

追い抜きシェービングせん断による 三次元微細精密加工システムの開発

青木 勇*

1. 研究の目的と背景

1.1 追い抜きせん断法

プレス加工の最大の特徴は高い生産性と加工安定性にある。現状はこうした特徴に加え、多種少量生産に向くシステム、つまり形状自由度の高い工法が望まれている。さらに、製品の寸法精度や製品高度化の要望は高い。一般のプレス加工では順送型を用いた複雑形状製品の加工が行われているが、この方式では部分的な製品形状変更を行う場合は型の部分的交換が必要となり、作業が煩雑となる。

追い抜きせん断法は形状自由度の高いせん断を行うことができ、原理的には複雑な形状製品が得られ、多種少量生産に向く方式といえよう。しかしその加工機構上、慣用せん断製品に比べ、品質的に劣る場合もある。従って、追い抜きせん断法を精密せん断加工技術として位置付けるためには、加工特性を十分把握し、そこで生じる欠陥を防止する工法を開発する必要がある。さらに、曲げや絞り加工等の三次元成形、それも加工自由度の高い機能を付与できれば、追い抜きせん断法の付加価値を一層高められるものと考えられる。

そこで本研究では、下記のとおり、追い抜きせん断法の高精度化と複合成形システムの構築を目的とした。

1. 自由輪郭形状を得る追い抜きせん断法の高精度化
2. 鋭い角部の形状確保と、細幅部分の変形を抑制するシェービングの積極的取り込み。
3. シェービングを含む追い抜きせん断法による自由輪郭形状創成と曲げ・絞り等を複合させた複合成形システムの構築

1.2 研究の進め方

自由輪郭創成は追い抜きせん断法が適しているが、せん断を繰り返して形状創成を行う工法であり、慣用せん断製品と異なる不良現象を生じる。例えば鋭い角部では先端部のだれとゆがみが大きくなり、さらに細かいウェブでは先端部のねじれが等が生じる。そこで以下の手順で研究を進めることとした。

- (1) 追い抜きせん断で生じる不良の解決
- (2) 追い抜きせん断・曲げ・絞りを含む複合成形システムの開発

2. 実験装置と実験材料

実験では高精度位置決めと様々な特殊設定を伴う関係上、Fig.1 に示す実験装置を試作した。本装置ではXYZステージに材料支持アーム部が固定され、このアーム上に回転ステージが装着され、正確な割り出しが可能な構造となっている。せん断は同図左部分にある金型によって行われる。駆動系はステップモータと直動ガイドで構

成されている。XYZ各ステージの最小移動量は5 μ m、回転ステージの最小回転角は0.084 $^{\circ}$ とした。せん断速度は0.55 mm/sec一定(無負荷時の値)である。せん断型はFig.2 に示すパンチ・ダイ及び板押さえで構成される。パンチは1辺5 mmの正方形で角丸み0.1 mmである。ダイ形状はこれに所定クリアランスを与えるよう製作されている。板押さえとパンチの隙間は50 μ m一定とし、押さえ力(せん断時)はバネ式で約200N一定である。

材料は、0.5 mm厚のアルミニウム軟質材(A1100P-O, 以降、軟質材)及び半硬質材(A1100P-H24, 以降、半硬質材)の2種類とした。使用した材料の機械的特性をTable 1 に示す。実験に際しては広幅板材を40 \times 40 mmに砥石切断して用いた。

3. 実験方法と実験条件

本研究ではFig.3 に示す加工様式を取り上げ、実験的に問題点の検討を行こととした。なお、連続的に打抜きを行うため、最初のせん断を一次加工、二回目のせん断を二次加工と呼ぶ。せん断に際し潤滑剤としてパラフィン系基油(動粘度:90 \times 10 $^{-6}$ m 2 /s)を用いた。製品形状及び精度等の計測・観察は、CCD型顕微鏡、測定顕微鏡及び走査型電子顕微鏡を用いて行った。

