

各種せん断加工に対するFEM応力、歪解析の有用性検証

村川正夫*・神 雅彦**

1. ま え が き

本研究では、一般のせん断加工と比較して、工程が複数であることや加工条件の設定項目が多いことなどの理由で現象把握や最適加工条件の設定が困難であるとされている各種の精密せん断加工に対して、FEM解析を実施することで、前記問題点を解決するための研究を行った。

精密せん断加工法としては、2工程上下抜き法およびプレスシェービング法を取上げた。すなわち、まず、2工程上下抜き法は、打抜き加工において有害なかえりを無くしうる精密せん断加工法であるが、加工工程が2工程にわたるため、各工程における加工条件と加工現象との関係に不明点が多いこと、および最適加工条件の決定が難しいことなどの問題点があった。一方、プレスシェービング法は、平滑で寸法精度に優れた良好な加工切口面を得ることができる精密せん断加工法であるが、加工の良否が取り代などの加工条件や、打抜き加工による前加工の加工精度などに敏感に影響されるため、良好な加工切口面を得るための最適加工条件の設定が難しいという問題点があった^{1)~3)}。従来、それらの最適加工条件を得るためには、トライアル・アンド・エラー的な手法による他なく、したがって、多大なコスト、時間および労力が必要とされていた。

本研究の結果、それらの精密せん断加工における加工現象がFEMにより詳細に解明され、最適加工条件が定量的に設定できるようになることがわかり、その有用性を検証することができた。

2. 2工程上下抜き法に関する検討

2.1 FEM解析および実験方法

本研究が対象とした2工程上下抜き方法は、(1)第1工程目で逆押えを用いながら第1工程パンチ、ダイにより半抜きを行い、第2工程目でやはり逆押えを用いながら第2工程パンチ、ダイにより対向方向から分離させる方法である。検討した加工条件はFig. 1に示す工具クリアランス(Cl_1 , Cl_2) および工具食込み量 (K_1 , K_2) である。加工条件の詳細はTable 1に示す。工具の刃先は全てシャープなものと仮定した。なお、上下抜き法の場合のクリアランス (Cl_1 , Cl_2) の定義を説明すると、第1工程における(片側)クリアランス Cl_1 は、通常の打抜きの場合と同様に、第1工程パンチ径 P_1 とダイ径 D_1 との関係 $Cl_1=(D_1-P_1)/2$ で決定される。それに対して、第2工程におけるクリアランス Cl_2 ($=D_2-P_2$) については、その絶対値に加えて、第1工程パンチ径およびダイ径との相対関係についても論じる必要性があ

る。したがって、 Cl_2 に関しては第1工程ダイ径 D_1 を基準として第2工程ダイ径を D_2/D_1 、パンチ径を P_2/D_1 として無次元化して表現することとした。打抜き後の被せん断材の呼称は、分類上、抜き落とされる側を製品とし、穴側を抜きかすと呼ぶこととする。

次に、FEM解析方法に関して説明する。解析コードには2次元静的陰解法有限要素法コード(DEFORM 2D Ver 7.0)を用いた。解析は、軸対称問題として取扱い、工具は剛体、被せん断材は剛塑性体としてそれぞれ定義した。被せん断材の要素形状は四角形要素とし、その要素数は約2,000要素とした。計算は、解析ステップ数5ステップ(1ステップは0.01mm)毎にアダプティブリメッシング法によりリメッシングすることにより、要素の変形過大による計算の発散、および工具刃先への要素の過大な食込みを防止しながら行った。

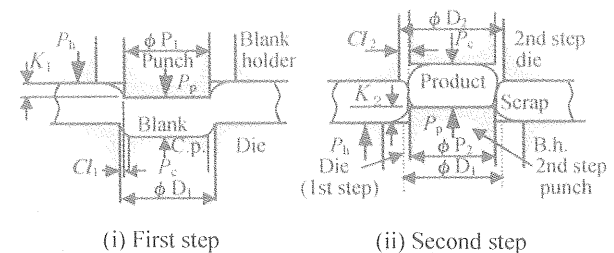


Fig. 1 Definition of clearance in the first and second steps of counter blanking

Table 1 Two step counter blanking process conditions

Blanked shape	$\phi D_1=16.0\text{mm}$ (First step die diameter)
Blank material	SUS304, $t=1.0\text{mm}$ (Tensile strength= 637.0 MPa, Elongation= 59.0%)
First step clearance (Cl_1/t)	-10,-5,-2.5,0,2.5,5,10,15 (%)
First and second step punch penetration ($K_1/t, K_2/t$)	$K_1=0\sim 100\%$ $K_2=0\%$ ~ an extent where blank is penetrated to separation
Second step punch and die diameters (P_2, D_2)	$P_2/D_1=0.937\sim 1.000$ $D_2/D_1=1.000\sim 1.063$
Blank holder force (P_h)	50% P_p (P_p = blanking force)
Counter punch force (P_c)	10% P_p

