論文

材料流動の変化に着目した押出しによる 螺旋歯付中空軸の成形方法の開発

新川 真人* 白石 光信**

黒木 健介*** 山崎 満****

Development of Flexible Extrusion Process with Divided Dies for Producing Hollow Shaft with Helical Tooth

Makoto NIKAWA*, Mitsunobu SHIRAISHI**,
Kensuke KUROKI*** and Mitsuru YAMAZAKI****

(Received on July 11, 2008)

For manufacturing twisted products, we proposed a new extrusion process using stepwise assembled dies that are divided the radial direction of billet. In this study, we tried to apply the proposed extrusion process to the production of a hollow shaft with a helical tooth on the outside/inside. Furthermore, we built an extrusion system whose various processing conditions are controlled by a personal computer. The fundamental characteristics are investigated by carrying out an extrusion test using a colour clay on a hollow shaft with a helical tooth produced by the proposed process. The twist depends on the flow angle of the material of the die aperture. The method successfully produces a tooth whose twist continuously changes in the extrusion direction of the extrusion system. These results show that the proposed extrusion process is effective in producing twisted products.

Key words : extrusion, production system, metal flow control, twist, helical, FMS, colour clay.

1. 緒 言

押出し加工は、棒、管材等の様な断面を有する素形材の製造方法として広く用いられている。また、近年では従来の押出し加工では製造が困難とされていた製品の製造を目的として、可変断面押出し技術¹⁾や2対のコンテナ及びシステムを用いた湾曲材押出し加工法²⁾等、様々な研究、開発が積極的になされている。

著者らは、加工中の材料流動に変化を与えることにより押出しと同時に曲げ、ねじれを付与する、あるいはそれらを抑制することを可能とする押出し加工法について系統的に検討を加えてきている。その中で、押出しダイスを分割し、それらの一部を押出し方向にシフトさせ、ダイス出口に段差を設けた状態で押出しを実施することにより製品のねじれ形状を制御する“ダイスシフト押出し加工法”を提

案している^{3), 4)}。その中で本加工法がねじれ形状制御押出し技術として有効であることを示している。

本報は、本加工法の工業製品製造技術としての可能性を検討することを目的とし、まず、外周及び内周に複数の螺旋歯を有する螺旋歯付中空軸の成形に本加工法を適用し、その成形特性についてカラークレイを用いた成形実験により調査した。その後、分割したダイスの押出し方向へのシフト量及び軸円周方向へのスライド量により形成されるダイス間クリアランスをコンピュータにより制御することを可能とする押出しシステムを構築した。さらに、構築した押出しシステムを用いたカラークレイによる螺旋歯付中空軸の成形実験を実施することによって、“ダイスシフト押出し加工法”の実加工への適用の可能性について検討を加えた。

2. 螺旋歯付中空軸押出し加工法

Fig. 1 (a) に、“ダイスシフト押出し加工法”の加工原理に基づき、新たに提案した螺旋歯付中空軸押出し加工法の概略図を示す。本加工法は、製品の断面形状に一致する孔を有するダイスを孔の半径方向に放射状に複数に分割し、それらを押出し方向に対して交互に段差（以下、ダイス段差： h ）を設けて配置し、その状態で押出しを実施することによって加工中の材料流動に変化を与え、所望の製品形状に成形するものである。Fig. 1 (b) に、外周に螺旋歯を成形する際に用いた分割ダイス装着時のコンテナの外観

* 福井大学工学部 〒910-8507 福井市文京 3-9-1

Faculty of Engineering, University of Fukui, 3-9-1 Bunkyo, Fukui City 910-8507, Japan.

** 福井大学大学院工学研究科 同上

Graduate School of Engineering, University of Fukui, ibid.

*** (株)日立産機システム 空圧システム事業部 〒424-0926 静岡市清水区村松 390

Air Compressor Systems Business Division, Hitachi Industrial Equipment Systems Co., Ltd., 390, Muramatsu, Shimizu-ku, Shizuoka City 424-0926, Japan.

**** 東京エレクトロン東北(株) 〒023-1101 奥州市江刺区岩谷堂宇松長根 52
TOKYO ELECTRON TOHOKU LIMITED, 52 Matsunagane, Iwayado, Esashi-ku, Oshu City 023-1101, Japan.

