

論文 外周軸方向溝付けによるUOプレス品の真円度向上メカニズム*

Circularity Improvement of Cylindrical Parts for U-O Process by Peripheral Axial Grooves

杉山 聡 江坂真一 森川伸之 安田俊也 石川孝司
 Satoshi SUGIYAMA Shinichi EZAKA Nobuyuki MORIKAWA Toshiya YASUDA Takashi ISHIKAWA

Most cylindrical parts for electronic appliances are produced by the U-O-process or drawing. Although U-O-process products have higher material yield than drawing products, the dimensional accuracy is inferior to those of other processes.

In this paper, we performed studies to improve the circularity of U-O-process products, by forming peripheral axial grooves equally a round the circumference using by means of a tool with a projection. We assessed of the stress distribution and the springback obtained by the elastoplastic finite-element method. By performing experiments based on this assessment, we verified that the method was more efficient compared to the conventional one.

Key words : Bending, Elastoplastic FEM, U-O process, Groove, Circularity, Springback

1. 緒言

モータヨークやブシュなどのUOプレス品(Fig.1のように、プレスでU形状に曲げた後O形状に曲げる部品)は、引抜きパイプと比較して材料単価が安く、絞り品と比較して材料歩留りが高いが、真円度などの精度が劣る欠点がある。これまで真円度劣化の原因となるスプリングバックを抑制する手段として曲げ部を強圧する方法、バラツキを少なくする手段として変動要因の板厚と、パンチとダイのクリアランスを同一にする方法¹⁾が提案された。

UOプレス品は全域が曲げ部のため、一度に強圧しようとする加工荷重が大きくなる。そこで部分的に逐次、加工すれば低荷重で全域強圧できることに着眼し、Fig.2のように外周軸方向に溝形状を付与することで、真円度の向上を図るように検討した。

プレス加工分野において、金型トライ期間・費用の低減および加工技術の向上を目的として、トライ前に数値シミュレーションを適用し加工工程の事前評価、方向付けを試みている。今回考案した新加工技術について実加工の支援に利用できるレベルにある^{2, 3, 4, 5)}FEMシミュレーションにより事前評価を行い、実験で検証した結果について報告する。

弾塑性有限要素法でUOプレス加工中の材料内部に発生する応力分布を分析し、溝形状付与により強圧されてスプリングバックが抑制される条件を求めた。その条件で実験を行い、板厚変動を含めた内径真円度の評価を行った。

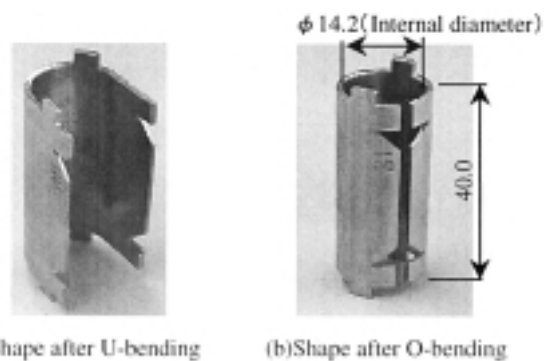


Fig.1 U-O processed work

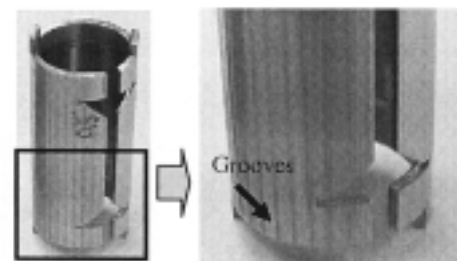


Fig.2 Advanced method for improvement of circularity

2. 実験および解析方法

2.1 UOプレス品の真円度向上の考え方

Fig.1(b)に示すUOプレス品の問題点として、他の板成形加工法に比べスプリングバックが大きく、形状凍結性が劣る。UO曲げ加工後材料の開放部が金型になじまないため、材料全体が湾曲し真円度の劣化が避

