論文

湾曲矩形棒・矩形管成形形状に及ぼす出口位置と
押し出し比の影響に関する有限要素解析

木原 茂文* 川西 毅** 白石 光信***

三好 峻佑**** 新川 真人*****

Determination of Effects of Exit Positions and Extrusion Ratios on Forming
Curved Rectangular Bars and Tubes by Finite Element Analysis

Shigefumi KIHARA*, Tsuyoshi KAWANISHI**, Mitsunobu SHIRAISHI***,

Syunsuke MIYOSHI**** and Makoto NIIKAWA*****

(Received on January 11, 2008)

In this paper, we describe the mechanisms responsible for the forming of rectangular bars and tubes extruded through inclined dies by numerical simulations and experiments. We carried out simulations and experiments of rectangular bars and tubes at various exit positions and extrusion ratios. The calculated trend of curvature showed good agreement with experimental results. From this reason, the validity of the numerical simulation was concluded. Curvature generation mechanisms were elucidated on the bases of simulation outputs related to the distributions of the material exit velocity and dead metal area. The turn direction differs according to the difference in exit position and the curvature increases with extrusion ratio as observed from the analytical results. The generation of dead metal area and the configuration of the container used affect the curvatures of curved rectangular bars and tubes.

Key words: extrusion, forward extrusion, FEM, deformation behavior, manufacturing system.

1. 緒言

鍛造や板成形時のフレキシブル加工技術について多くの検討がなされている^{1, 2)}。従来の押し出し加工は、一様な断面形状を有する長尺材を生産するための技術として用いられてきた。押し出し加工では、ダイス孔形状やダイス孔出口位置による出口近傍の材料流動の変化によって、押し出し後の製品に曲がりが発生する³⁾。したがって、押し出し加工のフレキシブル化には押し出し時の材料流動から曲がりを制御する技術の開発が不可欠である。押し出し時の出口近傍の材料流動を制御する方法として、曲げを制御しながら押し出し成形を行うダイス傾斜押し出し加工法を提案している⁴⁾。ダイス傾斜押し出し加工法は押し出しダイスを押し出し方向に対して傾斜させた方法である。著者らは、押し出し加工時の押し出し現象を数値的に検討し、出口位置と出口寸法一定の条件下で湾曲矩形棒押し出し時のダイス傾斜角の影響による曲がり

のメカニズムを解明した⁵⁾。

出口位置と押し出し比を変えた時の曲がり現象のメカニズムを解明するため、湾曲矩形棒成形の数値解析と実験及び湾曲矩形管成形の数値解析を行った。矩形管の実験結果には、文献6の結果を用いた。本報では、湾曲矩形棒成形時の出口位置と押し出し比の影響と湾曲矩形管成形時の押し出し比の影響について検討した結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 矩形棒成形

矩形棒押し出し実験装置の概略図を Fig.1 に示す。 $W_c \times h_c$ をコンテナ内寸法、 $W_s \times h_s$ をダイス孔寸法とする。素材であるカラークレイをコンテナに挿入し、300kN 万能材料試験機を用いて、押し出し実験を実施した。出口位置を変えた場合と押し出し比を変えた場合の2種類の実験を行った。ダイスを押し出し方向に傾斜させた角度をダイス傾斜角 ζ 、ダイス出口部の素材押し出し方向への投影面積に対するダイス入口部の素材断面積の比を押し出し比 $R = (W_c \times h_c) / (W_s \times h_s)$ と定義する。出口位置を変えた実験では、押し出し比 $R=5.7$ 一定とし、出口位置を上部、中央部、下部とした。ダイス傾斜角は $\zeta=0^\circ$ 、 15° 、 30° の3種類である。押し出し比を変えた実験では、出口位置を出口上部で固定し、ダイス傾斜角 $\zeta=0^\circ$ に対して押し出し比 R を2.0, 3.0, 5.7とした。コ

*高松工業高等専門学校 機械工学科 〒761-8058 高松市勅使町 355
Department of Mechanical Engineering, Takamatsu National College of
Technology, 335 Chokushi-cho, Takamatsu 761-8058, Japan.

**高松工業高等専門学校・専攻科 同上 Student, Advanced Course, ibid.

***福井大学大学院 〒910-8507 福井市文京 3-9-1
Graduate school, Fukui University, 3-9-1 Bunkyo, Fukui 910-8507, Japan.

****福井大学大学院 同上 Graduate student, ibid.

*****福井大学 工学部 同上
Faculty of Technology, Fukui University, ibid.

ンテナ内寸法 $W_c \times h_c$ は 17×32 mm, ダイス厚さは 3.0 mm である. ダイス孔幅 W_s とダイス孔高さ h_s については, $W_s/h_s=0.33$ と一定になるように, 各押し出し比に応じて決定した. 例えば, 押し出し比 $R=5.7$ の場合は, $W_s=5.6$, $h_s=17.0$ となる.

