

# 鍛造加工におけるねじりモーショ付加による 塑性流動の制御と歯車成形への応用

大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻  
准教授 松本 良

(2019年度 一般研究開発助成 AF-2019007-B2)

キーワード：鍛造，ねじり，塑性流動，歯車

## 1. 研究の目的と背景

冷間鍛造による歯車成形では後工程の簡略・省略を実現するために、ネットシェイプ、ニアネットシェイプ化が取り込まれている。例えば、軽量・小型化の観点からヘリカルギヤの需要が急増しているが、ねじれ角が大きいと加工圧力の上昇や塑性変形量の増大により歯形部の加工精度や寸法精度が低下しがちである。そのため、加工圧力の低減や塑性流動の制御が課題であり、例えば、分流鍛造法<sup>1)</sup>、コンテナ駆動閉塞鍛造法<sup>2)</sup>やサーボプレスによるスライド速度制御鍛造法<sup>3)</sup>が提案されている。それぞれの手法において塑性流動の方向、摩擦の方向および被加工材の温度分布が制御され、歯形部の塑性流動が制御されている。

一方、筆者らは鍛造加工中に主加工軸まわりのねじりを付加するねじりモーショ付加鍛造加工法の開発に取り組んでいる。これまでに据込み鍛造や後方押し鍛造において、軸方向荷重の低減<sup>4)5)</sup>、成形部の表面性状の向上<sup>6)</sup>、せん断ひずみの導入領域の拡大<sup>7)8)</sup>を報告している。これらにおいて回転・ねじり方向は主加工方向とは異なる方向であるため、塑性流動の方向を変化させられる可能性がある。また現状の一般的なサーボプレスは主加工軸まわりの回転付加機構は有しない。しかしながら、一部の油圧プレスや材料試験機ではスライド回転機構を有し、回転・ねじりモーショが新たなスライドモーショ制御として発展する可能性もある。

本研究では、ねじりモーショ付加鍛造加工法について、主加工軸まわりの回転・ねじり付加により塑性流動を変化させることに取り組む。歯車成形での歯形部への塑性流動に応用し、歯形部への素材の充満を促進させることを目指す。

## 2. 加工試験機および鍛造条件

### 2.1 加工試験機<sup>4)</sup>

ねじりモーショ付加鍛造加工用に設計・製作した加工試験機の外観写真を図1に示す。サーボモータを駆動源として、上ラムは上下移動、下ラムは上下軸まわりに回転する。上ラムは最大負荷荷重 100kN、最大速度 10mm/s であり、下ラムは最大負荷トルク 200N・m、最大回転速度 25rpm である。

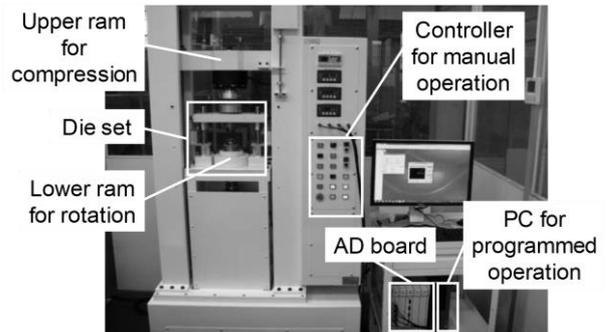


図1 ねじりモーショ付加鍛造試験機の外観と構成

### 2.2 有限要素解析条件

加工実験に加えて、市販有限要素解析ソフトウェア Simufact Forming ver.15.0 および 16.0 を使用して、被加工材の弾塑性変形および温度変化を3次元にて計算した。被加工材の物性値は Simufact Forming に内蔵の材料データベースを使用した。流動応力-ひずみ曲線は等方硬化を仮定し、ひずみ、ひずみ速度、温度依存性を考慮し、ヤング率、熱伝導率、比熱は温度依存性を考慮した。

一方、金型-被加工材間の摩擦は摩擦係数  $\mu = 0.1$  あるいはせん断摩擦係数  $m = 0.2$  とした。また金型-被加工材間の熱伝達率、大気-被加工材間の熱伝達率は、被加工材の温度実測値と有限要素シミュレーションによる温度計算値を比較して、それぞれ  $5000\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 、 $50\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  とした。