(社)日本塑性加工学会の了解を得て、“塑性と加工”第10巻第462号(1999.7)より転載

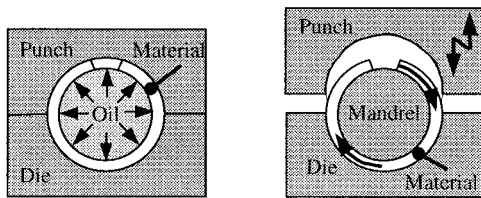
けられない。

真円度向上を図るには、原因となるスプリングバックを抑制することが望ましい。

曲げ加工中の周方向の応力分布は、中立面より外側は引張応力、内側は圧縮応力が発生し、絞りなどと比べ内外周の応力差が大きい。周方向の応力分布を均一にするには、周方向、軸方向に均一な圧縮をかける方法が考えられるが、Fig.1のような薄板の場合座屈が懸念される。座屈を防止し、かつ周方向の応力分布を制御には、板厚方向に圧縮をかけることが有効である。奥行きが長い平面ひずみでの曲げでは、せん断応力を無視すると、式(1)²⁾のMisesの降伏条件より、周方向の応力は板厚方向の応力により変化する。

$$\sigma_{\theta} = 2Y / 3 \quad (1)$$

は周方向の応力、 σ_r は板厚方向の応力、 Y は単軸引張での降伏点を示し、板厚方向に圧縮を加えることで周方向の応力も圧縮となる。従来の板厚方向に圧縮し、真円度向上を図るための手段をFig.3に示す。



(a)U-O process+hydraulic press (b)U-O process+multi bending

Fig.3 Conventional methods for improvement of circularity

(a)は液圧成形プレスで材料全体を内側より板厚方向に加圧し、金型に押し付けることで真円度を矯正する。(b)は材料を回転させて数十回にわけて、湾曲している部分を矯正しながら曲げ加工することで真円度向上を図る。前者は液圧で過大な荷重をかける必要があり、後者は低荷重で加工が可能だが、サイクルタイムが長く生産性が低い。そこで後者の矯正メカニズムを利用し、工具表面に突起を配置し、Fig.2に示すように材料の外周に軸方向に溝形状を付与することで部分的に板厚を圧縮し、低荷重で生産性を損なわずに真円度向上が図れないか検討することにした。

軸方向に溝付けすることで、見かけ上の外周展開長さも長くなり、芯金に密着した状態で曲げ加工される。真円度向上のポイントは溝と溝の未加工部分で、圧縮応力が得られるかにあり、溝の間隔を適正な条件に設

定する必要がある。そこで溝の間隔を変えてFEMで加工中の応力分布を評価した。材料板厚とパンチとダイによって形成されるクリアランスを一致させるため、UO曲げ、溝付けはすべて定圧加工としスプリングバックのバラツキ抑制を図った。

2.2 供試材

供試材には、JISG4305のオーステナイト系ステンレス鋼SUS304、公称板厚1.30mmのものを使用した。Table 1にJIS 13号B引張試験で求めた機械的特性を示す。

Table 1 Mechanical properties of work material

Work material	SUS304(Thickness1.30 mm)
Young's modulus/GPa	193
Yield strength/MPa	256
Tensile strength/MPa	735
Work-hardening exponent	0.260
Work-hardening coefficient/MPa	1370
Elongation/%	41.9

R.T. = 300K, Cross head speed = 1.67×10^{-2} mm/s

2.3 解析方法

本解析では汎用の弾塑性有限要素法プログラム(MARCK5)を用いた。40.0mm(L)×46.0mm(w)×1.25mm(t)のステンレス鋼板SUS304に対して、モデルはFig.4に示すように左右対称から1/2モデルとし、4節点アイソパラメトリック要素を使用し、要素数480、節点数606として平面ひずみ状態での解析を行った。金型は剛体壁とし、金型と材料の接触はクーロン摩擦則により定義し、摩擦係数は $\mu = 0.0$ とした。Misesの降伏条件を用い、加工硬化特性は式(2)にて入力した。

$$\bar{\sigma} \leq Y : \bar{\sigma} = E\bar{\epsilon}$$

$$\bar{\sigma} > Y : \bar{\sigma} = C(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n$$

