論文

多軸加圧動作による 厚板容器壁への歯形成形工程の改善

広田 健治* 平川 泰輔**

森 孝信*** 藤村 博人***

Process Improvement in Gear Forming on Thick Drawn Cup Using Multi-action Pressing

Kenji HIROTA*, Taisuke HIRAKAWA **,

Takanobu MORI *** and Hiroto FUJIMURA ***

(Received on March 11, 2013)

There are many demands for cup-shaped parts with a gear shape in the automotive industry and a large load is often required for the complete filling of the gear portion in conventional progressive forming. In this study, a new method was proposed for solving the problem using a multi-action press. This method features the operation of depressing the cup wall to provide an appropriate shape for gear filling with the cup corner prior to gear forming. Experiments and FE analysis were carried out, varying the amount of cup wall depression. The filling ratio of the gear increased with increasing amount of cup wall depression and complete filling was achieved with a low load compared with progressive forming. An increase in load and burr formation were observed after the cup corner reached the bottom of the die. Accordingly, the optimum conditions for cup wall depression should be determined so that the unfilled portion is minimized at the stroke that the cup corner reaches the bottom of the die.

Key words: forging, forming property, sheet forging, multi-action press, forging load, gear, FEM.

1. 緒言

部品軽量化のために従来の鍛造品を厚板の板鍛造品に置き換える事例が増えている¹⁾。板鍛造では圧縮応力下での成形により成形限界の向上が期待できるが、加工荷重の増加や金型寿命の悪化が問題となる場合もある。回転伝達部品では絞り品の側壁部への歯形成形が行われており、転造やカム機構により径方向に圧縮を加える方法と、壁部に縦方向の圧縮を加える方法がある。プレスに加圧方向に一致した後者は歯形部の増肉も可能であるが、壁部の座屈や荷重の増加が課題である。長井らは歯形部の成形をしごき加工と側壁の端部加圧に分け、端部加圧では容器底部への材料流動を許すことで密閉状態になることを回避している²⁾。座屈は壁部の厚さと高さに影響されるが、前田らは歯形の裏側に座屈を許容することで歯形部の充填を低荷重で実現している³⁾。

上記の事例は搬送加工を前提として記述されているが、近年、複数の加圧軸を駆動させる多軸プレスをを用い、工程を縦方向に送るワンショット加工も注目を集めている。この方法ではプレスの設置面積や加工荷重は各工程の最大値で決められるためプレス設備の小型化を実現できる。その結果として一般的な低棟工場への設置が可能となり、後続工程との直結によりリードタイムの短縮にもつながる。また、工程間の搬送がないため軸対称部品では同芯度が向上するほか、多軸動作を利用することでより複雑な成形が可能となる^{4), 5)}。絞り成形では素板もしくは容器壁の端部を絞り方向に加圧しながら絞ると限界絞り比が向上することが示されている^{6), 7)}。この考えを多軸プレス成形に応用して大幅に工程数を削減したり、容器壁の局所的な増肉を達成した事例が報告されている^{8), 9)}。一方、ワンショット加工では分割された金型を縦方向に動かして所定の位置に合せたときに製品形状が得られるようにしなければならない。このため、横方向へ工程を送る従来の工法とは異なる工程設計のノウハウが必要となる。

本研究では、前述のような外壁に歯形を有する厚板絞り部品を対象に、多軸加圧動作を利用した新たな工法を提案し、より低荷重で歯形部の充填を改善した結果について述べる。

* 九州工業大学 工学部 〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1
School of Engineering, Kyushu Institute of Technology,
1-1, Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu, 804-8550, Japan.

** 元 九州工業大学大学院 工学府 〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1
Graduate school of Engineering, Kyushu Institute of Technology,
1-1, Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu, 804-8550, Japan.