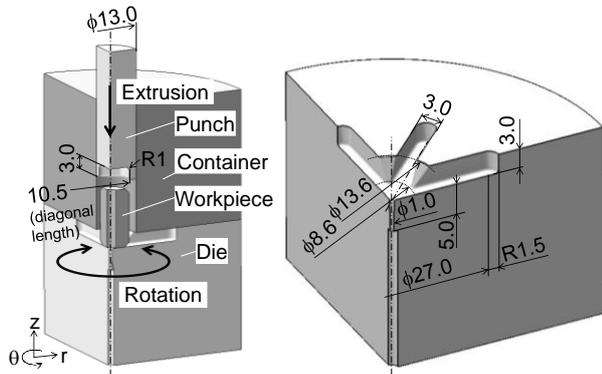
### 2.3 側方押し鍛造方法および実験条件

図2に側方押し鍛造の金型構成およびダイの溝形状を示す。被加工材は外径 9.5mm、内径  $d_0 = 3.0\text{mm}$ 、高さ 13.4mm（端面部：C1の面取り）の円筒形状として、端面の表面粗さを  $Ra = 0.6\mu\text{m}$  とした。パンチは円柱形状として、先端部の中心に一辺 5.6mm、深さ 3.0mm の正六角形溝を設けた。コンテナは内径 13.0mm として、ダイには図2(b)に示すような幅 3.0mm、高さ 3.0mm、長さ 15.0mm の溝を  $45^\circ$ 毎に 8本設けた。ただし、溝は十分に長く、鍛造後に被加工材が溝に充満しないようにした。またダイ中心部には、直径 1.0mm×深さ 5.0mm の捨て軸穴を設けた。

パンチを-z軸方向に 0.1mm/s で移動させ、コンテナおよびダイを r 方向中心の z 軸まわりに 0.5rpm (0.05rad/s) で

一方向あるいは繰返し両振り（振幅  $a=5^\circ$  ( $\pi/36$ )) で回転させた。パンチ先端部の溝およびダイの溝に被加工材を塑性流動させ、形状拘束により被加工材にねじり付加を試みた。

加工装置の最大負荷能力の都合上、被加工材には A1070-H14 アルミニウムを使用し、室温、無潤滑で押し出しを行った。また金型には SKH51 高速度工具鋼 (63HRC) を用いて、成形部表面を鏡面仕上げとした。



(a) 金型構成 (b) ダイの溝形状

図 2 側方押し出し鍛造の金型構成とダイの溝形状 ( $\theta$  方向 1/4 断面)

#### 2.4 歯形側方押し出し鍛造方法および実験条件

図 3 に歯形側方押し出し鍛造の金型構成およびダイの歯形状を示す。被加工材は外径 14.0mm、内径 9.9mm、高さ 12.0mm の円筒形状とした。上・下パンチは被加工材との接触部の断面を外径 15.5mm、内径  $d_0 = 9.82$ mm の円筒形状とした。内径スリーブには大径 9.8mm、小径 7.5mm、歯数 9 枚 (モジュール: 1mm)、コンテナには大径 20.0mm、小径 15.5mm、歯数 18 枚 (モジュール: 1mm) のインボリュート歯形を設け、歯車部品を模した。

被加工材をコンテナと内径スリーブの間に挿入し、有限要素解析では上・下パンチをそれぞれ  $-z$ ,  $z$  軸方向に 0.05mm/s で同時に移動させた。実験では加工装置・金型の機構上、上パンチのみを  $-z$  軸方向に 0.1mm/s で移動させた。一方、上・下パンチの  $z$  軸方向の移動と同時に、以下の 2 種類のねじりを付加した。

- (A) 上・下パンチを  $z$  軸まわりにそれぞれ反対方向に回転させ、被加工材の上・下端部から周方向にねじり付加 (以降、ねじり付加と記す)。
- (B) コンテナ、内径スリーブを  $z$  軸まわりにそれぞれ反対方向に回転させ、被加工材の外・内径部から断面内で周方向にねじり付加 (以降、断面内ねじり付加と記す)。

