾における実験結果と比較する方法で行った。両者の被加工材の材質および機械的強度はほぼ同様である。ただし、今回の解析では、解析モデルを単純化するために板押え突起は付けていない。

3.2 解析結果および考察

3.2.1 通常クリアランスの打抜きにおけるコーナアールの大きさとだれの大きさの関係

製品コーナアール 4 水準について FEM 解析および実際の実験によるだれの大きさを比較した結果、FEM 解析結果は実験結果とほぼ一致した。例として、製品コーナアールが $R=0.2\text{mm}$ の場合のだれの大きさについて FEM 解析と実験とを比較した結果を図 7 に示す。 $R=0.2\text{mm}$ の場合、FEM 解析によるだれの大きさは約 0.75mm (37.5%) となり、4 水準中



(a) FEM 解析結果

(b) 実験結果

図 7 FEM 解析および実験によるだれの形状比較
(SUS304, $t=2.0\text{mm}$, $Cl=10\%$, $r_p=r_d=0$, $V=6\text{mm/s}$)

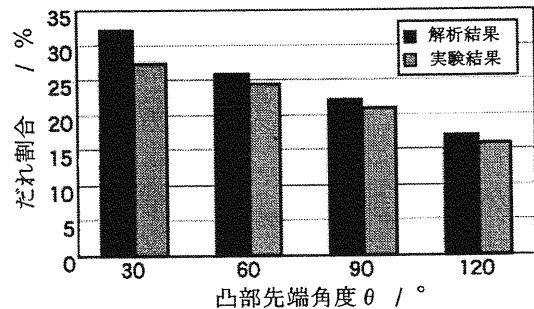
で最大となった。また、この結果は実験結果とほぼ一致した。なお、FEM 解析におけるだれの大きさは被加工材の上面から切口面がダイス側面に接触している点までの距離で定義した (図 7 左上参照)。一方、 $R=1.0\text{mm}$ の場合は、図示はしないが、FEM 解析によるだれの大きさは約 0.53mm (26.5%) となり、4 水準中で最小となった。また、この結果も実験結果とほぼ一致した。すなわち、3D-FEM による打抜き加工におけるだれの解析結果は実際の現象を精度良くシミュレートしていることがわかった。

3.2.2 FB 加工における凸形打ち抜き形状とだれの大きさの関係

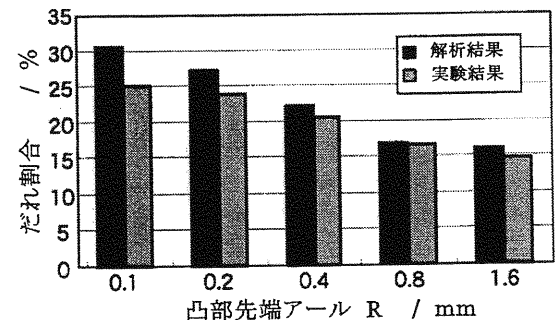
凸部先端角度および凸部先端アールを変化させて FEM 解析を行い、それらの大きさとだれの大きさとの関係を先行研究による実験結果¹¹⁾と比較した結果を図 8 に示す。

まず、凸部先端角度の大きさとだれの大きさとの関係では、同図 (a) に示すように、FEM 解析結果は凸部先端角が小さいほど製品に発生するだれの大きさは大きくなる傾向となり、その傾向および絶対値が実験結果とほぼ一致した。ただし、先端角が最も小さい $\theta=30^\circ$ の場合で FEM 解析結果が実験結果に比べて 15% ほど大きくなっているが、この原因は工具先端角が小さい場合、その先端付近の要素数が角度の大きい場合に比べて相対的に少なくなり解析精度が落ちるためと考えている。なお、要素数を増やすほど解析精度が上がることは確認しているが、この場合解析時間 (現状の解析時間は 20000 要素, 100 ステップで約 24~48 時間) がさらに長くなり、あまり実用的ではなくするという問題点がある。