2.2 矩形管成形

矩形管押し出し実験装置の概略図を Fig.2 に示す⁶⁾. 矩形棒成形と同様に押し出し実験が行われた. 矩形管成形の実験では, ダイス傾斜角 $\zeta=30^\circ$ に対して押し出し比 $R=1.5, 2.5, 3.0$ に設定した. コンテナ内幅と高さ W_c は 18 mm, マンドレル幅と高さ W_m は 9.0 mm, ダイス厚さは 3.0 mm である. ダイス孔幅と高さ W_s については, 矩形棒成形と同様に, 各押し出し比に応じて決定した. 例えば, 押し出し比 $R=1.5$ の場合は, $W_s=15.6$ mm となる.

3. 解析方法

Fig.3 に解析モデルを示す. 解析には, 著者らが開発した鍛造解析ソフト⁷⁾を用いた. 素材が存在する領域と素材が存在しない領域を解析領域としているのが特徴である. 素材領域と素材前方領域を解析領域とし, 全領域を 3500 から 4500 の要素数の六面体要素で定義した. ここで, 素材領域は成形前に素材が存在している領域, 素材前方領域は成形後に素材が存在すると予測できる領域である. 素材はパー

ティクルという 60000 から 90000 の粒子群で定義し, コンテナ内壁を剛体の平面要素で定義した. Fig.1, 2 の正面図からわかる通り, モデルが左右対称性であるため, 1/2 をモデル化した. パンチ部を速度境界条件で定義し, 六面体要素でモデル化された解析空間内の速度場に基づきパーティクルを逐次移動させる. この移動により, 素材成形形状を計算することができる. 解析領域の速度, 応力, ひずみ, ひずみ速度及び単位体積当たりの仕事量は, 圧縮性を考慮した剛塑性有限要素法⁸⁾に基づいて計算している. 素材であるカラークレイの変形抵抗として, $\sigma=0.21 \varepsilon^{0.12}$ MPa⁹⁾を用いた. コンテナと素材及びダイスと素材の間の摩擦係数は, 計算結果と実験結果を比較した結果から 0.25 に設定した. その他の条件は実験条件に対応させた.

4. 解析結果と考察

4.1 矩形棒成形

Fig.4 に出位置とダイス傾斜角 ζ を変えた時の矩形棒成形形状を示す. (a) は計算結果, (b) は実験結果である. ダイス傾斜角 $\zeta=0^\circ$ の出口中央部では, 曲率 0 で押し出されることが予測されるため省略し, ダイス傾斜角 $\zeta=0^\circ$ の出口下部は出口上部の条件を反転させたものとなるため省略した. 出口位置が上部に位置する時は上向きに曲がり, 下部に位置する時は下向きに曲がる傾向がある. さらに, ダイス傾斜角を大きくすると上向きの曲率はほとんど変化がな

Fig.1 Schematic illustration of extrusion process for producing curved rectangular bars

Fig.2 Schematic illustration of extrusion process for producing curved rectangular tubes

Fig.3 Analytical model of extrusion process for producing curved bar and tube

Fig.4 Particle flow patterns and product profiles of rectangular bar at various exit positions and inclination angle of die (Extrusion ratio $R=5.7$, $W_s=5.6$, $h_s=17$)

いのに対して、下向きの曲率は大きくなる傾向があることが分かる。押し出し比 R を変えた時の矩形棒成形状態を Fig.5 に示す。押し出し比が小さくなるに従い、上向きの曲率が小さくなっている。

Fig.6 に出口位置を変えた時の矩形棒の曲率を示し、Fig.7 に押し出し比 R を変えた時の矩形棒の曲率を示す。Fig.4 のダイス傾斜角 $\zeta=10^\circ$ 、出口上部のような上向きの曲率を正、Fig.4 のダイス傾斜角 $\zeta=10^\circ$ 、出口下部のような下向きの曲率を負として表している。Fig.6 から、実験結果と計算結果を比較すると、出口上部では誤差約 29~77%、出口中央部では誤差約 10~12%、出口下部では誤差約 7~14% で計算できていることが分かる。押し出し比 R を変えた計算結果を示した Fig.7 より、何れも誤差 45% 程度で予測できている。出口上部での成形結果の誤差が大きいものの、出口中央部、出口下部では実用上十分な精度で曲率を予測していることが確認でき、出口上部を除いては、湾曲矩形棒成形時の出口位置と押し出し比の影響を評価できると言える。