いずれの場合もねじり速度は 0.5rpm (0.05rad/s) で繰返し両振り ( $a=5\sim 15^\circ$  ( $\pi/36\sim\pi/12$ rad)) とした。被加工材の歯部への塑性流動が開始する上・下パンチ合計ストロークが  $s=2.0$ mm から金型を回転させた。(A)では上・下パンチ端面-被加工材端面を固着 (溝付きパンチでのねじり付加を想定)、(B)では被加工材と金型の歯部の形状拘束によ

って、ねじりを付加した。

被加工材には A1070-H14 アルミニウム、金型には SKH51 高速度工具鋼 (63HRC) を使用し、成形部表面を鏡面仕上げとした。加工実験では被加工材に鉱油 (VG32) を塗布し、室温にて歯形押し出し鍛造を行った。ただし、実験でのねじり付加は(B)のみ行った。

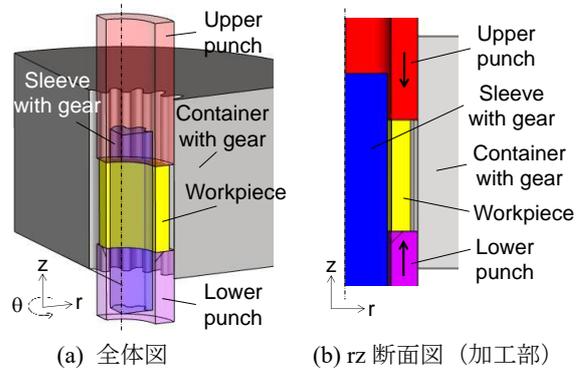


図 3 歯形側方押し出し鍛造の金型構成

### 3. 側方押し出し鍛造の結果および考察<sup>9)</sup>

#### 3.1 有限要素解析による塑性変形過程

図 4 に押し出し鍛造中の被加工材の塑性変形過程を示す。ねじりモーシオン付加の有無によらず、軸方向ストローク  $s=0.8$ mm において、パンチ先端部溝およびダイの溝部に塑性流動が開始された。その後、 $s=4.8$ mm においてパンチ正六角形溝への充満がほぼ完了し、コンテナおよびダイの溝部への塑性流動が開始された。軸方向ストロークの進行とともに、被加工材内径部の縮小と溝部への押し出しが行われ、 $s=6.7$ mm において底面近傍の内径部が開そくし、捨て軸穴への塑性流動が開始された。

以上の結果より、加工実験ではコンテナおよびダイの回転を  $s=0.8$ mm から開始し、 $s=6.7$ mm での総回転角度が  $180^\circ$  となるように設定した。またねじりモーシオン付加により、被加工材外径方向への塑性流動を促進することをねらう。

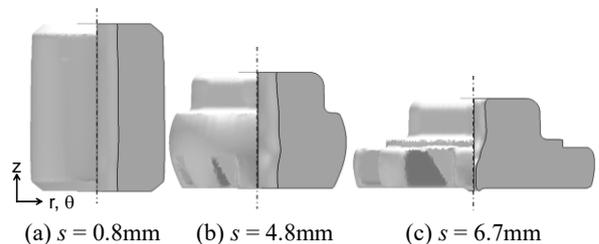


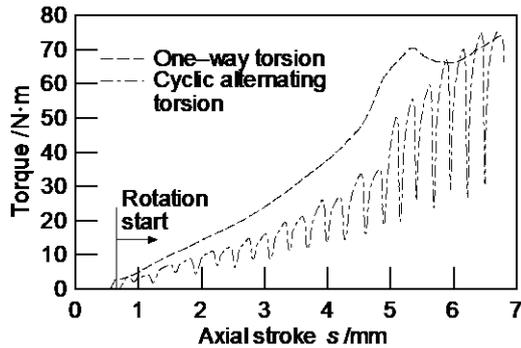
図 4 側方押し出し鍛造における被加工材の塑性変形過程 ( $s$ : 軸方向ストローク, 各図左: 表面, 右: 断面)