3.1 並列せん断

Fig.3 (a)が並列せん断であり、一次加工に重ね幅 W_x 、及びずれ幅 W_y を与えて二次加工を行うもので、直線輪郭部分が製品となる。 $W_y=0$ の並列せん断が一般的であるので、 W_y を0に設定し実験を行った。また、重ね幅 W_x を500 μ m一定に設定した。クリアランスは15%とし、被加工材は半硬質材を用いた。

切り口面改善を目指し、Fig.4 に示す改善策を試みた。まず、一次加工及び二次加工により直線輪郭部分を加工する。その後、一次加工側、二次加工側の順に一定取り代 Y (50 \sim 500 μ m)で繰り返しシェービングし仕上げる。

3.2 さん残しせん断

Fig.3 (b)がさん残しせん断であり、一次加工に所定のさん幅 d を与えて二次加工を行うもので、さん幅 d の部分が製品となる。

さん幅 d を200 \sim 1000 μ mに設定し、製品形状に及ぼすさん幅 d の影響を調べた。クリアランス5、15%、被加工材は半硬質材を用いた。この形式のせん断は極めて多く、形状改善を目的としてFig.5 に示す次のせん断を試みた。まず、さん幅1 mmにせん断し、その後、適当な取り代 T (50 \sim 800 μ m)で二次側を繰り返しシェービングし、目標さん幅 d に仕上げるものである。

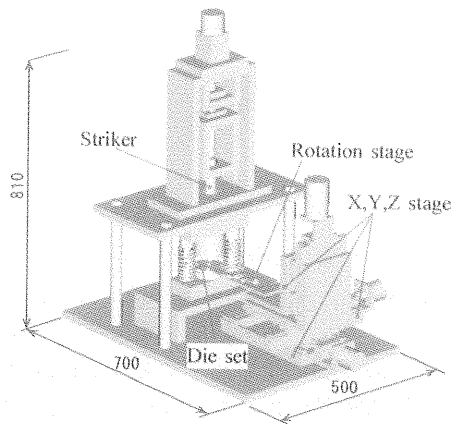


Fig. 1 Schematic illustration of shearing equipment

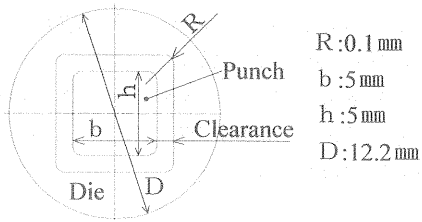


Fig. 2 Punch and die

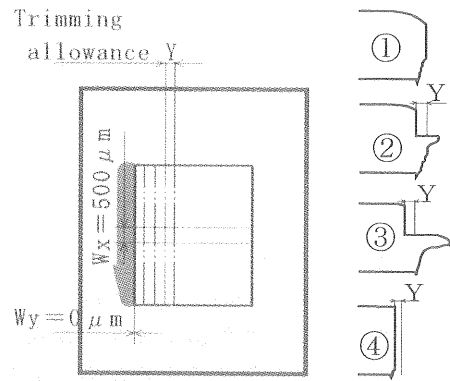


Fig. 4 Improved method in parallel shearing

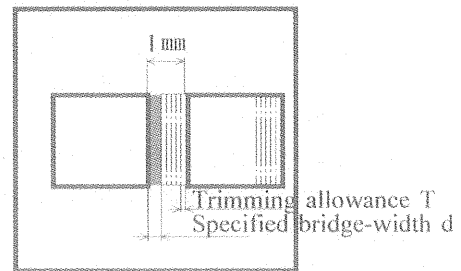
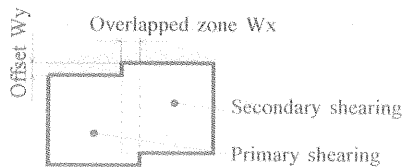


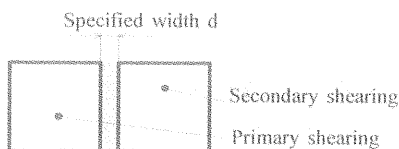
Fig. 5 Improved narrow bridge shearing method