コンテナ中央断面の出口近傍の素材流出速度分布とデッドメタル領域及び、素材流れの計算結果を Fig.8 に示す。(a), (b), (c) は $R=5.7$, $\zeta=15^\circ$ 一定で、それぞれ出口上部、出口中央部、出口下部の結果であり、(d), (e), (f) は出口上部、 $\zeta=0^\circ$ 一定で、それぞれ押し出し比 $R=5.7, 3.0, 2.0$ の結果である。図中の細線の長さは、一定時間内のパーティクル移動量を表し、長さが大きいほど移動速度が大きいことを意味している。ただし、押し出し比の大きさによって流動速度が異なるため、パーティクルがダイス孔付近を通過する時の材料流出速度分布を各押し出し比の大きさに応じて表示している。押し出された後のパーティクルは剛体的に移動するため、出口部の材料流出速度分布によって押し出し材の曲がりの方向と曲率が決定されることになる。材料流出速度を表す細線の長さに注目すると、(a), (d), (e), (f) では長い細線がダイス孔下部に分布し、(b), (c) ではダイス孔上部に分布することが確認できる。これにより、上向きの曲がりが発生する(a), (d), (e), (f) ではダイス孔下部の材料流出速度が大きく、下向きの曲がりが発生する(b), (c) ではダイス孔上部の材料流出速度が大きいということが分かる。さらに、ダイス孔部の材料流出速度分布より、ダイス孔上部と下部の流出速度の差が小さくなるほど曲率が減少する

Fig.5 Particle flow patterns and product profiles of rectangular bar at various extrusion ratios (inclination angle of die $\zeta=0^\circ$, Upper exit position)

ことが分かる。

Fig.8 で示したダイス出口コーナー部のパーティクルは、デッドメタル領域に対応するパーティクルであり、時間刻み 0.2 秒毎のパーティクル移動量の差が 0.5 mm 以下になったパーティクルを表示している。すべてのコーナー部にデッドメタル領域が存在していることが確認できる。(a), (b), (c) では、出口位置の違いによりデッドメタルが発生する領域が異なることが分かる。(d), (e), (f) では、押し出し比が大きくなるほどデッドメタル領域は大きくなっている。

Fig.8 の素材流れの矢印は代表的なパーティクルの移動方向を示しており、出口近傍のパーティクルがダイス面に沿って押し出されている様子が確認できる。(a), (b), (c) に注目すると、出口上部になるほど、ダイス面での上向きのパーティクル流れが大きくなることが観察される。このパーティクル流れは、出口近傍の流出速度が速い部分に素材を供給するため発生し、押し出し材の曲率に影響を与えると考えられる。ダイス面での摩擦係数が曲率に与える重要な因子となり、今回の計算では、コンテナと素材間の摩擦係数をコンテナ内全域で一定と仮定したため、実験結果と計算結果の誤差が発生したと推察できる。

以上のことから、湾曲矩形棒成形時に発生する曲がりのメカニズムを以下のように考えた。出口下部のコーナー部にデッドメタル領域が存在する場合、材料はデッドメタル領域の境界に沿って押し出される。その結果、材料流出速度が大きいパーティクルがダイス孔下部に集中し、上向きの曲がりが発生したと考えられる。出口上部のコーナー部にデッドメタル領域が存在する場合も同様な現象によって、下向きの曲がりが発生することになる。出口中央部のよう

Fig.6 Relation between curvature of rectangular bar and inclination angle of die at various exit positions

Fig.7 Relation between curvature of rectangular bar and extrusion ratio

Fig.8 Distribution of material exit velocity at die hole and dead metal area and material flow during rectangular bar forming

に出口上下部のコーナー部にデッドメタル領域がある場合は、出口上部ではコンテナ形状が押し出し方向に沿って傾斜しているのに対して、出口下部では押し出し方向に対してわずかに逆方向に傾斜している。このことから、出口上部より出口下部の材料流動の抑制が大きくなるため、下向きの曲がりが発生すると推察できる。押し出し比の影響として (d), (e), (f) のように押し出し比が大きくなるほど、ダイス出口部の素材の押し出し方向への投影面積が小さくなり、出口の形状が絞られる。デッドメタル領域が増大し、ダイス孔下部の材料流動がより絞られた結果、ダイス孔下部の材料流出速度が増大し、上向きの曲率が大きくなると推察できる。

4.2 矩形管成形

Fig.9 に押し出し比 R を変えた時の矩形管成形状態を示す。実験結果は、文献 6 に示された結果であり、 $R=1.5$ については実験結果が得られていないため、計算結果のみ表示している。押し出し比が大きくなるほど、曲率が大きくなっている。実験結果と計算結果を比較すると、計算による成形状態は実験結果をよく捉えていると言える。

押し出し比 R に対する矩形管の曲率を Fig.10 に示す。計算結果の曲率は、 $R=3.0$ の時に 0.042 mm^{-1} 、 $R=1.5$ の時に 0.020 mm^{-1} となり、押し出し比が小さくなるに伴ない曲率は小さくなっている。 $R=2.5$ での計算で得られた曲率は実験結果に