ここで、 $\bar{\sigma} \cdot \bar{\epsilon}$ はそれぞれ相当応力・相当ひずみである。Table 1以外の各定数は $\epsilon_0 = 0.001$ 、ポアソン比 $\nu = 0.300$ で設定した。

Fig.4に示す突起の条件として、突起の高さは $H = 0.0\text{mm}$ (突起なし)、 0.050mm (突起あり)の2水準、突起の間隔は $\lambda = 0.087, 0.175, 0.349\text{rad}$ の3水準とし、U曲げダイ、O曲げダイ、O曲げパンチにそれぞれ選択して設定する。

次に、解析の手順について説明する。材料の中心軸上の1節点と任意の架空点はバネ定数 $K = 9.81\text{N/mm}$

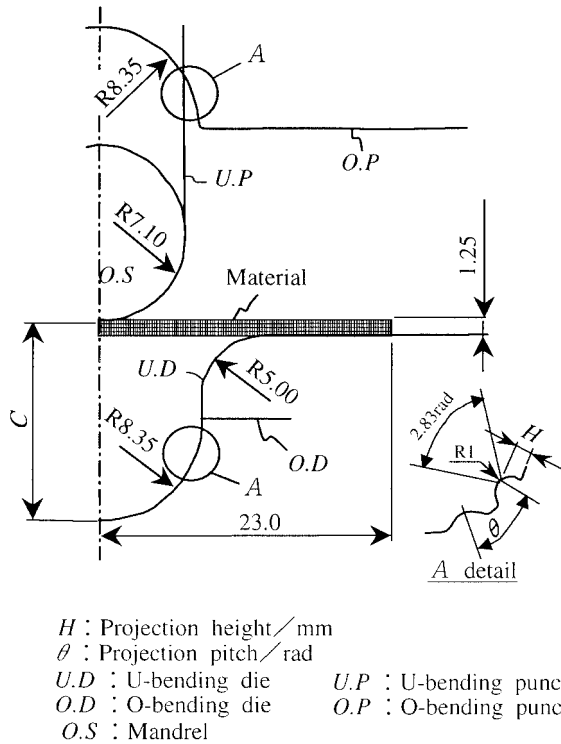


Fig.4 Simulation model for U-O process

の弱いパネで結ばれている。Fig.4の状態から材料をはさんだ状態で、同一半径のU曲げパンチと芯金を強制変位でクリアランスC = 1.250mmの位置まで下降させる。O曲げダイと芯金で材料を保持した状態でU曲げダイ、U曲げパンチを材料と接触しない位置まで移動させる。O曲げパンチをクリアランス1.250mmの位置まで下降させる。O曲げダイ、O曲げパンチ、芯金を材料と接触しない位置まで移動させて除荷する。

U曲げ加工中、O曲げ加工中の相当塑性ひずみ分布、主応力ベクトル図を求める。U曲げ加工後のスプリングバック量は、すべての工具を材料と接触しない位置まで移動させ除荷したときの直辺部の内側節点と中心軸がなす角度により求めることにした。

2.4 実験方法

今回の実験手順をFig.5に示す。供試材はSUS304、板厚1.30mmのものを使用する。板厚変動の影響をみるため、板厚を研削盤で1.22mmから1.28mmの範囲で任意の寸法に仕上加工した。今回の実験は、Fig.4に相当する金型でUOプレスし、プリ形状を作製した後、Fig.6に示す実験用金型で溝形状を付与し、真円度の矯正を行った。