次に、凸部先端アールの大きさとだれの大きさとの関係では、図 (b) に示すように、FEM 解析結果は凸部先端アールが小さいほど製品に発生するだれが大きくなる傾向となり、その傾向および絶対値が実験結果とほぼ一致し



(a) 凸部先端角度とだれの大きさとの関係 ($R=0.4\text{mm}$)



(b) 凸部先端アールとだれの大きさとの関係 ($\theta=90^\circ$)

図 8 凸部先端形状とだれの大きさとの関係の解析および実験結果

(Al100-O, $t=3.0\text{mm}$, $Cl=5\ \mu\text{m}$, $r_p=r_d=0$, $V=10\text{mm/s}$)

た。ただし、この場合も先端アールが小さいほどFEM解析結果が実験結果に比べて大きくなる傾向となっているが、この原因も前述と同様である。

以上の結果より、3D-FEMによるだれの解析結果は実際の実験結果とほぼ符合することがわかった。

4. シェーピング加工に関する検討

4.1 FEM シミュレーションおよび実験方法

検討したシェーピング加工モデルを図9に示す。片面シェーピング方式で加工面は25.0(w)×3.0(t)mmの平面とし、被せん断材は、基礎的な検討としてアルミニウム材A1100-Oおよび炭素鋼SS400とした。検討する加工条件は、取り代d、クリアランスCl、パンチ形状などである。それらの検討した加工条件をまとめて表4に示す。

FEMシミュレーションは2次元静的陰解法FEM解析コード(DEFORM2D Ver. 7.0)を用いて行った。解析は平面ひずみ問題とし、工具は剛体として、被せん断材は剛塑性体(要素数約5000要素)として取扱った。

切口面の破断面発生シミュレーションは、Ayadaらの延性破壊条件式¹⁰⁾を用いて行った。解析は、はじめにいくつかの加工条件でシェーピング加工実験を行い、同式の係数を決定しておき、計算値がその係数に達した要素を破断したと判定して削除するという方法で行った¹²⁾。

一方、実験によりFEMシミュレーション結果を検証した。実験装置を図10に示す。被せん断材をダイと板押さえ間

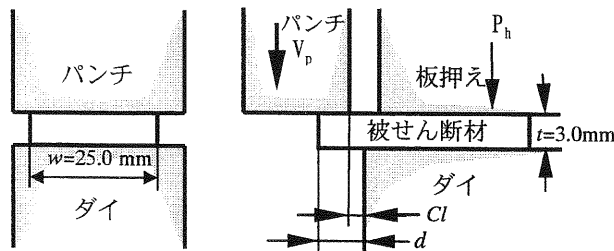


図9 シェーピング加工モデル

表4 シェーピング加工条件

加工面形状	板厚 $t=3.0\text{mm}$, 板幅 $w=25.0\text{mm}$
被せん断材	A1100-O ($\sigma_B = 75.46\text{MPa}$, $\lambda = 48.0\%$) SS400 ($\sigma_B = 482.4\text{MPa}$, $\lambda = 30.0\%$)
取り代 d	0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0 mm
クリアランス Cl	0, 1, 3, 5 % t
板押え力 P_h	50% P (ただし $P = \text{せん断力}$)
パンチおよびダイ諸元	刃先 $R=0\text{mm}$, 刃先角 90°
パンチ速度 (V_p)	5 mm/sec

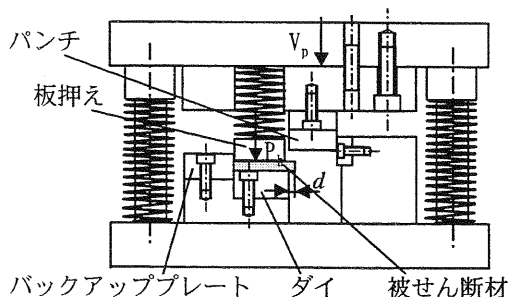


図10 シェーピング加工実験装置

に設定取り代dをもたせて固定し、パンチにより加工した。なお、シェーピング加工はせん断加工面に行うのが通常であるが、本研究では基礎的な検討であるので、取り代などの加工条件を一定とするために、切削加工により前加工面を形成した。