Table 1 Mechanical properties of materials tested

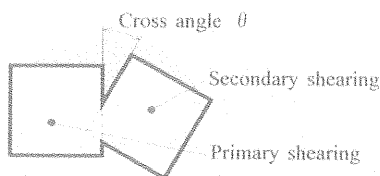
	A1100-O	A1100-H24
Ultimate tensile strength (N/mm ²)	72.1	128
Uniform elongation (%)	27.6	6.91
Total elongation (%)	36.6	13.8
Contraction of area (%)	39.2	19.4
Work hardening exponent	0.25	0.06



(a) Parallel shearing



(b) Narrow bridge shearing



(c) Cross shearing

Fig. 3 Modes of incremental shearing

3.3 交差せん断

Fig. 3 (c) が交差せん断であり、一次加工に所定の交差角度 θ を与えて二次加工を行うもので、交差部の残った部分が製品となる。交差角度 θ を $20 \sim 160^\circ$ に設定し、製品の輪郭形状と切り口面に及ぼす交差角度の影響を調べた。クリアランスは 5、15% とし、被加工材は半硬質材、軟質材の両材料を用いた。

さらに形状改善を目指し、Fig. 6 に示すようにシェーピングによる 2 種の改善策を試みた。交差角度 30° の場合を例にとると、

改善策 1: 全取り代 1 mm として適当な一定取り代 s ($50 \sim 1000 \mu\text{m}$) で二次側を繰り返しシェーピングする (Fig. 6 (a) 参照)。

改善策 2: 交差角度 120° から二次側を適当な範囲の一定角 θ_s ($10 \sim 90^\circ$) で、繰り返しシェーピングして 30° に近づける (Fig. 6 (b) 参照)。

両者の違いは、改善策 1 が常に一定シェーピング取り代であるのに対し、改善策 2 では、先端部程取り代が小さくなる点にある。いずれの改善方法も、シェーピングによる加工力低減とだれ減少の効果を狙っている。

4. 実験結果と考察

4.1 並列せん断

重ね幅付近(以降、継ぎ目と呼ぶ)は Fig. 7 に示すように、だれが減少し、平滑面とかえりが増加する特異な形態となる。これは Fig. 8 に示すように工具輪郭角部の影響によるものと考えられる。すなわち、鈍角部では余剰材料が発生し、引張力を緩和する結果、だれが

減少し、工具側面に圧縮応力場が形成され平滑面が増す¹⁾。かえりについては、精密せん断での平滑面の延長上に発生する延性的かえりと同様と考えられる²⁾。

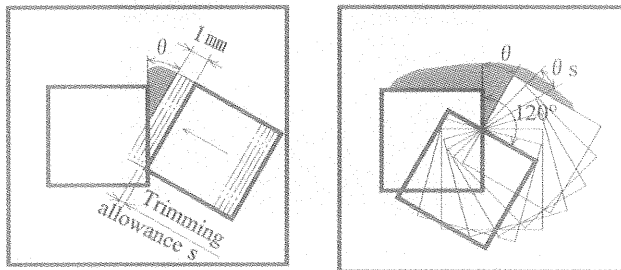
角形せん断では角部の影響は避けられないので、直辺部の切り口面形状を継ぎ目付近の切り口面形状に近づけることで面を一様化することを検討した。ここではシェービングを適用した。なお、微小取り代においては、一回目のせん断で生じただれの影響がない範囲まで加工を繰り返した。

だれ発生を観察結果を Fig.9 に示す。微小取り代 $Y = 50 \mu\text{m}$ で繰り返しシェービングすることで、だれの不均一が抑制されることがわかる。

反面、繰り返しシェービングを行うため、継ぎ目付近に限らず直辺部のバリが増大する問題がある。この点については以下の方法が効果的である。微小取り代のシェービングを行う際、途中止めを行い、これを繰り返した後、最終的に微小取り代で切り落とすのである (Fig.4 参照)。このとき途中止めで堆積した材料により、実質的な取り代が増し破断が生じる。シェービングによるだれ抑制と、せん断破断によるかえり抑制を併せることで Fig.10 に示す製品が得られる。なお、取り代や途中止めの設定については、だれを減少させる適切な取り代、加工機構がせん断となる取り代、かえりが発生しないパンチ食い込み量などの値を被加工材やクリアランスに対して調べ、検討する必要がある。