*** 森鉄工株式会社 〒849-1302 佐賀県鹿島市大字井手 2078
Mori Iron Works CO., LTD., 2078, Ide, Kashima, 849-1302, Japan.

2. 歯形成条件

試験片および対象とする部品形状を Fig. 1 に示す。自動車部品であり、浅い二重円筒の外周に 54 個の台形状の歯形を有する。歯形に近い A 部に浅い凹みがあることが特徴であり、この凹みのために歯形部分の充填が進みにくいことが懸念される。Fig. 2 にこの部品を単軸加圧の繰り返しで成形する場合の加工工程を示す。Fig. 2(a)のように試験片を設置してボトムダイの突起 A を押込んだ後、①、③、④、⑤

Fig. 1 Dimensions of specimen and product

Table 1 Mechanical properties of material applied

Material (JIS)	Thickness	Yield stress	Tensile strength	Total elongation
SPHC	5 mm	236 MPa	308 MPa	41 %

Fig. 2 Schematic of forming procedure

Fig. 3 Structure of five-axis hydraulic press

Table 2 Conditions for FEM analysis

Number of elements	20000
Object type	Tools : Rigid body Specimen : Rigid-plastic body
Flow stress	$\sigma = 496 \varepsilon^{0.16}$ MPa
Step increment	0.1 mm / step
Friction coefficient	$\mu = 0.12$

の順に Fig. 2(b)の位置まで各工具を駆動する。①の過程ではパンチと成形ダイにより外周絞りと 2 回のしごき加工を経て、型の底部で歯形成が行われる。この間、ボトムダイは②の向きの背圧により試験片を保持した状態でパンチとともに下降する。

A 部の突起押込みにより内壁側と外壁側の材料流動の干渉が抑制されるため、外壁と内壁の成形は独立に考えることができる。今回注目するのは外壁部の歯形成であるため、本実験では内壁に関する工程(③、④の動作)は省略し、①、⑤の順に各工具により所定の位置まで加圧を行った。

成形には森鉄工株式会社製の 5 軸油圧サーボプレス MSF200-M32 を用いた。Fig. 3 にその構造を模式的に示す。上側に 3 つ、下側に 2 つの加圧軸を有する構造で、括弧内の数値は各加圧軸の最大加圧能力を表している。また、各加圧軸の番号は Fig. 2(b)の金型の番号と対応している。

被加工材は板厚 5mm の熱間圧延鋼板であり、機械的性質は Table 1 に示すとおりである。試験片は体積計算から外径 80mm、内径 10mm の円盤とした。また、予備実験から外壁の端部を加圧する際に型のすきま部への材料流動によりばりが生じることがわかったため、試験片外周には Fig. 1 のように切削加工により面取りを与えた。潤滑には冷間鍛造用の非反応型潤滑剤 (日本パーカライジング㈱製 FL-E740C) を使用した。

考察として、一歯分の扇形領域を対象に商用 FEM コード DEFORM-3D を用いて三次元剛塑性有限要素解析を行った。主要な解析条件を Table 2 に示す。工具はすべて剛体、被加工材は剛塑性体とした。計算に用いた応力ひずみ曲線は引張試験から近似した値を用いた。また、摩擦係数は同じ板材に対して実施したリング圧縮試験に基づき動摩擦係数を $\mu = 0.12$ の一定値に仮定した。

3. 従来工法による成形

3.1 成形荷重および成形結果

Fig. 2(b)の①、⑤の順に成形した場合の結果を述べる。なお、このように単軸加圧を繰り返す方法は金型を並列に配置して 1 工程ずつ加圧を行う加工に相当し、以降では従来法と呼ぶ。

Fig. 4 に絞りパンチおよび外壁加圧パンチの荷重線図を示す。横軸はストロークを累積して記載しており、絞りパ

Fig. 4 Load-stroke curve

Fig. 5 Effect of compression of outer wall on gear filling

ンチによる加圧終了点を外壁加圧の開始点に一致させている。また、絞りパンチ荷重には②による背圧荷重 500kN も加算されている。絞りパンチによる成形では、5 つの加工力のピークが見られ、ボトムダイの突起の押込み、絞り、2 回のしごき、歯形成にそれぞれ対応している。最初の突起押込み時に荷重増加が見られるが、絞り、しごき、歯形成の荷重は比較的低い。一方、外壁加圧では加工直後から荷重が急増して加圧軸の限界荷重に達し、所定のストロークまで加圧を行うことができなかった。