一致し、 $R=3.0$ の場合も、実験結果の 0.034 に対して計算では 0.042 の結果が得られ、傾向を捉えていることがわかる。

Fig.11 に矩形管成形時の出口近傍の材料流出速度分布と素材流れの計算結果を示す。(a)は押し出し比 $R=1.5$ 、(b)は押し出し比 $R=2.5$ 、(c)は押し出し比 $R=3.0$ である。矩形管成形時には、デッドメタル領域を確認することができなかった。図中の材料流出速度分布を表す細線はパーティクルの移動距離を意味するので、出口下部に比べ出口上部の細線が長く、出口下部より出口上部の材料流出速度が大きいことが確認できる。図中の素材流れを見ると、矩形棒の素材流れに比べてダイス面でのパーティクル流れが大きいことが分かる。これが、矩形管成形時にデッドメタル領域が確認できなかった原因と考えられる。さらに、押し出し比が増加するほど、ダイス面での上向きのパーティクル流れが大きくなる。Fig.10 より押し出し比が増加すると実験結果と計算結果の誤差も大きくなることから、矩形棒成形と同様にダイス面での摩擦係数が誤差の原因の 1 つであると推察できる。

以上のことから、湾曲矩形管成形時に発生する曲がりのメカニズムを以下のように考えた。矩形棒成形と同様に、出口上部ではコンテナ形状が押し出し方向に沿って傾斜しているのに対して、出口下部では押し出し方向に対してわずかに逆方向に傾斜している。このため、出口下部ではコンテ

Fig.9 Particle flow patterns and product profiles of rectangular tube at various extrusion ratios (Inclination angle of die $\zeta=30^\circ$)

Fig.10 Relation between curvature of rectangular tube and Extrusion ratio

ナ出口形状に起因する素材流動の抑制が起こり、出口上部では出口が絞られることによる材料流出速度が増大している。このようにして、出口上部と出口下部における材料流出速度の差が生じる。押し出し比が大きくなるほど、ダイス出口部の素材の押し出し方向への投影面積が小さくなり、出口の形状が絞られる。その結果、出口上部と出口下部に材料流出速度の差が大きくなり、押し出し比が大きくなるほど、押し出し材の曲率は大きくなる。

5. 結 言

湾曲矩形棒・矩形管押し出し成形の数値計算により、以下の結論を得た。

矩形棒成形時のメカニズム

- (1) 湾曲矩形棒成形時の出口位置と押し出し比の影響を数値計算により評価できることが確認できた。
- (2) 出口位置の違いにより、出口上下コーナー部のコンテナ形状が異なるため、押し出し材に発生する曲がりの方向が異なることを明らかにした。
- (3) 押し出し比が大きくなるほど、押し出し材に上向きの曲率が大きくなる。
- (4) デッドメタル領域の発生とコンテナ形状が押し出し材の曲がりに影響を与えることを明らかにした。

矩形管成形時のメカニズム

- (1) 押し出し比が、傾斜ダイスを用いた矩形管成形時の曲率に与える影響を数値計算により評価できることを確認できた。
- (2) 押し出し比が大きくなるに従い、押し出し材の曲率が大きくなる。
- (3) コンテナ形状に起因する出口下部の材料流動の抑制

Fig.11 Distribution of material exit velocity at die hole and material flow at forming rectangular tube

と出口上部の材料流出速度の増加が、押し出し材の曲がりに影響することを明らかにした。

謝 辞

本研究は、H17、H18年度の科学研究費補助金(基盤研究(c))の助成のもとで行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 例えば、白石光信・細間新吾・後藤善弘：塑性と加工，**35**-406(1994)，1317-1322。
- 2) 例えば、松原茂夫：同上，**35**-406(1994)，1311-1316。
- 3) Mori, M., Osakada, K. & Yamaguchi, H. : Int. J. of Mach. Sci., **35**(1993)，879-887。
- 4) Shiraishi, M., Niikawa, M. & Goto, Y. : Int. J. of Mach. Tools Manuf. Des. Appl., **43**(2003)，1571-1578。
- 5) 木原茂文・三好峻佑・白石光信・新川真人：塑性と加工，**48**-552(2007)，36-40。
- 6) 新川真人・白石光信・宮嶋芳貴・堀部洋行・後藤善弘：同上，**43**-498(2002)，654-656。
- 7) 木原茂文・矢野敏・近藤知・田渡正史・吉井明彦：同上，**35**-402 (1994)，849-855。
- 8) 森謙一郎・島進・小坂田宏造：機論A，**45**-396(1979)，955-963。
- 9) 新川真人・白石光信・後藤善弘・日野隆太郎：49回塑加連講論，(1998)，115-116。