を示す。なお、中空軸外周に螺旋歯を成形する場合には、コンテナに分割したダイスを取り付けている。また、内周に螺旋歯を成形する場合は、マンドレルに分割したダイスを取り付けている。Fig. 1 (c) に実験に使用した分割ダイスを取り付けたマンドレルを示す。

3. ダイシフトフレキシブル押出しシステム

本システムにおいて押出し製品のねじれ量の制御は、分割したダイスのダイス段差と円周方向へのスライド量（以下、ダイス孔開き角： θ ）を調整することにより行うため、押出し時のねじれ量の制御が容易であり、成形される螺旋歯のピッチを連続的に変化させる、あるいは軸の一部に螺旋歯を成形する等、通常押出し加工では実現できないフレキシビリティの高い押出し加工が実現できる。

Fig. 2 (a) に本押出しシステムの概略を示す。本システムは、500kN 万能材料試験機、コンテナ、コンテナパイプ、システム、ダミーブロック、マンドレル、押出しダイス、ステッピングモータ及びパーソナルコンピュータから構成さ

れている。ここで、押出しダイスは、上部ダイス、下部ダイス及び治具により構成されており、押出し方向における上部及び下部ダイス間の間隔をダイス段差としている。また、円周方向における上部及び下部ダイスの孔のずれをダイス孔開き角としている。なお、治具はダイス段差を設定する際に発生する隙間を埋めるために用いている。Fig. 2 (b) にダイス出口近傍部のダイスの配置状況を示す。

本システムにおいて、ダイス段差及びダイス孔開き角はステッピングモータにより駆動させている。それぞれの制御機構としては、ダイス段差はウォームギアを介して台形ねじを回転させ、下部ダイスに取り付けたダイセットを上下させる仕組みである。また、ダイス孔開き角は平歯車を回転させ、上部ダイスの取り付けてあるコンテナを回転させる仕組みである。

4. 実験方法

実験としては、考案した押出し加工法による螺旋歯付中空軸の成形を試みるため、中空軸の外周に螺旋形状の歯を成形する外周螺旋歯押出し実験及び、中空軸の内周に螺旋

(a) Conceptual diagram of extrusion process

(b) Container with divided dies (outside tooth)

(c) Mandrel with divided dies (inside tooth)

Fig. 1 Proposed extrusion process for hollow shaft with helical tooth

(a) Schematic illustration of flexible extrusion system

(b) Cross section of die aperture (without mandrel)

Fig. 2 Extrusion system for hollow shaft with helical tooth

歯を成形する内周螺旋歯押し実験を実施した。その後、構築した押しシステムにより、押し製品の軸方向でねじれ角が変化する可変螺旋歯付中空軸の成形を試みた。

実験に際しては、素材をコンテナに挿入した後、実験条件に合わせてダイスを設定し、万能材料試験機により準静的に押し出す方法で行った。ここで、押し出しの負荷形態は直接押し出しであり、押し出し材は鉛直方向に押し出される。

実験素材としては、カラークレイ製中空軸素材を使用した。素材寸法としては、螺旋歯付中空軸成形実験においては、外形寸法 30mm 及び内径寸法 $d=14\text{mm}$ とし、ダイスシフトフレキシブル押しシステムによる成形実験においては、長さ 80~100mm、外形寸法 32mm 及び内径寸法 $d=10\sim 16\text{mm}$ とした。カラークレイの変形抵抗 σ は、 $\sigma=0.28\epsilon^{0.2}\text{MPa}$ (室温 24°C) で与えられる。

実験条件としては、螺旋歯付中空軸成形実験においては、押し出し後の中空軸の肉厚 $t=1\text{mm}$ 、歯厚 $T_t=4\text{mm}$ 、歯たけ $T_d=3\text{mm}$ 、歯数 $z=4$ とし、ダイス段差 $h=3\sim 8\text{mm}$ 、押し出しステム速度 $V_s=5\sim 100\text{mm/min}$ の範囲で種々変化させて実験を実施している。また、ダイスシフトフレキシブル押しシステムによる成形実験においては、押し出しステム速度 $V_s=50\text{mm/min}$ とし、ダイス段差 $h=2.5\sim 10\text{mm}$ 、ダイス孔開き角 $\theta=0\sim 20^\circ$ 、押し出し後の中空軸の肉厚 $t=2\sim 5\text{mm}$ の範囲で変化させている。ここで、潤滑は素材とコンテナパイプ、ダミーブロック、マンドレル及びダイスとの接触面に石鹸水を塗布する方法を採用している。このときの摩擦係数をリング圧縮試験⁵⁾により測定した結果、およそ $\mu=0.2$ であった。また、実験時の気温は $14\sim 28^\circ\text{C}$ の範囲であった。

5. 螺旋歯付中空軸成形実験

5.1 外周螺旋歯付中空軸

Fig. 3 に、押し出しステム速度 $V_s=20\text{mm/min}$ とし、ダイス段差 $h=3, 8\text{mm}$ と変化させたときの押し出し材の変形状態を示す。軸外周には螺旋形状の歯が成形されており、そのねじれ量にも変化が見られる。