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_1} (\sigma_m / \bar{\sigma}) d\bar{\epsilon} = C \quad (1)$$

破断面の解析に必要な破断の criterion 式には延性破壊条件式を用いたが、現在、広いクリアランス範囲 ($Cl/t=5\sim 15\%$) において FEM 解析結果と実際の打抜き結果とを良く一致させる条件式が見あたらないので、その詳細な検討は別報に譲ることとし、本報では係数が1つで取扱いが比較的簡単な式(1)に示す Ayada らの式⁴⁾を用いることとした。このとき、係数 C は、せん断面割合が本工具を用いた通常の1工程せん断加工の実験値と同加工に対する FEM 解析値とで比較的良好に一致するような値を用いた。すなわち、 Cl/t が5%より小さい所では $C_1=1.00$ の値を用い、 Cl/t が5%以上の所では $C_2=0.55$ の値の2種類の値を用いた。FEM 解析における破壊の取扱いは、式(1)の計算値が破壊に達した要素を無効化しその箇所を空洞化するという方法で行った⁵⁾。

ただし、 $\bar{\epsilon}_f$ は破壊相当ひずみ、 σ_m は静水応力、 $\bar{\sigma}$ は相当応力および $d\bar{\epsilon}$ は相当塑性ひずみ増分とする。なお、本破壊条件において第1工程と第2工程間の力学的な相互作用に関しては、バウシinger 効果は考慮されていない。ただし、第1工程加工後の相当塑性ひずみは材料に残留しているため、同ひずみは考慮されている。

次に、解析結果を検証するための打抜き実験に関して説明する。プレス機械には490kN アムスラー万能試験機(島津製作所製)を用い、打抜き速度は5 mm/s とした。打抜き実験用の金型には上下抜き法の第1工程では、第1工程パンチおよびダイを用いて設定した食い込み量 K_1 で半抜きすると同時に、2箇所のパイロットパンチにより位置決め穴の打抜きを行う。次に、上下抜き法の第2工程では、同じ金型のパンチおよびダイを第2工程のものに交換して、パイロットパンチをパイロットピンに交換した金型を用い、被せん断材は裏表を反転させてパイロットピンで位置決めして打抜きを行なった。

2.2 FEM 解析と実験結果との比較および考察

(1) FEM による打抜き品形状の分類

はじめに上下抜き法における各種加工条件の場合について FEM 解析を行い、典型的な打抜き品形状を分類した。

Fig. 2 に第2工程途中の断面形状の模式図を示す。

Fig. 2(a) はかえり無し打抜きが成功した場合の被加工材断面形状である。すなわち、製品および抜き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(本研究では、分類上製品か抜きかすのいずれか一方のみがかえり無しの場合をかえり無し非成功(不成功)と定義する)。

それに対して Fig. 2(b)~Fig. 2(g) はかえり無し非成功の形態を示す。Fig. 2(b) および(c) はかえり無し非成功の場合の第I形態である。Fig. 2(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、製品には第2工程パンチ刃先側面に生じたクラックが原因のかえりが発生する場合である。なお、抜きかすには両面にだれが形成され、かえり無しのもので得られる。Fig. 2(c) は前

記と逆の形態で、抜きかす側のだれが第2工程打抜き途中で消滅し、抜きかすにかえりが発生する場合である。この場合、製品は両面にだれが形成され、かえり無しのもので得られる。

Fig. 2(d) および(e) はかえり無し非成功の場合の第II形態である。Fig. 2(d) の場合、第2工程においてパンチが、打抜き中に打抜き穴側面を切削していく場合で、この場合、抜きかす側から切削による切りくずが発生したり、切削によるばりが発生してしまう。Fig. 2(e) は前記と逆の形態で、第2工程におけるダイが、打抜き中に製品側の側面を切削していく場合である。

Fig. 2(f) および(g) はかえり無し非成功の場合の第III形態である。Fig. 2(f) の場合、第2工程パンチが第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、これによるかえり様の環状突起が発生する場合である。これは現象的にはかえりとは異なるが、かえり無し打抜きの目的からすると、かえり様の突起が発生した場合も、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。Fig. 2(g) は前記とは逆の形態で、第2工程ダイが第1工程で半抜きされた打抜き穴の直径に比べ大きすぎる場合に、抜きかすにダイの食いつき跡が残り、これによるかえり様の環状突起が発生する場合