U-Oプレス金型のU曲げダイ、O曲げダイ、O曲げパンチの半径は8.30mm、U曲げパンチ、芯金の半径

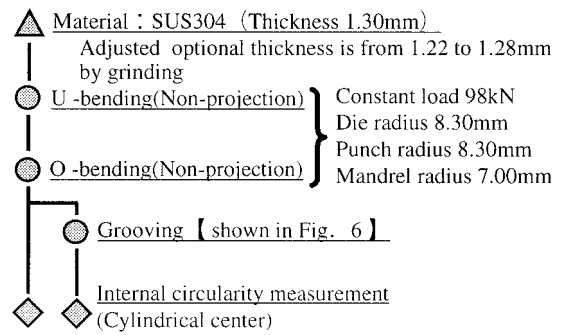


Fig.5 Experimental procedure

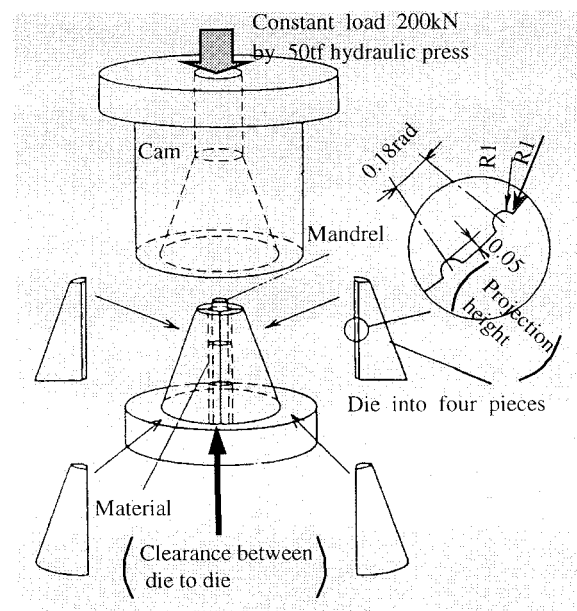


Fig.6 Experimental apparatus for providing grooves

は7.00mmで設定し、U曲げ工程、O曲げ工程とも50トン油圧プレスで98kNの一定荷重で加工した。

実験用金型のダイ半径はDr = 8.30mm、芯金半径Sr = 7.00mm、突起の高さはH = 0.05mm、突起の間隔は = 0.18radで設定した。ダイを4分割し、50トン油圧プレスで200kNの一定荷重でカムを介して加圧した。

真円度は円筒中央部の内側を真円度測定器で実測し、諸寸法は、3次元測定器、形状測定器等で計測した。

3. 結果および考察

3.1 解析結果

Fig.7に解析で求めたU曲げ加工中の相当ひずみ分布を示す。Fig.7の(a)は溝付けを行わない状態でのひずみ分布で、直辺部と曲げ部の中立面でひずみが0になる。中立面が板厚中心に位置することから、板厚方向の圧縮が小さい曲げ状態であり、曲げ部全域で内外周に0.072の相当塑性ひずみが発生する。一方Fig.7の(b)は突起高さ $H = 0.05\text{mm}$ 、間隔 $\theta = 0.175\text{rad}$ の条件でU曲げダイに突起を配置し、曲げ外周部に溝付けした場合の解析結果を示す。溝付け部には0.145のひずみが発生し、曲げによって発生するひずみを除外すると、突起によって新たに0.073のひずみを付与したことになる。溝付けした部分の材料は突起形状に沿ってひずみが生じるが、溝付けによって生じたひずみが板厚方向に貫通または溝同士が互いに干渉するほどの塑性流動は認められない。

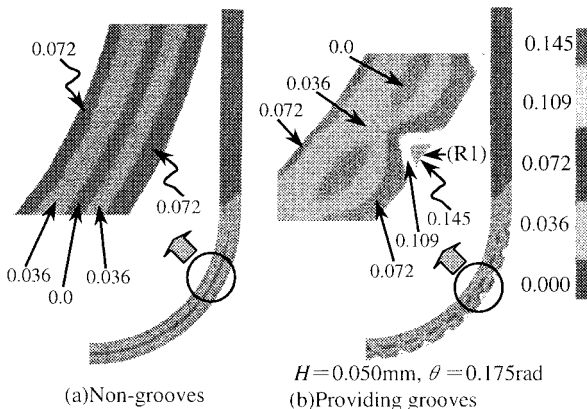


Fig.7 Effective strain distribution diagrams of U-bending (Calculated results)