4.2 シミュレーション結果および考察

4.2.1 取り代と切り口面および切り屑生成状態との関係

各取り代条件にてシェーピング加工を行った場合の、それぞれの実験およびFEMシミュレーションによる切口面性状および切り屑生成状態をまとめて図11に示す。

切口面性状に関しては、実験による場合、まず、取り代 $d=0.1\text{mm}$ においては、全面平滑(切削)面が得られ、だれも小さく、良好なシェーピング加工ができた。次に、取り代 $d=0.2\sim 0.3\text{mm}$ においては、シェーピング加工途中で停留クラックが発生し、さらに、加工終了部付近には、破断面が発生した。最後に、取り代 $d=0.5\text{mm}$ 以上においては、せん断面と破断面とが発生し、だれも大きく、通常のせん断加工における切口面とほぼ同様の形状となった。

それに対して、FEMシミュレーションによる場合では、実験の場合とおおむね同様の結果が得られ、 $d=0.1\text{mm}$ においては、全面平滑(切削)面となり、 $d=0.2\sim 0.3\text{mm}$ においては、停留クラックおよび加工終了部付近での破断面が発生した。また、 $d=0.5\text{mm}$ 以上の場合、せん断面と破断面とが発生し、だれも大きくなった。

切り屑生成状態に関しては、実験による場合、まず、取り代 $d=0.1\text{mm}$ においては、シェーピング加工開始から終わりまで切削様式の連続した切り屑が発生する。次に、取り代 $d=0.2\sim 0.3\text{mm}$ においては、はじめに切削様式の切り屑が発生し、加工後半には、大きく破断して切り屑が除去されるような切り屑生成状態を示す。最後に、取り代 $d=0.5\text{mm}$ 以上になると、せん断様式の切り屑となり、切り屑にもせん断面と破断面が存在する。

それに対して、FEMシミュレーションによる場合では、実験の場合とおおむね同様に、 $d=0.1\text{mm}$ においては、終始、切削様式の連続した切り屑が発生し、 $d=0.2\sim 0.3\text{mm}$ においては、切削様式の切り屑であるが、加工終了部付近で大きく破断した切り屑となる。また、 $d=0.5\text{mm}$ 以上の場合には、せん断様式の切り屑となることがわかった。ただし、FEMシミュレーションによる場合、取り代が小さくなるほど切り屑厚さが薄くなる傾向となり、切り屑形状が実験結果とやや異なる結果となった。この原因は、取り代が小さくなると、切り屑として除去される部分の要素数が少なくなってしまうため、切り屑形状に関するシミュレーション精度が劣ってくるためであると考えられる。詳細は省略するが、要素をより細分化して要素数を増やすと、切り屑形状が実験値に近づくことを確認している。

以上の検討結果より、シェーピング加工時の切り口面性状および切り屑生成状態のFEMシミュレーション結果は、実際の加工結果とおおむね一致することがわかった。

4.2.2 シェーピング加工時のクラックの進展方向

シェーピング加工におけるクラック発生状況、および参考のために材料内部の相当応力分布のFEM解析結果を図12に示す。その結果、取り代 $d=0.3\text{mm}$ の場合、加工途中(図①)においてパンチ刃先付近から発生したクラックは切り屑の分離予定面に沿っては進展せず、切り屑側に向かって進展し、結果的に、切口面に停留クラックが発生する現象

1mm

取り代 d / mm	切口面形状		切り屑生成状態	
	実験	FEM シミュレーション	実験	FEM シミュレーション
0.1				
0.2				
1.0				

図 11 実験および FEM シミュレーションによる切り口面形状および切り屑生成状態 (A1100-O, $Cl=0\%$)

が解析された。この現象は近藤の予測¹³⁾と一致している。一方、加工の終点付近では、その方向が変化し、パンチ刃先からダイ刃先に向かい、最終的にクラックが連通して破断に至ることがわかる。