4.2 さん残しせん断

一般にさん幅 d が小さくなるほど、Fig.11 に示すように製品形状は悪化することが知られている。 d が板厚の半分以上では変形は殆ど見られないが、板厚の半分以下では形状変化が著しく、 $200 \mu\text{m}$ 以下では加工自体が困難となる。この傾向は、さんの両端部から離れる程大きくなり、中央部で最大となる。ここでは、さん中央部の断面におけるねじれを変形量 α 、 β として評価することとし、この結果を Fig.12 に示す。従来の追い抜きせん断法では d が板厚以下になると、変形が大きく α 、 β の測定が不能となる。これは、さん幅が小さくなるにつれて板押さえ力が不十分となり、二次加工時に製品全体が回転し、せん断変形というよりも引張変形に近くなる³⁾ ためと考えられる。

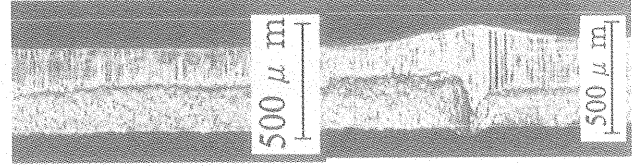


(a) Method 1

(b) Method 2

Fig. 6 Improved method used in cross shearing

僅少さん幅では一次側と二次側のだれ幅が重なり板厚が減少し板押さえが作用しにくくなる。この場合シェービングの効果は明瞭で、特に小さな取り代が良いことが分かる。Fig.13 に改善効果例を示す。取り代 $200 \mu\text{m}$ と大きいと効果がないが、取り代 $50 \mu\text{m}$ では変形が小さく抑えられている。

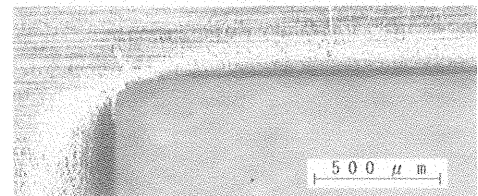


(a) Conventional shearing

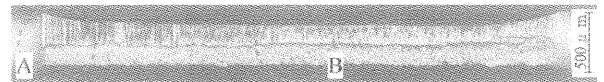
(b) Incremental shearing

(Wx:500 μm , Wy:0)

Fig. 7 Enlarged view of seam portion
(A1100P-H24, Clearance:15%)



(a) Top view



(b) Enlarged view at portion A

Fig. 8 Sheared surface of corner portion
(A1100P-H24, Clearance:15%)

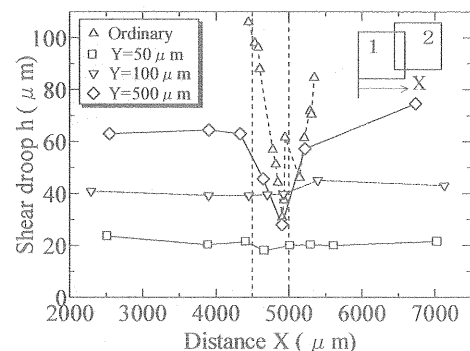
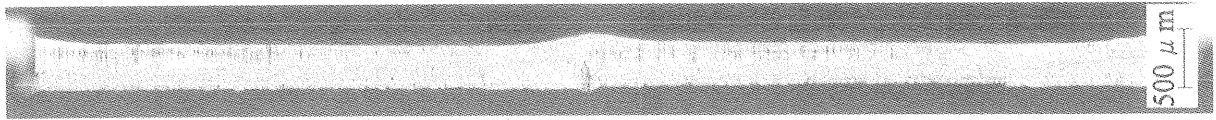
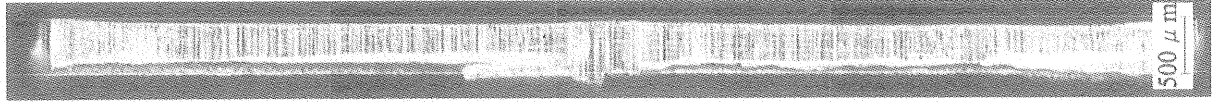