Fig. 5 に Fig. 4 の B 点、C 点での成形品の歯形部外観と歯先の稜線（写真の破線）における縦断面形状を示す。なお、断面形状は断面写真から画像処理によって抽出した輪郭像に工具の輪郭形状を重ねて表している。絞りのみの場合に比べて外壁端部の加圧を行うことで歯形の充填が進んでいる様子がわかるが、まだ未充填が多く残留している。充填状況を定量的に比較するために、次式により相対充填率 R を定義する。

$$R = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \quad (1)$$

ここで、 S_0 、 S_1 は Fig. 5 の縦断面において外壁加圧前後で

Fig. 6 Load-stroke curve for outer punch (FEM)

Fig. 7 Distribution of axial compressive stress on longitudinal section along dotted line in Fig.5

の未充填面積を表す。相対充填率 R は絞りパンチだけで歯形成した状態に対して後続成形でどれだけ充填が進んだかを相対的に表す指標であり、完全充填し S_1 が 0 となったときに R は 1 となる。実際に相対充填率を求めると $R=0.41$ となり、絞りパンチで成形した後で外壁を加圧しても 4 割程度しか歯形部の充填は向上しないことがわかった。

3.2 歯形充填挙動

Fig. 4 の外壁加圧工程（ストローク 59mm 以降）に対する解析結果を Fig. 6 に、歯底部分（Fig.5 の点線）の縦断面における外壁加圧方向の圧縮応力分布を Fig. 7 に示す。Fig. 6 の D 点は端部が平坦化され外壁全体が加圧され始める時期、E 点は Fig. 7 に示す外壁底部の P1 点が歯型底部の P2 点に到達する時期をそれぞれ表しており、荷重の増加傾向に変化が見られる。

Fig. 7(a) は Fig. 6 の D 点に達する前の状態であり、外壁加圧パンチとの接触部が局所的に変形していることがわかる。外壁端部に均一に負荷がかかるようになった(b)の状態では、ダイ歯型の導入部と外壁加圧パンチの間に高い圧縮応力が見られる。一方、形状を見ると外壁底部の P1 点と歯型底部 P2 点の間に空隙があり、加圧によって外壁が下方へ移動できる余裕がある。これらのことから、D 点と E 点の間では、歯型導入部の稜線でかき分けられた材料が外壁の下降とともに容器壁直下の空隙へ押し出されている状態と考えられる。

これに対し E 点以降の(c)を見ると、外壁全体に圧縮が及んでいることがわかる。この状態では、P1 点が P2 点に達して外壁全体が下方へ移動できなくなり、加圧された材料は向きを変えて歯型角隅部の未充填域に流動しようとする。この材料流動の変化により圧下のストロークに対して荷重増加の傾きが変化したのではないかと考えられる。

4. 多軸動作を利用した改善策の検討

4.1 成形工程

3.2 節での検討をもとに、Fig. 8 のような工程を考案した。まず、Fig. 6 の E 点以降で荷重増加が急になることから、E 点において未充填が残らないようにすることが有用であると考えられる。そこで、Fig. 8(a)のように外壁部のみを沈み込ませる工程を追加し、歯形成を行う前に外壁底部に歯型底部の縦輪郭に近い形状を付与するようにした。

また、Fig. 4 と Fig. 6 の比較から外壁加圧荷重は Fig. 6 の E 点の手前で限界荷重に達しているように見える。そこで、成形荷重に余裕のある絞りパンチにも外壁加圧荷重の一部を負担させることを考え、Fig. 8(b)のように歯形成時に絞りパンチと外壁加圧パンチを同時に下降させるようにした。ただし、外壁加圧軸の限界荷重（Fig. 3 ⑤）を超えた場合

Fig. 8 Schematic of new method using multi slide motion

には外壁加圧パンチは停止し、絞りパンチのみが下降する。また、Fig. 8(a)で与えた形状がくずれないようにボトムダイには十分な背圧荷重 (500kN) を負荷する。

Fig. 8 に示す 2 工程からなる成形方法を、以降では前述の従来法と区別して新工法と呼ぶ。次節では Fig. 8(a)に示す外壁押込み量 y を 2~3.4mm まで変化させて実験を行う。