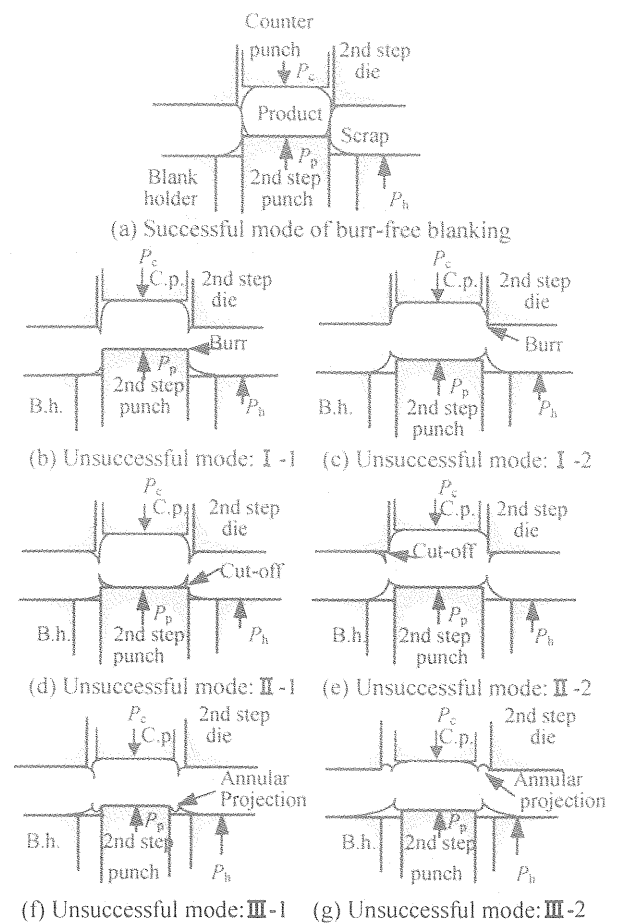


Fig. 2 Typical deformation modes in second step of counter blanking (simulated)

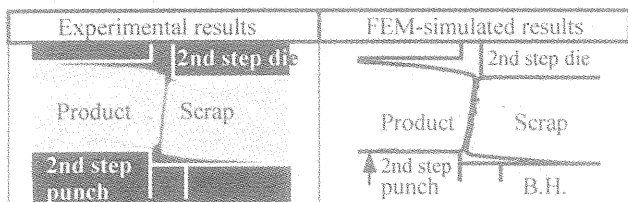
である。なお図示はしないが、各非成功形態Ⅰ～Ⅲは、単独で発生する場合と、それぞれの(-1)および(-2)が複合して発生する場合とがある。

最後に、図示はしないが、第1工程で材料が分離して(かえりが発生して)しまう場合の非成功形態は第Ⅳ形態に分類することとする。

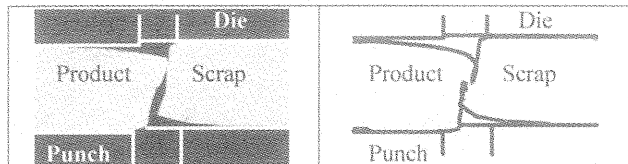
以上のFEM解析結果より、2工程上下抜き法における打抜き品形状は、かえり無し打抜き成功の場合の1形態および非成功の場合の4形態に分類できることがわかった。

(2) FEM解析結果の実験による検証

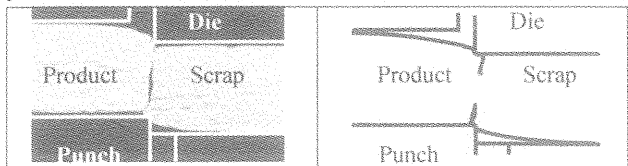
FEM解析により分類された各種打抜き品形状に関して、実際に打抜き実験を行って解析結果と比較した結果をFig. 3に示す。Fig. 3(a)は、FEM解析によりかえり無し打抜きが成功すると判定された打抜き条件で上下抜きを行った場合の実際の打抜き品の断面形状(左側)であり、右側はFEM解析結果である。