Fig. 9 Variation of Shear droop h with distance X
in improved shearing (A1100P-H24, Clearance:15%,
Wx:500 μm , Wy:0)

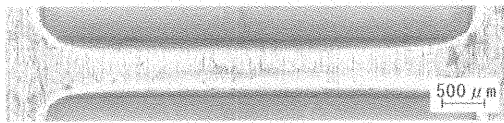


(a) Incrementally sheared surface

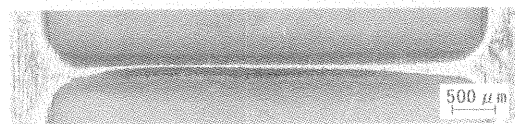


(b) Improved surface using combination of shaving and shearing (Y:50 μm)

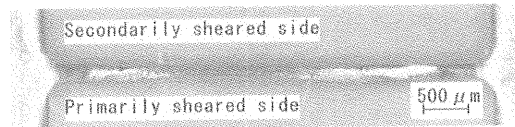
Fig. 10 Improved surface using combination of shaving and shearing (A1100P-H24, Clearance:15%, Wx:500 μm, Wy:0)



(a) $d = 800 \mu\text{m}$

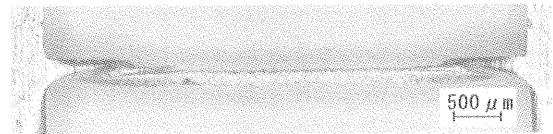


(b) $d = 400 \mu\text{m}$



(c) $d = 200 \mu\text{m}$

Fig. 11 Deformation of narrow bridge (A1100P-H24, Clearance:15%)

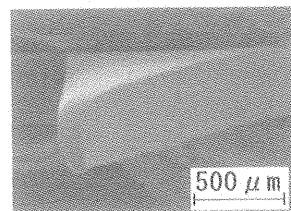


(a) Trimming allowance $T=200 \mu\text{m}$

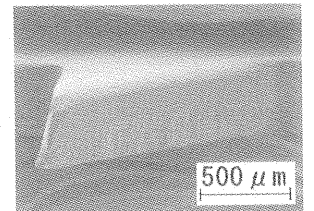


(b) Trimming allowance $T=50 \mu\text{m}$

Fig. 13 Improvement of deformation of narrow bridge by shaving (A1100P-H24, Clearance:15%, Width $d:200 \mu\text{m}$)



(a) Conventional shearing



(b) Incremental shearing

Fig. 14 Example of defects observed at protruding tip of product ($\theta=30^\circ$)

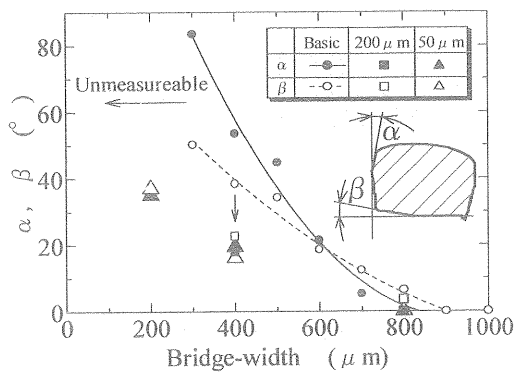


Fig. 12 Effect of bridge-width d on α and β (A1100P-H24, Clearance:15%)