材料板厚とパンチとダイによって形成されるクリアランスが同一の下死点において、溝付けなしでの加工荷重は36kNになる。更にパンチを0.05mm下げて板厚方向に強圧すると加工荷重は662kNと急激に上昇し、かつ曲げ頂点部が開口部より加工度が大きいいためスプリングバックが不均一となり真円度向上が望めない。一方、局所的に溝付けをする方法では、板厚を圧縮する面積が1/10程度となるため、加工荷重が計算上662kNから83kNへ減少し、かつ頂点部を含めた曲げ全域において均一なひずみが発生することから形状凍結性の向上が期待できる。

Fig.8に突起高さ $H = 0.050\text{mm}$ 一定で突起の間隔を3種類に変えてU曲げでダイに突起をつけた場合の、加工中の主応力ベクトル図を示す。Fig.8の(a)突起なしの条件では周方向に外周で785MPaの引張応力、内周で-785MPa圧縮応力が発生しており、スプリングバック量が大きく、形状凍結性が劣ることが予想される。Fig.8の(b)は突起の間隔を0.349radにしたときの主応力ベクトル図を示す。突起をつけた部分では板厚方向に圧縮されるため、式(1)より周方向の応力は圧縮になる。式(1)はせん断応力を無視しているが、実際の加工では突起をつけた部分と、未加工の間にはせん断ひずみが発生し、主応力の向きが回転しながら突起周辺部においても圧縮が形成される。よって溝付け部の周方向応力は圧縮に転じると共に、溝付け部に挟まれた未加工部分にも圧縮応力の影響が及ぶが、0.349radの条件では突起の間隔が広いために中心までは圧縮応力の影響が及んでいない。Fig.8の(c)は突起の間隔を0.175radにしたときの主応力ベクトル図を示す。

突起の間隔の中心まで圧縮応力となることから、例えば板厚変動などにより材料表面とダイ表面が完全に密着しない曲げでも、溝付けによる圧縮効果によって全域でスプリングバック量が減少し形状凍結性が向上

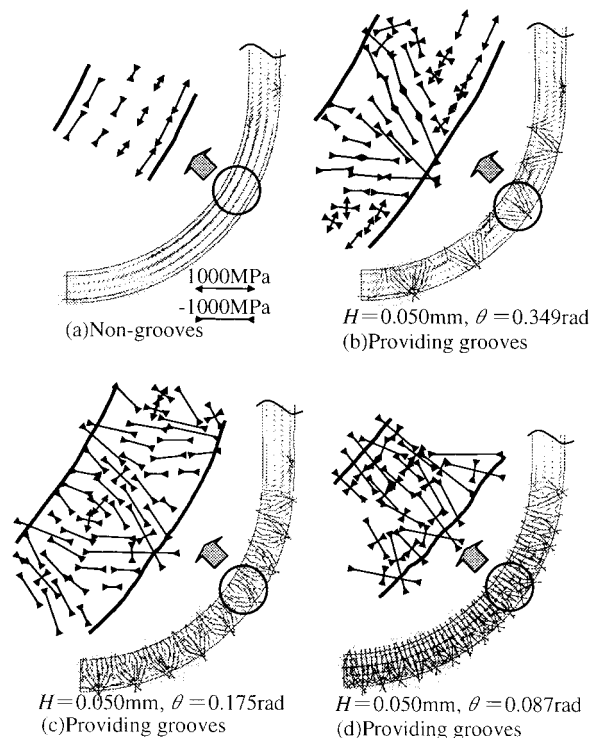


Fig.8 Principal stress vector diagram of U-bending (Calculated results)

することが期待できる．Fig.8の(d)は0.087radにしたときの主応力ベクトル図を示す．突起の間隔が狭いと未加工部分で圧縮応力が過度に干渉し，周方向の圧縮応力が不均一な分布となることから，スプリングバックが増大し，形状凍結性が劣化する可能性がある．