Fig. 4 に、押し出しステム速度 $V_s=5, 20, 100\text{mm/min}$ と変化させたときの成形された外周螺旋歯の比ねじれ角とダイス段差の関係を示す。ここで、螺旋歯の比ねじれ角とは、押し出された螺旋歯の単位長さあたりのねじれ角であり、押し出された製品から直接測定した。図より、ダイス段差の増加に伴って、螺旋歯の比ねじれ角は増加している。また、今回のステム速度の範囲内では、ステム速度が歯のね

(a) $h=3\text{mm}$

(b) $h=8\text{mm}$

Fig. 3 Hollow shaft with helical tooth in the outside

じれ量に及ぼす影響はほとんどないといえる。

Table 1 に、各実験条件において成形された外周螺旋歯の歯厚と、幾何学的に算出される理論歯厚との比較を示す。ここで、理論歯厚とは、分割したダイスが押し出し方向にスライドすることにより形成されるダイス孔に対し、素材がダイス間を結ぶ線分に対して垂直方向に流出すると想定したときの歯厚を示し、計算式は以下のように定義される。

$$T_{ts} = \sqrt{T_{t0}^2 + (h - d_t)^2} \quad (1)$$

ここで、 T_{t0} とは歯厚初期設定値 ($=4\text{mm}$) であり、 d_t とはダイスの厚み ($=3\text{mm}$) をそれぞれ表す。表より、螺旋歯はダイス孔により設定された値より大きくなっており、その値はステム速度が大きくなるほど実験値と理論値のずれは大きくなっている。

Fig. 5 に、成形された外周螺旋歯の比ねじれ角と押し出し角の関係を示す。ここで、押し出し角とはダイス孔から素材が押し出された方向と素材中心軸との間の角度と定義しており、歯厚測定値と初期設定値から以下の式により算出した。

Fig. 4 Relation between specific angle of tooth twist and height of die step in testing of outside tooth

Table 1 Comparison of experimental and analytical tooth thickness

V_s	5mm/min	20mm/min	100mm/min	Analysis
h				
3mm	4.3	4.3	4.5	4
5mm	5.0	5.1	5.1	4.47
8mm	6.6	6.8	7.1	6.4

Fig. 5 Relation between specific angle of tooth twist and extrusion angle in testing of outside tooth

$$\alpha = \cos^{-1}(T_{i0}/T_i) \quad (2)$$

ここで、 T_i とは歯厚の測定値を表す。図より、両者の間には相関関係が確認される。このことは、矩形断面製品による検討を行った既報³⁾の結果と一致するものであり、ダイス孔からの流出方向が製品のねじれを決定する大きな影響因子となっていることを示している。

5.2 内周螺旋歯付中空軸

Fig. 6 (a), (b) に、押出しシステム速度 $V_s=20\text{mm/min}$ とし、ダイス段差 $h=3, 8\text{mm}$ と変化させて中空管の内面に螺旋歯を成形したときの押出し材の変形状態を示す。また Fig. 6 (c) に、ダイス出口孔近傍の材料の流動状態を示す。ここで、材料の流動状態を可視化するため、黒鉛を粉砕したものをカラークレイに混ぜ、それを押し出すことにより実験素材を作成した。その後、螺旋歯成形実験を実施し、押出し材を押出し方向に分割することによって流動状態を観察した。図中の線が材料の流動状態を示している。ダイス孔に向かって押し出されてきた素材は、ダイス孔入り口側のダイスによってダイス孔に向かう形で分流され、その後、ダイス孔出口側のダイスにより変形が加えられることによってダイス孔から傾いて流出していることが分かる。

Fig. 7 に、成形された内周螺旋歯の比ねじれ角とダイス段差の関係を示す。ダイス段差の増加に伴い、内周螺旋歯の比ねじれ角は増加しているが、ダイス段差が小さい範囲では外周螺旋歯成形時より小さな比ねじれ角を示している。これは螺旋歯を成形する際のメタルフローに対するコンテナ及びマンドレルによる影響の違いであると推察される。

6. ダイシフトフレキシブル押出しシステムによる可変螺旋歯付中空軸の成形

螺旋歯付中空軸押出し加工法の加工原理に基づき構築した“ダイシフトフレキシブル押出しシステム”を用い、外周螺旋歯付中空軸の成形実験を行うとともに、押出しの最中に螺旋歯のねじれ量が変化する可変螺旋歯付中空軸の成形を試みた。

Fig. 6 Hollow shaft with helical tooth in testing of inside tooth

Fig. 8 に、ダイス孔開き角 $\theta=10^\circ$ 、中空軸肉厚 $t=3\text{mm}$ とし、ダイス段差 $h=0, 5\text{mm}$ と変化させたときの押出し材の変形状態を示す。中空軸外周の歯が螺旋形状に成形されており、試作した押出しシステムが螺旋歯付中空軸の成形方法として有効であることを示している。なお、ダイス孔開き角が同一であるにも関わらず、成形歯の開き角が異なるのは、上ダイスと下ダイス間のダイス段差による影響のためである。また、軸内面の材料流動を調査するため、マンドレルに針を取り付け、その針により軸内面に付けられる傷の押出しの進行に伴う移動軌跡を観察した (Fig. 8 下段)。図より、軸内面にもねじれが発生している様子が分かる。このことは、軸外周の歯のみが螺旋形状になるのではなく、軸内面から螺旋が付与されていることを示している。