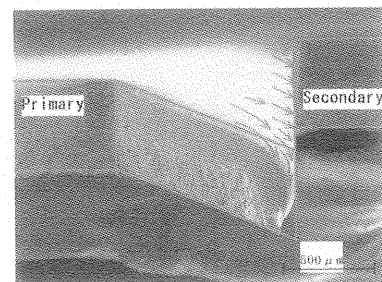


Fig. 15 Image of metal flow to compensate the dissipated material at clearance

4.3 交差せん断

一般のせん断で知られている¹⁾ように、交差角度 θ

の減少に伴いだれが大きくなり、さらに、追い抜きせん断固有のねじれの発生が認められる。これらの形状悪化は交差角度 90° を境に大きくなり、Fig.14 のように 30° 付近以下では悪化が著しくなる。Fig. 14 (a) は慣用せん断製品であり、Fig.14 (b) は追い抜きせん断製品である。二次側へねじられる原因は、板押さえ力が先端部に十分作用しないことと、二回目で大きな曲げモーメントを与えるせん断を行うためである。だれの原因としては、従来から知られるように、クリアランス部分の材料不足⁴⁾と考えれば、次のように説明されよう。Fig.15 に示すように、二次せん断に際し先端部から離れた位置では幅方向の材料のみで不足を補うことができる。しかし先端部では、幅方向部分の材料は極めて小さくなるため、幅方向の材料だけでは不足し、広範囲の材料が先端方向に移動してこれを補わざるを得ず、この結果、大きなだれを生じるのである。さらに一次側と二次側のだれ幅が重なることも見掛け上のだれを大きくしている。

ここで試みた改善策 1,2 はいずれもだれの抑制効果があり、特に 2 は顕著であった。だれ高さ h について、改善策 1,2 の効果を Fig.16 に示す。1 は効果はあるものの、取り代を一定としているためだれの抑制に限界がある。2 では、先端部に近いほど取り代がゼロ近くなるため、材料不足を殆ど生ぜず、だれも極めて小さくなる。改善効果の顕著な例を Fig.17 に示す。取り代の影響については、改善策 1 では、取り代 $100 \sim 1000 \mu\text{m}$ で大きな効果はなく、 $50 \mu\text{m}$ でだれを小さく抑えられる。当然であるが、クリアランスを小さくする

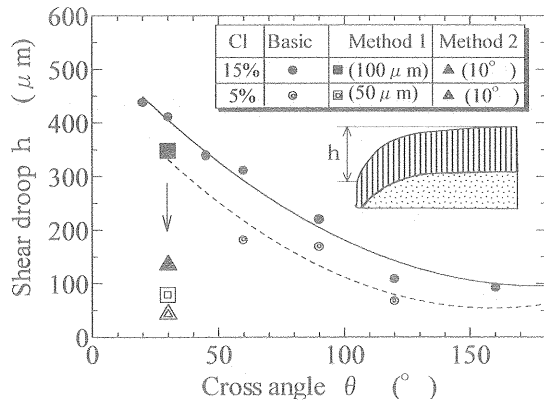
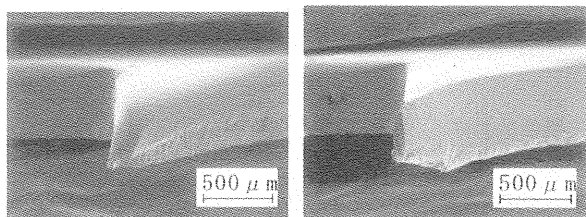


Fig. 16 Influence of cross angle on shear droop h (A1100P-H24, Clearance:5%,15%)



(a) Incremental shearing (b) Method 2, θ :10°
Fig. 17 SEM micrographs of the tip portion of products (A1100P-H24, Clearance:15%, θ :30°)

ことが取り代を小さくするために重要となる。改善策 2 では、シェービングの角度 $\theta_s = 10^\circ$ 以下付近から顕著な効果が見られるが、それ以上では殆ど効果が見られない。