4.2 成形荷重および成形結果

新工法による成形品の歯形部外観と歯先の稜線 (写真の破線) における縦断面形状を Fig. 9 に示す。Fig. 5(b)の従来法の結果と比べると歯形部の充填が大きく改善されていることがわかる。外壁押込み量 y が大きくなると歯型ダイとボトムダイの隙間に図示のようなばりが生じることがわかった。また、(a)ではパンチ肩丸みに相当する部位にひげが見られるが、この点については 4.4 節で述べる。

外壁押込み量 y による歯形部の充填とばりの生成状況を Fig. 10 に示す。左側の縦軸は(1)式で定義した相対充填率、右側の縦軸はばり高さを表している。点線で示した従来法の相対充填率と比較すると、新工法では y を増やすことで大幅に歯形部の充填が向上し $y \geq 2.5\text{mm}$ で完全充填が得

Fig. 9 Difference in filling of gear teeth depending on compressing condition of outer wall (New method)

Fig. 10 Difference in gear filling and burr formation depending on depressing amount of outer wall

Fig. 11 Load-stroke curves for drawing punch

られている。また、ばりは完全充填後に生じていることがわかる。このことから $y=2.3\sim 2.5\text{mm}$ の範囲に完全充填し、かつ、ばりも生じない最適な外壁押込み量が存在すると考えられる。

Fig. 11 に実験における新工法での歯形成形時の絞りパンチ荷重線図を従来法と比較して示す。従来法のデータは Fig. 4 のストローク 54~59mm の部分に相当する。外壁加圧パンチを駆動するインナープレス (Fig. 3⑤) はメインプレス (Fig. 3①) 内に設置されているため、新工法の絞りパンチ荷重には外壁加圧パンチの荷重が含まれている。また、ストローク 1mm までの一定荷重はボトムダイの背圧荷重であり、その後の荷重増分が歯形成形によるものと言える。Fig. 11 ではこの時期をストローク 1mm に合わせて記載しているため従来法と新工法で荷重曲線の終点が異なっている。したがって、ストローク 1mm 以降での新工法と従来法の荷重の差が新工法において外壁加圧パンチを同時に下降させたことによる荷重増加に相当する。新工法では行程終期に荷重の急増が見られ、その差は外壁押込み量 y が大きいほど顕著である。 $y=2.7\text{mm}$ の行程終期の荷重増加は完全充填後のばり生成の段階と考えられ、その条件を避ければ従来工法と新工法の成形荷重の差は比較的小さく、絞りと同時に外壁加圧を行っても総荷重としては顕著な増加にはつながらなかった。

Fig. 12 に外壁加圧パンチの加圧軸で計測された荷重線図を示す。(a)には Fig. 10 の相対充填率を括弧書きで付記している。(b)には Fig. 6 で定義した D 点、E 点を記載している。また、工具を剛体とした解析ではばりは現れないため、ばりの生じた $y=2.7\text{mm}$ の条件は除外している。従来法の結果は Fig. 4 のストローク 59mm 以降に相当するが、所定のストローク以前に限界荷重に達しており相対充填率も 0.4 程度であった。これに対し新工法では荷重の増加は緩やかであり、加圧軸の許容荷重以下で高い充填率が得られている。このことから、絞りパンチと一緒に外壁加圧を行うことで外壁加圧パンチの負担荷重が低減されたと言える。新工法における行程初期の一定荷重はボトムダイの背圧荷重のうち外壁加圧パンチが受ける力である。実験結果では外壁押し込み量 y が大きいほど荷重が高いように見えるが、背圧による荷重を差し引いて見れば(b)のように各曲線は重なる。ただし、解析結果は実験値よりも荷重が高く、絞りパンチと外壁加圧パンチでの荷重分配比率が正しく再現されていないと考えられる。その一因として、金型を剛体

Fig. 12 Load-stroke curves for outer punch (New method)

Axial compressive stress (MPa) : -750 0

Fig. 13 Distribution of axial compressive stress on longitudinal section along dotted line in Fig. 9 (New method, $y=2.3\text{mm}$)

Fig. 14 Close-up of unfilled portion at punch shoulder (New method)