#### 3.2 トルク, 軸方向荷重 (加工実験)

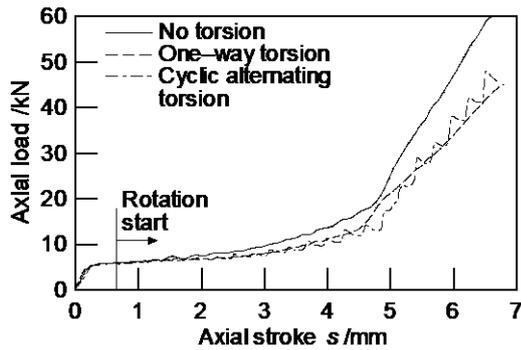
図 5 に側方押し出し鍛造におけるトルクおよび軸方向荷重の測定結果を示す。工具回転開始 ( $s \approx 0.8$ mm) とともにトルクが上昇したため、形状拘束により被加工材に  $z$  軸まわりのねじりが付加されたと判断できる。また被加工

材の上下端面に設けたけがき線の押し出し後の上・下端面での角度差と傾斜具合からも被加工材全体へのねじり付加を確認した。

次に図 5(b)ではねじりモーシオン付加により軸方向荷重が最大で約 25%低減した。また両振りねじりモーシオン付加では、工具回転反転時に瞬間的に速度が 0 となるためトルクの振動がみられた。トルクの付加とともに軸方向荷重が低下したことから、軸方向荷重の低下は軸方向と軸まわりの応力成分の重ね合わせによるものであることが示唆される。



(a) トルク



(b) 軸方向荷重

図 5 側方押し鍛造における回転角度、トルクおよび軸方向荷重の測定結果

### 3.3 側方押し部への塑性流動

図 6 に被加工材底面における内径部の変化の有限要素解析および加工実験結果を示す。いずれの場合も内径部は側方部への押し出し開始 ( $s = 4.8\text{mm}$ ) から縮小し始め、ねじりモーシオン付加により  $s = 5.0\text{mm}$  において内径部の縮小を約 35%抑制できた。これはねじりモーシオン付加により、外径方向への塑性流動が促進されたためである。また  $s = 6.7\text{mm}$  において底面近傍の内径部は閉そくしたものの上部の内径部は閉そくしておらず、ねじりモーシオン付加による捨て軸長さの減少を確認した。

次に被加工材の側方底面部の形状プロファイルの測定結果を図 7 に示す。ねじりモーシオン付加により溝幅方向中央部で溝長さ方向への長さを  $s = 5.0\text{mm}$  (歯形押し開始時) で約 5%,  $s = 6.7\text{mm}$  で約 7%長くできた。また側方押し部の断面積は、一方向ねじり付加で約 5%, 両振り

ねじり付加で約 25%増加した。側方部先端形状は、一方向ねじり付加では工具回転方向 (紙面上時計回り) に対して後方側の側方部側面で塑性流動が促進され、後方側に偏りが生じた。一方、両振りねじり付加では工具回転方向が繰り返し反転するため、溝幅方向に均等に押し出された。

以上より、ねじりモーシオン付加により側方部への塑性流動を促進させることができ、特に両振りねじり付加では押し出し長さの溝幅方向の不均一度を抑制できる。

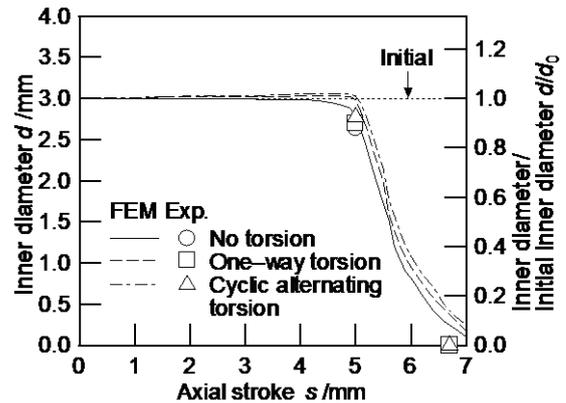
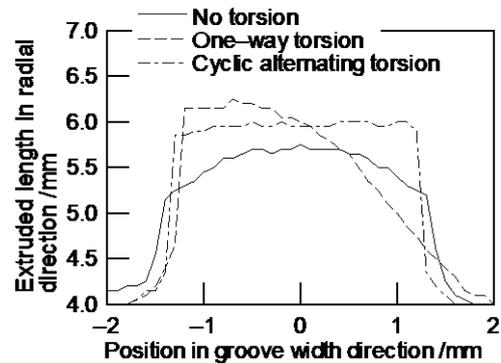
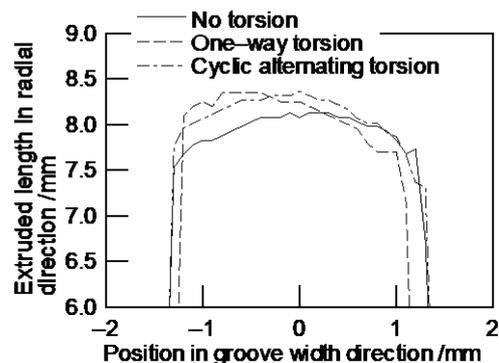