Fig.9はU曲げにおいて溝付けをした場合としない場合の比較，および溝付けをしたときに突起の間隔を変更した場合の各スプリングバック量を解析で求めた結果を示す．溝付けありで突起の間隔が0.175radのときスプリングバック量が最小になり，溝付けなしに対して，1/2から1/3程度のスプリングバック量に減少しており形状凍結性の向上が期待できる．主応力ベクトル図とスプリングバック量に相関があることを確認した．

次に，溝付きなしの条件で実験を行い計算値との比較検討を行ったところ，Fig.9より解析値の方が実験値より2割程度スプリングバック量が大きいことが判明した．原因として解析は摩擦係数を0としたことにより，材料の拘束条件が実際の金型を使った実験と異なることなどが考えられる．ただしFEMで開発の方向付けを行うものとし，得られた結果を実験で確認するといったプロセスにおいては，誤差は許容の範囲内と判断できる．

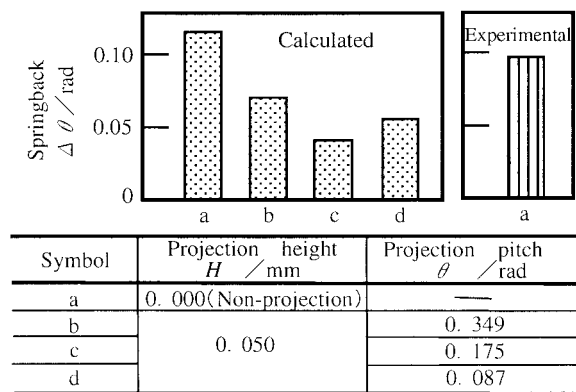


Fig.9 Springback after U-bending

Fig.10にO曲げ加工中の主応力ベクトル図を示す．溝付けをしない場合の解析結果(Fig.9の(a)の条件)と，前工程でのU曲げは溝付けを行わずFig.8およびFig.9で求めた突起高さ0.050mm，突起の間隔0.175radの適正条件のO曲げで溝付けした場合の解析結果(Fig.9の(c)の条件)を比較した．Fig.10の(a)の溝付けなしは，材料板厚に対しパンチとダイのクリアランスが理想的に一致した状態においてU曲げ同様，外周に引張応力，

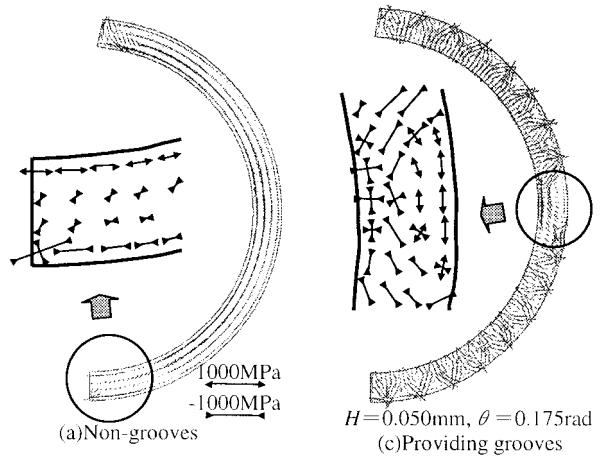


Fig.10 Principal stress vector diagram of U-O process (Calculated results)

内径に圧縮応力が発生しスプリングバック量が大きくなるのがわかる．加えて拡大表示してある曲げ頂点部において(頂点部から0.35radの範囲)，応力が反転し外周に圧縮応力，内周に引張応力が発生することでスプリングバックが不均一となり形状凍結性，真円度劣化の原因となっている．応力反転が生じた原因としてはU曲げで曲げ頂点部にうねりが発生し，O曲げにおいても加工履歴が残ったためと考えられる．

Fig.10の(c)の溝付けありでは，曲げ部全域においてほぼ均一な周圧縮応力が得られており，スプリングバック量が小さく形状凍結性，真円度などの精度に優れているのがわかる．曲げ頂点部から1.57rad(90度)に位置する金型分割面や，自由変形面となり材料の拘束が小さい開口部において引張応力が発生するが，曲げ部全域に占める割合は小さいことから大きな精度劣化には至らないと判断できる．