それに対して、取り代 $d=1.0\text{mm}$ の場合は、クラックは、通常のせん断の場合とほぼ同様、パンチ刃先からダイ刃先に向かって連通し、切り屑が分離することがわかる。この場合、相当応力分布および他の静水応力分布等(図示せず)も、従来、解析されている通常のせん断加工の場合¹⁴⁾とよく似ている。

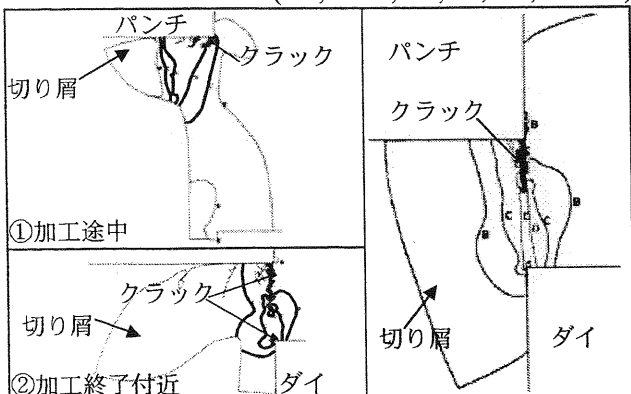
以上の検討結果より、シェーピング加工におけるクラック発生状況が FEM 解析により詳細に把握できた。

て、FEM 解析を行ない、その現象把握および最適加工条件設定への活用法に関して検討した。その結果、上下抜き法に関しては、2工程上下抜き法および平押し法におけるかえり無し打抜き加工条件(成功域)と加工形態との関係を定量的に明らかにした。

FB 加工法に関しては、FB 加工において大きな問題となる、だれの問題を取り上げ、3D-FEM 解析により、その定量的把握が可能かどうかについて、実験結果と比較しながら検討した結果、特に問題となる凸形状部のだれに関して、解析結果は実験結果とほぼ符合することがわかった。

シェーピング法に関しては、シェーピング加工の FEM シミュレーションに関する検討を行った結果、切口面、切り屑生成状態およびクラック発生状況などに関して実際の加工を概ねシミュレートできることがわかった。

(A:0, B:500, C:1,000, D:1,500 MPa)



(a) 取り代 $d=0.3\text{mm}$ の場合 (b) 取り代 $d=1.0\text{mm}$ の場合

図 12 シェーピング加工における材料内部の相当応力分布の FEM 解析結果 (A1100-O, $Cl=0\%$)

5. むすび

本研究では、上下抜き法、ファインブランキング (FB) 法およびシェーピング法の各種の精密せん断加工に対し

参考文献

- 1) 前田禎三：機械の研究, 10-1 (1958), 140.
- 2) Liebing, H.: Proc. 18th Int. MTDR Conf., (1977), 369.
- 3) 村川正夫ほか：塑性と加工, 20-219 (1979), 270.
- 4) 牧野育雄：プレス技術, 25-13 (1987), 73.
- 5) 青木勇：H2 塑加春講論 (1994), 587.
- 6) 中川：ファインブランキング (1998), 日刊工業新聞社
- 7) 村川正夫ほか：塑性と加工, 26-228 (1985), 81-86.
- 8) 柳原直人ほか：27 回塑加連講論 (1976), 206-209.
- 9) 日本塑性加工学会編：最新塑性加工要覧 2 版 (2000), 236.
- 10) Ayada et al.: Proc. 1st ICTP (1984), 553.
- 11) 中川ほか：塑性と加工, 12-129 (1971), 742.
- 12) Taupin, E., Breitling, J., Wu, W. & Altan, T.: J.Mater. Process. Technol., 59 (1996), 68-78.
- 13) 近藤一義：精密機械, 31-9 (1965), 764-770.
- 14) 古閑伸裕ほか：塑性と加工, 37-428 (1996), 957-962.