Fig. 9 に、ダイス段差 $h=0, 5, 10\text{mm}$ 、ダイス孔開き角 $\theta=0, 10, 20^\circ$ としたときの歯の比ねじれ角と中空軸肉厚との関係を示す。中空軸肉厚の増加に伴い比ねじれ角は減少する傾向がある。これは、肉厚の増加に伴い軸の剛性が上昇し、その結果ダイス間クリアランスによって発生する歯のねじれを抑制するためであると考えられる。また、ダイス段差が大きくなると比ねじれ角は減少しているが、これは複数のダイスを活用することにより材料の流動状態を制御し、フレキシビリティの高い螺旋形状制御加工を実現する本加工法の加工原理に起因していると推察される。

Fig. 10 に、ダイス段差 $h=0, 5, 10\text{mm}$ と変化させたときの外周螺旋歯の比ねじれ角と中空軸内面の比ねじれ角の

Fig. 7 Relation between specific angle of tooth twist and stem speed in testing of inside tooth

Fig. 8 Products on extrusion system

Fig. 9 Effect of thickness of hollow shaft on specific angle of tooth twist

Fig. 10 Comparison of specific angle of tooth twist and inside twist of hollow shaft

関係を示す。歯と中空軸内面の比ねじれ角はほぼ同程度となっており、中空軸外周に創製される歯によるねじり効果が中空軸の変形にも影響を及ぼしていることが分かる。

Fig. 11 に、中空軸肉厚 $t=4\text{mm}$ とし、ダイス段差とダイス孔開き角を各種変化させたときの比ねじれ角と螺旋歯歯厚の関係を示す。いずれのダイス孔開き角においても、歯厚 $T_f=8\text{mm}$ 付近で最も大きなねじれが発生し、その後は減少する傾向が見られる。この理由としては、本押しシステムの成形原理上、螺旋歯成形のための材料はダイス孔開き角とダイス段差により決定するダイス孔押し方向に対して傾いた状態で流出する。一方、中空軸成形のための材料は、押し方向に一致する方向に流出する。この両者の流出方向の相対関係と材料の流出速度とのバランスが大きく関係していると考えられる。

Fig. 12 に、ダイス孔開き角 $\theta=15^\circ$ 、中空軸肉厚 $t=3\text{mm}$ 、ダイス段差 $h=2.5\text{mm}$ で押しを開始し、その後、押しの際に $h=10\text{mm}$ と変動させたときの押し材の変形状態を示す。螺旋歯のねじれ量が軸方向に変化している様子が観察できる。このことは、本押しシステムが通常の押しでは実現困難な、ねじれ量が連続的に変化する製品の成形にも適用が可能であることを示唆している。

7. 結 言

製品のねじれ量を制御可能とする“ダイスシフト押し加工法”の加工原理に基づき、外周及び内周に螺旋歯を有

Fig. 11 Change of tooth twist with thickness of tooth

Fig. 12 Extrusion product with difference twist

する中空軸の成形を可能とする“螺旋歯付中空軸押し加工法”を提案した。また、加工条件をコンピュータにより制御する“ダイスシフトフレキシブル押しシステム”を構築し、カラークレイによる成形実験を実施した結果、以下のことが明らかになった。

- 1) “螺旋歯付中空軸押し加工法”により、外周及び内周螺旋歯付中空軸を成形することが可能である。
- 2) 素材のダイス孔からの流出方向は、螺旋歯のねじれ量を支配する大きな影響因子である。
- 3) “ダイスシフトフレキシブル押しシステム”において、外周歯のねじれが中空軸内面のねじれに影響を及ぼしている。
- 4) 通常の押しでは成形が困難な形状について、提案した加工法及び加工システムを活用することによって成形が可能である。

謝 辞

本研究の一部は、平成 18 年度天田金属加工機械技術振興財団研究開発助成によって実施されたことを記するとともに、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 例えば、加藤雅嗣：平 10 塑加春講論，(1998)，367-368。
- 2) 星野倫彦・小原嗣朗：平 5 塑加春講論 (1993)，431-434。
- 3) 白石光信・新川真人：塑性と加工，42-485 (2001)，593-595。
- 4) Nikawa, M., Shiraishi, M. & Goto, Y.: Proc. 7th ICTP, (2002)，1747-1752。
- 5) 小坂田宏造・白石光信・村木重節・徳岡雅康：機論 C，55-516 (1989)，2213-2220。