図 6 側方押し鍛造における被加工材底面における内径部の変化



(a)  $s = 5.0\text{mm}$  (溝部への押し出し開始時)



(b)  $s = 6.7\text{mm}$

図 7 側方押し鍛造における被加工材底面の形状プロファイルの測定結果

#### 4. 歯形側方押し鍛造の結果および考察<sup>10)</sup>

##### 4.1 有限要素解析結果

図 8 に押し鍛造中の被加工材の周方向速度の分布を示す。ねじり付加、断面内ねじり付加でそれぞれ  $z$ ,  $r$  方向に対して周方向速度が変化し、それぞれ  $z\theta$ ,  $r\theta$  方向のせん断変形が付加されることが示唆される。

次に押し鍛造後の被加工材の形状および相当ひずみ分布を図 9 に示す。ねじり付加なしでは上・下パンチ-被加工材間の摩擦によりたる形変形が生じた。一方、ねじり付加では上・下端面部の周方向速度が高く、周方向速度に応じて、 $r$  方向の塑性流動が助長されるため、上・下端面部が  $z$  方向中央部より外径が広がるつづみ形変形が生じた。断面内ねじり付加では周方向速度分布は  $z$  方向に対してほぼ一定であり、被加工材の高さ位置によらず、ほぼ一様に  $r$  方向の塑性流動が助長され、たる形変形が軽減された。また歯部側面へ大きなひずみが付与され、歯部の強度向上が期待できる。

図 10 に押し鍛造におけるトルク、軸方向荷重を示す。いずれのねじり付加も金型の回転開始直後からトルクが上昇し、ねじりが付加されたことが示唆される。また鍛造終盤での最大荷重はいずれのねじり付加も、ねじり付加なしに対して約 20% 低下した。一方、断面内ねじり付加では被加工材と歯部の形状拘束によるねじり付加のため、被加工材の歯部への充満率が低い鍛造中盤以前では荷重の低下度は小さかった。

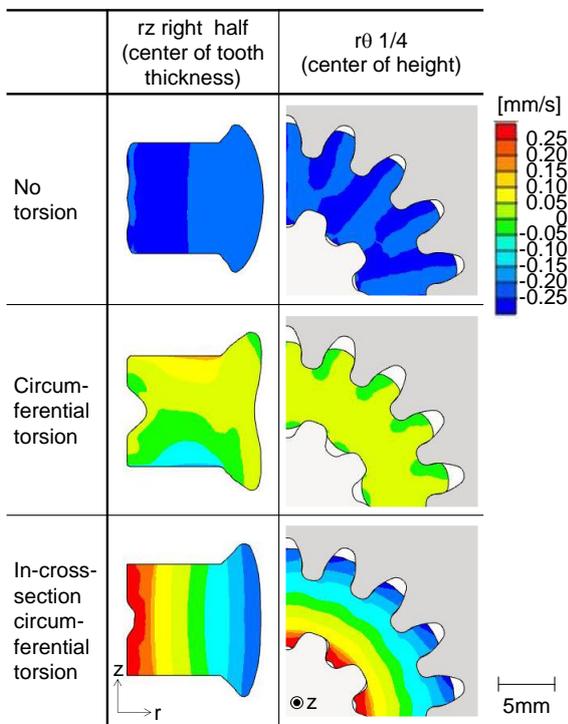


図 8 歯形側方押し鍛造中の被加工材の周方向速度分布 ( $a = 5^\circ$ ,  $s = 7.0\text{mm}$ )