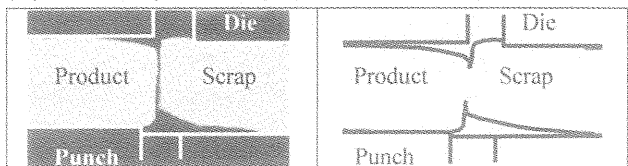
(a) An example of successful mode of burr-free blanking ($K_1/t=79\%$, $Cl_1/t=-2.5\%$, $P_2/D_1=0.987$, $D_2/D_1=1.012$)



(b) An example of burr-free blanking with poor squareness of product ($K_1/t=73\%$, $Cl_1/t=-10\%$, $P_2/D_1=0.975$, $D_2/D_1=1.031$)



(c) An example of unsuccessful burr-free blanking with both modes I-1 and II-2 ($K_1/t=63\%$, $Cl_1/t=10\%$, $P_2/D_1=1.00$, $D_2/D_1=1.00$)



(d) An example of unsuccessful burr-free blanking with mode III-2 ($K_1/t=60\%$, $Cl_1/t=2.5\%$, $P_2/D_1=0.975$, $D_2/D_1=1.050$)

1mm ←→

Fig. 3 Comparison of cross-sections of blanked material between experiment and simulation

実験結果は、製品および抜きかす側ともに両面にだれが形成され、前述のFEM解析結果が予測したとおり、かえり無し打抜きが成功している。Fig. 3(b)は、FEM解析ではかえり無し打抜きができるものの直角度が不良となると判定された場合の実験結果であり、この場合の断面形状も両者はおおむね一致した。

次に、Fig. 3(c)はFEMによりパンチ側は形態分類Ⅱ-1、およびダイス側はⅡ-2にて非成功となった場合である。実験結果においてもFEMで解析されたとおり切口面の切削現象が観察された。なお、この現象は実際の加工現場でしばしば発生している現象であり、製品そのものは良品となる場合もあるものの、発生した切りくずが工程に悪影響をおよぼすケースである。

Fig. 3(d)は形態分類Ⅲ-2にて非成功の場合である。実験においてもFEM解析結果と同様に環状突起が発生し、この場合も実験結果とFEM解析結果とは良い一致をみた。

これらのFEM解析による打抜き品断面形状は、だれ形成やかえり発生の判定が十分できる程度に実験結果と一致していることがわかった。

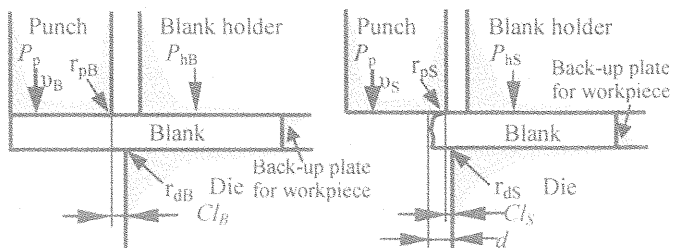
3. プレスシェーピング法に関する検討

3.1 実験およびFEMシミュレーション方法

本研究においては、実験およびFEM解析のしやすさから片持ち梁式のプレスシェーピング加工の検討を行うこととした。すなわち、Fig. 4に示すように、第1工程として数水準のクリアランス Cl_B により打抜き加工を行い、得られた製品を第2工程として数水準の取り代 d にてシェーピング加工を行う場合に関して実験とFEM解析との比較を行った。

プレスシェーピング実験条件をTable 2に示す。被加工材料は板厚 $t=3.0\text{mm}$ および板幅 $w=25.0\text{mm}$ のアルミニウム材 A1100-O とし、切口部の形状は直線状とした。検討した加工条件は、打抜き加工時のクリアランス Cl_B およびシェーピング加工時の取り代 d である。

打抜き加工およびシェーピング実験には共通の金型を使用した。その構造は、Fig. 5に示すように、被加工材料⑥はダイ①、材料用バックアッププレート②および板押しえ③によって3方向を固定する構造とし、一方、パンチ④に



(a) Blanking process (First step) (b) Shaving process (Second step)

Fig. 4 Cantilever-type press shaving processes

Table 2 Press shaving conditions
(a) Blanking (first step) conditions

Blank dimension	Thickness $t=3.0\text{mm}$, Width $w=25.0\text{mm}$
Blank material	A1100-O (Tensile strength = 92.5 MPa Elongation = 46.0%)
Clearance (Cl_B/t)	0, 3, 5, 10%
Blank holder force (P_{hB})	50% P_p (P_p = blanking force)
Tool shape	Punch tip radius $r_{pB} = 0\text{mm}$ Punch angle = 90° Die tip radius $r_{dB} = 0\text{mm}$, Die angle = 90°
Punch speed (v_B)	5 mm/sec