ねじれの抑制に対しても、改善策 1,2 とともに効果がある。先端部に近い部分程、材料幅が僅少となるため大きくねじれる。しかし、改善策 1,2 によれば、ねじれ発生位置や大きさは小さく抑えられており、これは、シェービングによる加工力の低減に基づくと考えられる。取り代が小さい場合の片刃切り落とし方式のせん断加工では、加工力も相当小さく、また、取り代がある値を超えると加工力は一定値を取ることが知られている⁵⁾。これは、取り代を小さくすることでせん断からシェービングへ加工機構が移行することを示している。シェービングは切削加工であるため、せん断よりも加工力が小さく、加工時の製品変形が抑制されるのである。このことより、追い抜きせん断にシェービングを取り込むことで、角部のだれ、ねじれ、細かいさみ部の変形を抑制できることが分かる。

4.4 シェービング取り代の選定

前節で述べたとおり、変形を抑えるには適当な取り代のシェービングが効果的であり、この理由は加工力の低減に起因する。そこで、この効果を広く利用するためには、適当な取り代を知らなければならない。切削加工の観点から考えれば、工具の刃先角度（本研究では 90° ）、せん断速度等に依存するので、より詳細な研究から、加工力と取り代の関係を調べる必要がある。いずれにしても、最終的加工段階では微小な取り代が必要となる。クリアランスや被加工材などの条件にもよるが、取り代は板厚の 10%程度以下とすれば加工力の低減効果が得られる。この値を目安として要求される製品精度に応じた取り代を選定すれば良い。

本研究は、シェービングを取り込む追い抜きせん断法が製品形状の改善に効果的であることを示したもので、取り代選定に関しては今後の検討課題としたい。

5. 複合成形システムの試作

これまで述べたとおり、追い抜きせん断で生じる大きな不良をある程度克服することができた。これらの基本的な考えは順送型へも適用できるものである。

さらに曲げ、絞り等を複合させた成形システムを検討した。一般に用いられている製品の大きさ、形状、板厚は実に様々であり、あまりに高い自由度を想定することは意味がない。部品形状を一種に特定してもそのなかで僅かな寸法変更、形状変更、穴位置変更等が多い。例えば、Fig.18 のように V 曲げや U 曲げ製品を想定しても幅、長さ、穴位置等変更箇所は多い。このように基本形状が固定され、その中で各部の変更を可能にするシステムは、成形自由度はさほど高くないがそれなりに価値があり、さらに、追い抜き及び追い抜きシェービングを取り込むことで付加価値の高い製品

製造が期待できる。

以上のような事項を考慮すると Fig.19 のように、(1) 複数工具の交換、(2) 材料位置指定機能が必要になる。タレットパンチプレスを基本とするが、材料移動の自由度を増し、追い抜きで自由形状を創成し、曲げ・絞り成形する構図となる。Fig.20 は試作したシステムであり、一部は以前著者が開発した微細加工機⁶⁾の機能を流用している。Fig.21 はここで試験的に用いた工具群の例である。実際には必要な製品に対応できる型を準備すれば良い。Fig.22 ~ Fig.24 は本システムで作製した製品例である。基本的成形は同じでも細かな形状変更が容易なことがわかる。