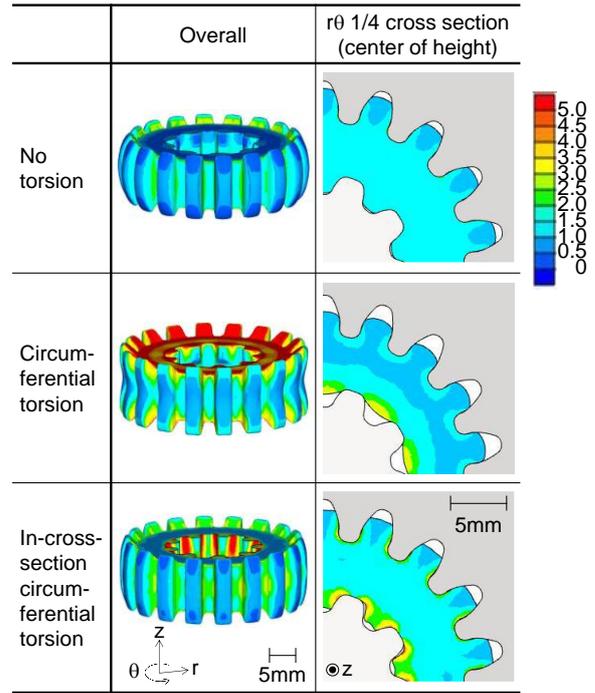


図 9 歯形側方押し鍛造後の被加工材の形状および相当ひずみ分布 ( $a = 5^\circ$ ,  $s = 7.0\text{mm}$ )

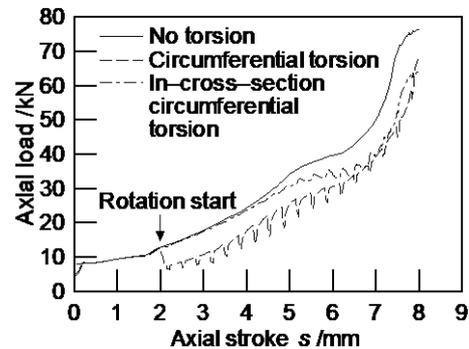
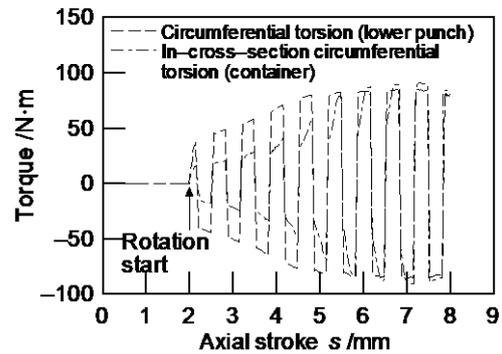


図 10 歯形側方押し鍛造におけるトルク、軸方向荷重 ( $a = 5^\circ$ )

## 4.2 実験結果

押し鍛造における軸方向荷重を図 11 に示す。回転振幅によらず、ねじり付加なしに対して荷重は約 20%低下し、有限要素解析結果(図 10)とほぼ一致したことから、ねじりが付加されたと判断する。

図 12 に押し鍛造後の被加工材の外歯部への rθ断面充満率を示す。断面充満率は被加工材の外歯部の形状測定により得られた平均 rθ断面積とコンテナの外歯部の設計 rθ断面積より算出した。ねじり付加なしに対して断面内ねじり付加の方が充満率は約 10%高く、また回転振幅が小さい方が充満率は高かった。断面内ねじり付加では r 方向の塑性流動が助長され、また回転振幅が小さいほど回転方向の反転頻度が高く、コンテナ側面-被加工材の歯部側面間のすべりがわずかながら良好であったためと推察される。