(b) Shaving (second step) conditions

Allowance (d)	0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0 mm
Clearance (Cl_S/t)	0%
Blank holder force (P_{hS})	50% P_p (P_p = blanking force)
Tool shape	Punch tip radius $r_{pS} = 0\text{mm}$ Punch angle = 90° Die tip radius $r_{dS} = 0\text{mm}$, Die angle = 90°
Punch speed (v_S)	5 mm/sec

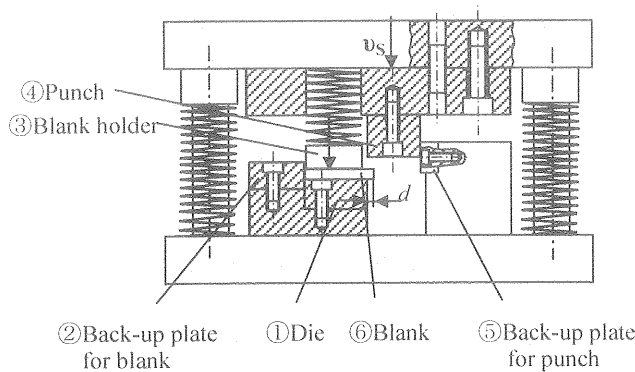


Fig. 5 Die set for the experiment of press shaving processes

Table 3 FEM simulation conditions for press shaving process

Object type	Workpiece : Rigid plastic Punch/Die : Rigid
Flow curve equation	$\sigma = 160.4 \varepsilon^{0.22}$
Fracture criterion equation	$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} (\sigma^*/\bar{\sigma}) d\bar{\varepsilon} = C$
Fracture coefficient (C)	0.98
Friction coefficient (μ)	0.1

関しては、打抜き時にパンチが側方への変位することによる打抜きおよびシェービング加工時のクリアランス Cl_B の変化をパンチ用バックアッププレート⑤により防止する構造とした。

FEM シミュレーションは前述と同様の解析コード (DEFORM 2D Ver 7.1) を用いた。解析条件は Table 3 に示すものとした。このとき、材料全体の要素数は約 4000

要素で、打抜き加工およびシェービング部分の要素の大きさは約 0.1mm 四方である。

切口面でのクラック発生の解析はモデファイされた Cockroft & Latham の延性破壊条件式⁶⁾を用いた。その理由は、同式は係数が1つで取扱いが容易であること、および従来研究^{7,8)}において、せん断加工や板材成形における破壊の解析にしばしば用いられ、実験結果ともおおよそ一致することが調べられていることによる。Table 3 に示した同式の係数 C は、本研究では引張試験により決定した。すなわち、はじめに JIS 2 号試験片による引張試験を行い、材料構成式、伸びおよび引張強さを求めておく。次に、引張試験の FEM シミュレーションを行うが、この場合、引張試験片の破断時期は破壊係数 C 値に依存することになる。したがって同破断時期、具体的には、引張強さおよび伸びが実験によるそれと等しくなるように C 値を外挿する方法により C 値を決定した。クラックに達した要素の取り扱い、同要素を無効化し空洞にするという方法で行ない、同空洞の連結をクラックとみなすこととした⁵⁾。

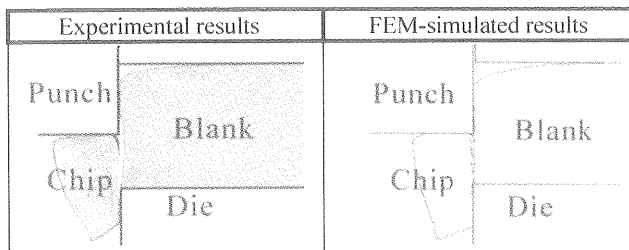
また、第 2 工程 (シェービング加工) における前工程 (せん断加工) の加工履歴に関しては、本解析では、第 2 工程の加工現象に与える影響が最も大きいと考えられる塑性ひずみのみ存在することとした。

3.2 実験および FEM 解析結果および考察

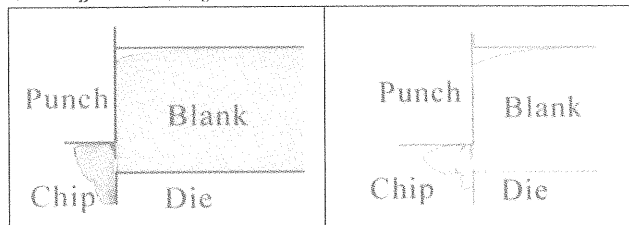
(1) 切りくず形態および切口面に関する解析と実験

第 1 工程 (打抜き加工) により得られた被せん断材料を用い、各取り代 d の条件にて第 2 工程のシェービング加工を行った場合のシェービング切りくず形状およびシェービング表面に関する実験および FEM シミュレーションの比較結果をそれぞれ Fig. 6 および Fig. 7 に示す。