3.2 実験結果

Fig.11は，Fig.5に示すUO曲げ後に溝付けしたもので，芯金の外径寸法と実験で作成したサンプルの加工後の内径寸法の実測値から求めたD値を示す．

溝付けなしに対して，溝付けありはD値が小さく，突起の間隔が0.175radの条件で最小となる．Fig.9のスプリングバック量と単純な比較はできないが，スプリングバック量が抑制されて，D値は小さくなったものと考えられ，溝付けによって形状凍結性が向上したものと判断できる．

Fig.12に実験したサンプルの溝形状を測定した結果を示す．Fig.12の(a)は板厚1.28mm，Fig.12の(b)は板厚1.22mmで溝付けしたものであり，図中の実線は

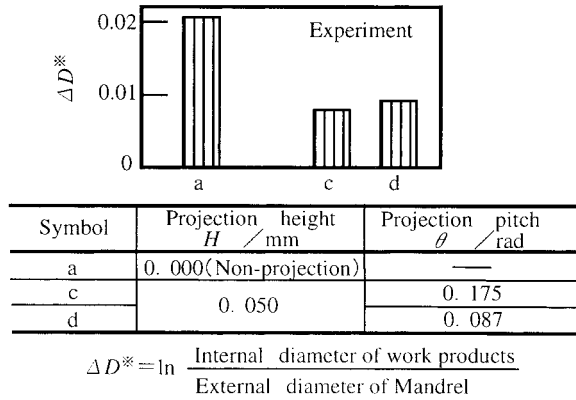


Fig.11 Experiment results after U-O process

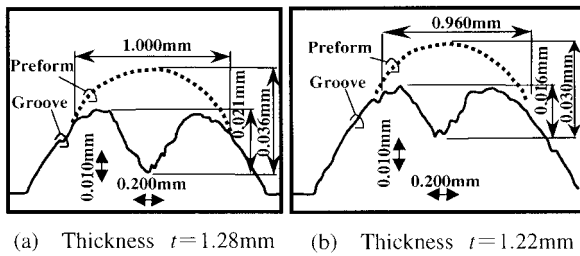


Fig.12 Profile of a groove (Experimental results)

加工後の形状，破線は加工前の形状を示す．溝幅が約1mmあり，両端はなだらかにだれている．これはFig.6に示すように，突起形状は工具寿命を考慮してR1で各直辺部を結んだため，溝幅が拡大した．なお実験・解析とも先端にはR1をつけているが，解析はFig.7に示すように両端にはR1をつけていない．突起高さは解析と同じ0.05mmで手配しており，溝深さの実測値も板厚によって若干差があるものの，0.030から0.036mmの範囲で狙いどおりの深さを確保している．溝の外観形状はFig.2に示すように溝幅1mmの

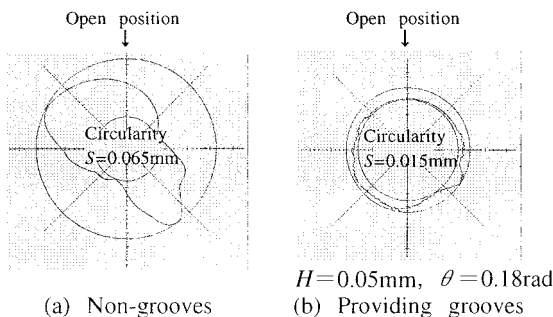


Fig.13 Results of the circular measurement (t = 1.28mm, Experimental results)

うち両側のだれ部約0.6mmは肉眼では判別しにくく，Fig.12より鋭利な形状に見える．

Fig.13に材料板厚1.28mmでUO曲げした後，溝付けしたサンプルの真円度測定結果を示す．図中上側がサンプルの開口部で，開口部両端を近接円で結んで表示してある．Fig.13の(a)は溝付けしていないサンプルで，全体が楕円形に変形しており，UO曲げの加工履歴が形状に残っている．開口部に対し左右非対称な形状となっているのは，U曲げ加工時に材料と金型の中心のずれにより生じたものと考えられる．Fig.13の(b)の溝付けしたサンプルは，UO曲げでの楕円形状が消滅し，金型分割面も含めて真円に近い形状となっている．