とした解析では実験よりも拘束の強い状態で加工されていたことが挙げられる。

4.3 歯形充填挙動

新工法で良好な充填が得られた $y=2.3\text{mm}$ の条件と従来法の結果を比較する。Fig. 12(b)のE点前後での縦断面形状と加圧方向の圧縮応力分布をFig. 13に示す。Fig. 12(b)においてもD点とE点で荷重にFig. 6と同様の変化が見られ、E点前後での応力分布の傾向も同等である。したがって、両方法とも外壁底部 (Fig. 7(a) P1) が歯型底部 (Fig. 7(a) P2) に到達すると荷重の増加が急になると推察でき、その状態になったときの未充填の量が最終的な歯形部の充填状況を支配していると考えられる。すなわち、適切な外壁押込み量を与えた新工法では、外壁底部が歯型底部に接した段階でほぼ未充填がない状態となったため完全充填を達成できたと考えられる。

4.4 パンチ肩丸み部のひけ

新工法では外壁を押込む際に、パンチ肩丸み部にすきまが生じる。このすきまは外壁の歯形成形で供給される材料で埋め戻されるが、Fig. 9(a)の断面形状に見られるように条件によってはわずかに残留することがわかった。Fig. 14に完全充填近傍の外壁押込み量 $y=2.3\text{mm}$ と完全充填した後に大きなばりが生じた $y=3.4\text{mm}$ でのパンチ肩丸み部の形状を示す。 $y=3.4\text{mm}$ ではひけはなくパンチの肩丸みに沿って充填しているが、矢印の箇所に折れ込みが確認できる。これに対し、 $y=2.3\text{mm}$ ではひけが見られるが、その形状は鋭利ではなく材料が折れ込んだような形跡も見られない。

ひけを解消するために、外壁加圧パンチに一定以上の負

荷がかかると後退するように設定し歯形充填時に外壁を少し伸ばすことを試みた。外壁パンチが後退する設定荷重を下げると外壁が伸びてひけは改善されたが歯形部の未充填が増えてしまい、歯形部の充填を維持してひけを解消することはできなかった。ひけ発生部位の形状を変えても製品の機能として問題がないなら、ひけの形状に応じて絞りパンチの肩丸み部の形状を変化させることで改善が見込まれる。これらの点に関しては今後の課題とする。

5. 結 言

外壁に歯形を有する浅い厚板円筒部品を対象に、多軸加圧動作を活かして低荷重で歯形部の充填をはかる工程を検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) 絞り後に外壁端部を加圧する従来法では、外壁底部が歯型底部に接すると外壁加圧荷重が急増し、それ以降で歯形部の充填が進みにくくなることが判明した。
- (2) この結果をふまえ、荷重急増前に未充填がなくなるよう歯形成形前に外壁を沈み込ませ、かつ、歯形成形時に絞りパンチと外壁加圧パンチを同時に下降させて外壁加圧パンチへの荷重負担を減らす新たな工程を提案した。適切な外壁の沈み込みを与えれば、従来法よりも低荷重で歯形部の完全充填を実現できることがわかった。
- (3) 上記の最適条件では外壁内側のパンチ肩丸み部にひけが残留した。このひけは本実験では完全に解消することはできなかったが、鋭利な形状ではなく内部にき裂状の折れ込みも見られなかった。

本研究は財団法人九州産業技術センターの平成 23 年度公募課題「九州の新成長戦略に基づく事業創出推進事業」として実施した成果の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 近藤一義：第 190 回塑性加工シンポジウムテキスト，(2000)，33-40.
- 2) 長井美憲・内田幸彦・庄司直人・椎名宏行：塑性と加工，**37**-426(1996)，736-742.
- 3) 前田昭宏・荒木邦彦：塑性と加工，**39**-445(1998)，106-110.
- 4) 森孝信：プレス技術，**48**-11(2010)，50-54.
- 5) 早瀬正宏・岩田大助・堀智之・森孝一・森孝信：塑性と加工，**53**-623(2012)，1041-1043.
- 6) 佐藤英司・清水透・大内清行・佐野利男・淵澤定克：塑性と加工，**36**-411(1995)，402-407.
- 7) 古閑伸裕・大瀬智之・飯島孝文：塑性と加工，**41**-476(2000)，921-925.
- 8) 石原貞男・峯功一・鈴村敬：塑性と加工，**44**-507(2003)，409-413.
- 9) 中野隆志・芦原和男・石永信行・井村隆昭・外山泰治：塑性と加工，**47**-551(2006)，1146-1150.