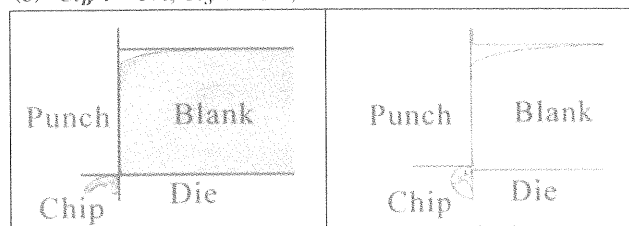
はじめに、実験結果に関して述べると、クリアランス $Cl_B/t=0\%$ の条件で打抜き加工した材料 (直角度が良好) の場合、Fig. 6 (a) 左側に示した取り代 $d=1.0\text{mm}$ の場合あるいはそれ以上の d の場合は、せん断面と破断面とが発生する、いわゆる通常のせん断加工の加工形態となり、切りくず形状および切口面もせん断加工におけるものとほぼ同様となった。次に、同図 (b) および (c) 左側に示すように、取り代 $d=0.5\text{mm}$ 以下においては、加工形態はシェービング加工特有のものとなり、切りくずはパンチ端面に沿って移動しながら生成され、切口面は平滑面となった。ただし、取り代 $d=0.25\text{mm} \sim 0.5\text{mm}$ においては、Fig. 7 (b) 左側に示すようにシェービング加工途中に「うろこ」状表面を呈する原因となる停留クラックが発生した。なおこのことは後述するように、同図 (b) 右側および拡大図 (d) において孤立した (停留した) クラックが観察されることからわかるように、シミュレーションによっても検証された。さらに、加工終了付近になると停留しない連続した破断面が発生した。それに対して、取り代がより小さい、 $d=0.1\text{mm}$ の場合には、前述の停留クラック等が発生せず、ほぼ全面が平滑面となる良好



(a) $Cl_B/t = 0\%$, $Cl_S/t = 0\%$, $d = 1.0$ mm



(b) $Cl_B/t = 0\%$, $Cl_S/t = 0\%$, $d = 0.3$ mm

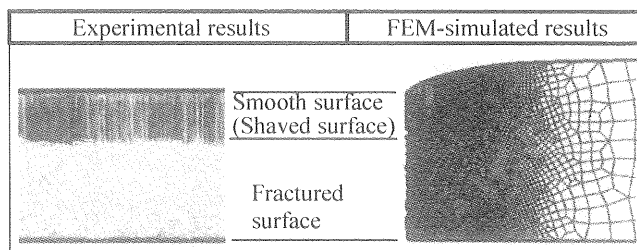


(c) $Cl_B/t = 0\%$, $Cl_S/t = 0\%$, $d = 0.1$ mm

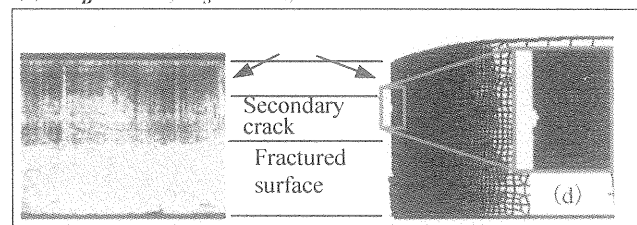
Fig. 6 Comparison of cross-sections of the products and chips of shaving process (second step) between experiment and FEM simulation