Fig.14に溝付けをしたサンプル，溝付けをしないサンプルにおいて，材料板厚を変えたときの真円度の測定結果を示す．材料板厚が減少するとダイの内径よりサンプルの外径が小さくなるため，溝付けなしのサンプルは材料が工具に密着せず曲げ足りない部分が生じ真円度が急に劣化する．溝付けしたサンプルは，板厚変動に対し若干溝深さは変化するものの工具の突起と材料は常に接触するため，溝付けによる板厚の圧縮効果が持続し真円度低下を抑制する効果がある．真円度の平均値も溝付けありの方が小さく，形状凍結性に優れている結果を得た．

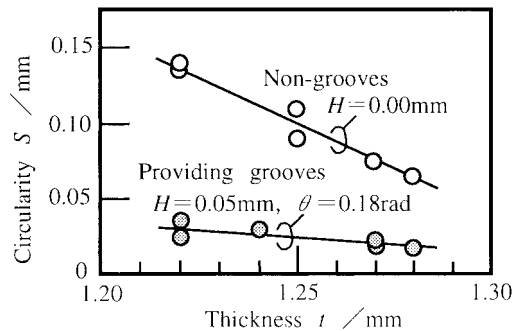


Fig.14 Influence of thickness on circularity (Experimental results)

外周軸方向に溝をいれる場合の金型設計上の留意点として，材料板厚公差の下限においても材料は突起に接触するよう工具寸法を設定しておく必要がある．加えて溝付けの工程は板厚変動を吸収するため，定圧加工で行うことが望ましい．今回突起高さは材料板厚の約4%で固定した．突起深さを深くすれば板厚方向の塑性流動が多く発生し，内周の応力分布に引張が生じ

る可能性がある。周方向に均一な圧縮応力を付与する、特に外周の引張応力を圧縮応力に変えるという考え方に基けば、溝付けは深くするより適正な間隔で配置する方が望ましいと考える。溝間隔決定の目安として、両側だれ部分を除いた溝の表面積が、UO曲げ外周面積の1/10から1/30に相当する溝付けを行うことを推奨したい。外周の溝が商品の意匠性、機能上許されない場合は、内周につける手段も考えられる。その場合は芯金をエキスパンド工具としサンプル脱着の工夫を要する。

4. 結言

UOプレス品の真円度向上を図る目的で、工具に突起を配置し、製品の外周に溝形状を付与することを検討した。

弾塑性有限要素法により応力分布およびスプリングバック量を求め事前評価をした。その知見を基にした実験を行い、従来工法より有用であることを確認した。

<参考文献>

- 1) 永井康友:塑性と加工,29-324(1988)69-74.
- 2) 後藤學・村松勤・黒田吉孝:昭63春塑加講論(1988)1-4.
- 3) 後藤學・村松勤・黒田吉孝:平元春塑加講論(1989)433-436.
- 4) 黒田吉孝・後藤學・村松勤:平2春塑加講論(1990)433-436.
- 5) 小川秀夫:塑性と加工,37-421(1996)183-186.
- 6) 後藤學:塑性学(1982)37-40,コロナ社.



<著者>



杉山 聡
(すぎやま さとし)

生産技術開発部
プレス・塑性加工に関する生産技術開発に従事。



安田 俊也
(やすだ としや)

機能品製造部
機能品に関する部品加工生産技術開発に従事。



江坂 真一
(えざか しんいち)

試作部
ラピッドプロト工法開発、試作システム開発に従事。



石川 孝司
(いしかわ たかし)

名古屋大学工学研究科
材料プロセス学専攻教授工学博士
塑性加工学、特に鍛造・圧延加工の高精度化、高品質化に関する研究に従事。



森川 伸之
(もりかわ のぶゆき)

試作部(現在、デンソー機工(株)へ出向)
試作品の塑性加工に関する工程設計、金型設計に従事。