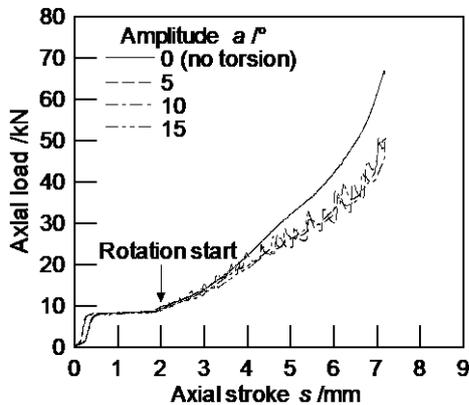


図 11 歯形側方押し鍛造における断面内ねじり付加と軸方向荷重

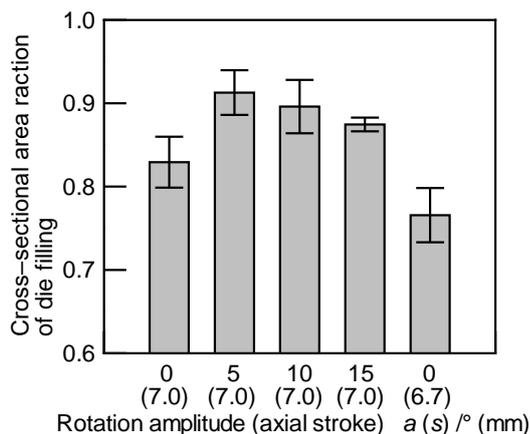


図 12 断面内ねじり付加歯形側方押し鍛造後の被加工材の外歯部への rθ断面充満率

## 5. まとめ

本研究では、ねじりモーショ付加鍛造加工法について、主加工軸まわりの回転・ねじり付加により塑性流動を変化させることに取り組んだ。歯車成形での歯形部への塑性流動に応用し、歯形部への素材の充満を促進させることに取り組んだ。また歯形側方押し鍛造において、上・下端面、外・内径部からの 2 種類のねじり付加が塑性流動および軸方向荷重へ及ぼす影響について調べた。以下に得られた結果をまとめる。

- 1) 側方押し鍛造、歯形側方押し鍛造いずれにおいても、30°/mmのねじり付加により軸方向荷重を最大で 20~25%低減できる。
- 2) 側方押し鍛造では、ねじり付加により内径部の縮小が約 35%抑制され、外径部の溝へ約 5~7%長く押し出すことができる。特に両振りねじり付加では溝部への押し出し長さの溝幅方向への不均一度を抑制できる。
- 3) 歯形側方押し鍛造では、ねじり付加、断面内ねじり付加により、それぞれ zθ, rθ方向のせん断変形が付加される。断面内ねじり付加では、被加工材の高さ位置によらず、ほぼ一様に半径方向の塑性流動が助長され、たる形変形を軽減できる。
- 4) 歯形側方押し鍛造では、断面内ねじり付加により、歯部の rθ断面充満率を約 10%向上できる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり研究助成いただいた(公財)天田財団に深く感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 大賀喬一, 近藤一義: 機論 C, **48**-427 (1982), 425-432.
- 2) 小坂田宏造, 花見眞司, 王欣: 塑性と加工, **37**-426 (1996), 723-728.
- 3) 安藤弘行: 143 回塑加講テキスト, (2015), 93-102.
- 4) Matsumoto, R., Kou, J. and Utsunomiya, H.: Int. J. Adv. Manuf. Technol., **93**-1-4 (2017), 933-943.
- 5) 松本良, 高塚誠司, 宇都宮裕: 塑性と加工, **60**-703 (2019), 235-240.
- 6) 松本良, 高塚誠司, 宇都宮裕: 塑性と加工, **60**-703 (2019), 241-246.
- 7) Ohnishi, H., Takamoto, K., Matsumoto, H. and Matsumoto, R.: J. Manuf. Process., **58** (2020), 1161-1170.
- 8) 外村圭資, 松本良, 李相民, 宇都宮裕: 銅と銅合金, **60**-1 (2021), 176-181.
- 9) Matsumoto, R., Tanaka, S. and Utsunomiya, H.: J. Mater. Process. Technol., **299** (2022), 117369.
- 10) 松本良, 宇都宮裕: 72 回塑加連講論, (2021), 213-214.