なシェービング加工となることが実験により確認された。

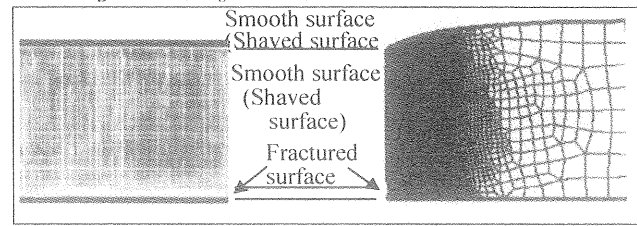
それに対して、FEM 解析の場合に関して述べると、前述の実験の場合とほぼ類似の加工形態がシミュレートされることがわかった。すなわち、Fig. 6(a)右側および Fig. 7(a)右側に示すように、取り代 $d=1.0$ mm 以上の場合、通常のせん断加工の場合と同様の切りくず形状および切口面が得られた。次に、取り代 $d=0.25$ mm \sim $d=0.5$ mm の範囲においては、Fig. 6(b)右側および Fig. 7(b)右側に示すように、前述の実験結果の場合とほぼ同様、切りくずはパンチ端面上を流れながら生成され、切口面に関して、実験の場合とほぼ同様に、平滑面、停留クラック、それに続く2次せん断(平滑)面および破断面の発生がシミュレートされた。このときのFEMによって解析された停留クラック部の拡大図を Fig. 7(d)に示すが、前述したように要素消失に起因する孤立した凹部がいくつか観察できる。すなわち、せん断加工および(または)プレスシェービングのFEM解析における先行研究^{9)~11)}では、2次せん断面の発生がシミュレートできていないが、本シェービング加工のFEM解析の場合にはそれができている。最後に、取り代 $d=0.1$ mm の場合においても、実験の場合と同様に全面平滑面が得られた。この場合シェービング最大(定常)荷重も実験値約 1.19kN に対してFEM値は約 1.14kN となり両者はほぼ一致(4.5%の誤差)した。なお平滑面に関しては、一般的にシェービング加工における平滑面は行程初期における切削面と同後期におけるせん断面とから形成されていると推測されているが¹²⁾、本FEM解析においては被せん断材が切削分離されないため、平滑面は行程全期においてすべてせん断面により形成



(a) $Cl_B/t = 0\%$, $Cl_S/t = 0\%$, $d = 1.0$ mm



(b) $Cl_B/t = 0\%$, $Cl_S/t = 0\%$, $d = 0.3$ mm



(c) $Cl_B/t = 0\%$, $Cl_S/t = 0\%$, $d = 0.1$ mm

Fig. 7 Comparison of shaved surfaces by press shaving process (second step) between experiment and FEM simulation

されている点が前記の推測とは異なっている。

最後に、FEM解析の場合、Fig. 6(c)に示すように、切りくずのカールの度合いが実験結果と比較して大きくなっている。この原因は現在検討中であるが、1つの要因として、カールの度合いは切りくずになる部分の要素数の大きさに影響されることがわかっている。すなわち、取り代 d が小さくなると、切りくずになる部分の要素数が d に対して相対的に減少するが、その際に切りくずの曲率半径が小さくなることがわかっている。この対策としては、切りくずになる部分の要素数を増やす方法が考えられる。現状、使用したコンピューターの能力等ですぐには実施できないが、今後さらに検討を続けていきたい。

(2) シェービング加工取り代と切りくず形状との関係

Fig. 8 にシェービング加工時の切りくず成長過程および被せん断材内部の相当塑性ひずみ分布に関して解析した結果を示す。はじめに、取り代 $d=1.0$ mm の場合は、Fig. 8(a)に、パンチ刃先にクラックが発生した後、パンチストロークがさらに進んだ時点の状態を示すが、パンチ刃先付近に発生する相当塑性ひずみは 2.0 以上に達し(図示はしないが、このときの相当応力は 200MPa に達し、最大垂直応力は 160MPa に達する)、その最大値の等高線分布はダイ刃先の方に向かう。一方、前述のモデファイされた Cockroft & Latham の破壊条件式によって解析されたクラックも、この時点で、ほぼそれと同じ方向に進展してきている。したがって、パンチ刃先から発生したクラックが最終的にダイ刃先に向かって成長し、最終的に両刃先から発生した

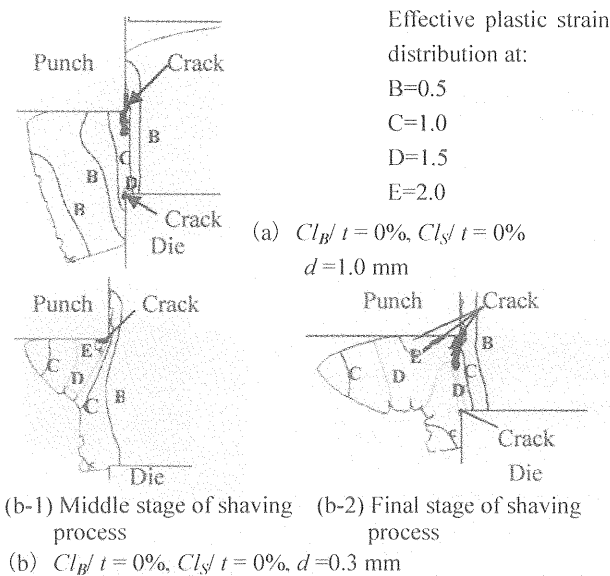


Fig. 8 FEM-simulated results of effective strain distributions and growth direction of cracks