冒頭に述べたように本システムの成形自由度に制約はあるが、限定的寸法変更の多い部品製造の分野で意味あるものと考えている。

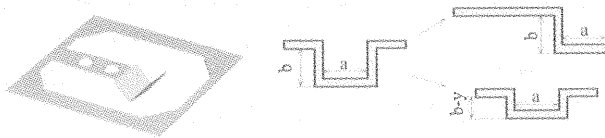


Fig.18 Sample of bending product

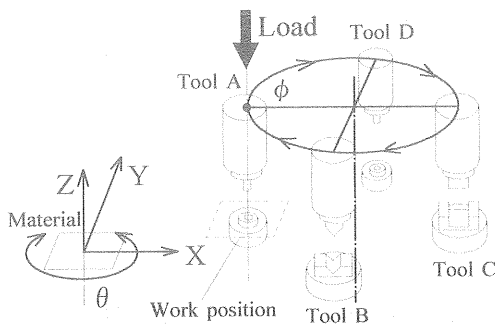


Fig.19 Principle of complex forming system

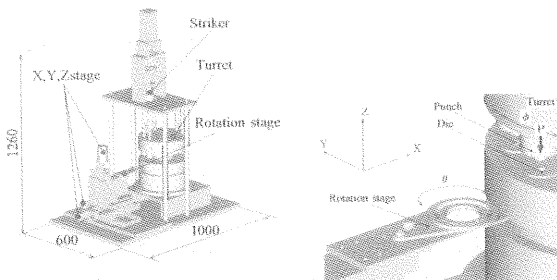


Fig.20 Schematic illustration of complex forming equipment

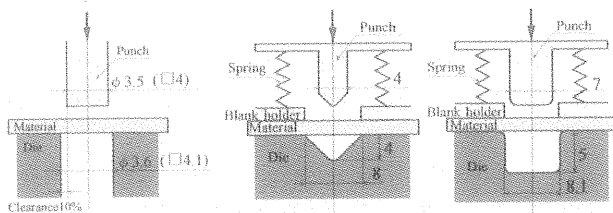


Fig.21 Example of tools used in forming system

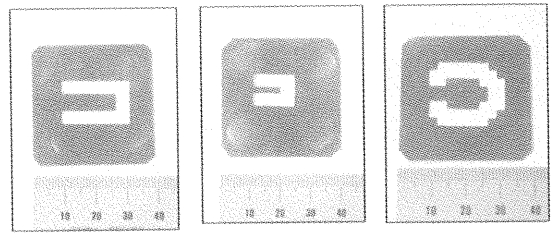


Fig.22 Example of incrementally sheared products (A1100P-H24, Clearance:10%)

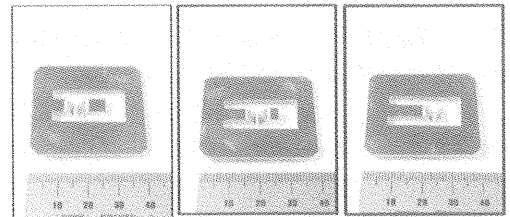


Fig.23 Example of products formed by complex forming machine (A1100P-H24, Clearance:10%)

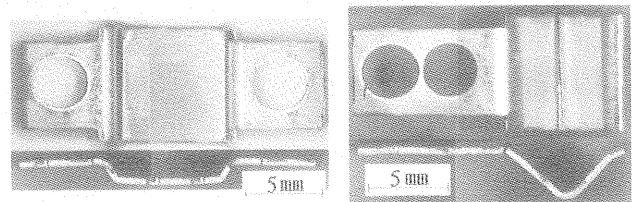


Fig.24 Appearance of formed products (A1100P-H24, Clearance:10%)

6. 結論

追い抜き・シェービングせん断の改善、及び曲げ・絞りを複合させた成形方式を検討した。

- 1) 並列せん断では、ずれ幅によらず継ぎ目があらわれるが、微小取り代のシェービングとせん断の組み合わせにより一様な面に仕上げることができる。
- 2) 僅少さん幅のさん残しせん断では、微小取り代でシェービングを繰り返すことで形状改善が図れる。
- 3) 交差せん断では、交差角度 θ が小さい先端部では概して変形が大きい、微小取り代でシェービングを繰り返すことで変形を抑制することができる。
- 4) 追い抜き・シェービングせん断・曲げ・絞りを複合させた成形システムを試作した。

本研究は平成 11 年度 (財) 天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成 (AF-1999011) を受けて行われたものであり、同財団に深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) 中川威雄・鈴木清・木下素男: 塑性と加工, 12-129 (1971), 742-751.
- 2) 日本塑性加工学会編: せん断加工, コロナ社, (1992), 56-57.
- 3) 神馬敬・関根文太郎・関谷健助・勝瑞真一・森本亘: 塑性と加工, 28-315 (1987), 361-362.
- 4) 近藤一義: 塑性と加工, 29-324 (1988), 21-25.
- 5) 品田健太郎・青木勇・笹田昌弘: 51 回塑加連講演, (2000), 59-60.
- 6) 青木勇・高橋俊典・樋口俊郎: 塑性と加工, 37-431 (1996), 1242-1248.