クラックが連通し、切りくずが生成されるであろうことが推測される。図示は省略するが、この結果に対応する通常のせん断加工における静水応力分布あるいはクラックの進展状況を解析した先行研究による結果¹⁰⁾も、これとほぼ同様の結果を与えている。

それに対して、同図 (b) に示す取り代 $d=0.3\text{mm}$ の場合、加工途中のパンチ刃先付近に発生する相当塑性ひずみの最大値の等高線分布はパンチストローク増大にともないダイ刃先ではなく切りくず側に向かう (図示はしないが、相当応力分布および最大垂直応力分布もほぼ同様の傾向を示す)。そのため、パンチ刃先側面付近から発生したクラックも同様に、パンチ刃先およびダイ刃先を結ぶ分離予定面に沿っては進展せず、切りくず側に進展すると考えられる。しかし、切りくずはパンチの端面に沿って流出していくため、結果的に、同クラックはそれ以上成長できず、切りくずおよび切口面に滞留クラックが生ずることがわかった。一方、加工の終了付近では、Fig. 8 (b-2) に示すように、これまで切りくず側に向いていた相当塑性ひずみ (相当応力および最大垂直応力も同様) の最大値の等高線分布は、加工ストロークの進展にともない方向転換してダイ刃先に向かい、クラックの進展方向も同様にダイ刃先に向かう。したがって、加工終了付近では切りくずが破断して切口面から分離される加工形態を示すことが理解される。これらのFEM解析結果は、近藤により予測されているシェービング加工形態の説明¹³⁾と非常によく一致している。

4. む す び

本研究では、一般のせん断加工と比較して、工程が複数

であることや加工条件の設定項目が多いことなどの理由で現象把握や最適加工条件の設定が困難であるとされている各種の精密せん断に対して、FEM解析を実施することで、問題点を解決するための研究を行った。その研究成果を以下にまとめる。

- (1) 2工程上下抜き法におけるかえり無し成功および非成功の場合を含めた典型的な打抜き品形状を、FEMを利用することによって解析的に分類した。この場合、かえり無し成功1形態および非成功4形態に分類でき、平押し法の場合、かえり無し成功1形態および非成功2形態に分類できる。
- (2) 実験およびFEM解析の両者によるプレスシェービング加工現象の観察は加工形態、切りくず形状および停留クラック発生現象を含む切口面形状に関しておおむねよく一致することを示した。
- (3) プレスシェービング加工の切りくず生成機構の特徴について、クラックの進展方向が通常のせん断加工の場合とは異なり、切りくず側に向かうということを解析的にかつ定量的に明らかにした。

本研究の結果、それらの精密せん断加工法における加工現象がFEMにより詳細に解明され、最適加工条件が定量的に設定できるようになることがわかり、その有用性を検証することができた。

参 考 文 献

- 1) 村川正夫・大川陽康・古閑伸裕・鈴木清・中川威雄：塑性と加工，26-228 (1985)，81-86.
- 2) 柳原直人・斉藤博・中川威雄：27回塑加連講論 (1976)，206-209.
- 3) 日本塑性加工学会編：最新塑性加工要覧2版 (2000)，236.
- 4) Ayada et al. : Proc. 2nd ICTP (1987)，553.
- 5) Taupin, E., Breitling, J., Wu, W. & Altan, T. : J. Mater. Process. Technol., 59 (1996)，68-78.
- 6) Cockcroft, G. & Latham D.J. : Journal of the institute of metals, 96 (1968)，33-39.
- 7) Jeong, S.H., Kang, J.J. & Oh, S.I. : Proc. 5th ICTP, (1996)，631-634.
- 8) 宅田裕彦：第53回塑加連講論 (2002)，343-344.
- 9) 笹原弘之・田淵比奈子・神雅彦・村川正夫：機論 C, 67-654 (2001)，541-546.
- 10) 竹増光家・尾崎龍夫・山崎進：塑性と加工，36-418 (1995)，1318-1323.
- 11) 古閑伸裕・湯川伸樹・及川好・村川正夫・神馬敬：塑性と加工，37-428 (1996)，957-962.
- 12) 日本塑性加工学会編：せん断加工，(1992)，85-89，コロナ社.
- 13) 近藤一義：精密機械，31-9 (1965)，764-770.

* 日本工業大学 工学部機械工学科 教授

** 日本工業大学 工学部機械工学科 講師