



R. Matsumoto

鍛造におけるねじり振動付加

松本 良*

1. はじめに

異なる方向の応力・ひずみ成分の重ね合せ(複合)に着目して、圧縮、引張り、曲げ、ねじり、回転等を組み合わせた塑性加工法の研究・開発が取り組まれている¹⁾。軸対称形状の鍛造加工では、圧縮軸方向の垂直応力・ひずみに対して圧縮軸まわりのねじり・回転によるせん断応力・ひずみを重ね合わせることが多い。これらの目的は形状・材質制御、加工荷重低減、流動応力測定、トライボロジー特性評価等、多岐にわたる。

特に巨大ひずみ導入による微細結晶粒の発現を主眼とした強ひずみ加工が数多く考案されている。多くは外形の変化をほとんどもたわず、例えば、薄い円板状やリング状の試料に数百 MPa~数 GPa の軸方向の垂直応力下でねじりを付加する High-Pressure Torsion (HPT) 法²⁾やねじり圧縮法³⁾が古くから取り組まれている。最近では HPT 法を応用した高ひずみ域までの応力-ひずみ曲線の導出⁴⁾、動的な HPT 試験⁵⁾や Equal-Channel Angular Pressing (ECAP) におけるねじり付加⁶⁾が提案されている。一方、垂直応力とせん断応力の重ね合せは、金型-被加工材間に厳しい接触・すべり状態を生み出すことから、後方押し鍛造等を対象に摩擦・潤滑試験としても応用されている^{7),8)}。

異なる方向の応力・ひずみ成分の重ね合せは、主加工方向の応力成分の低減⁹⁾や塑性流動の変化を引き起こす。このことを応用して、例えば、据込み鍛造において一方向高速回転を付加する高速回転鍛造加工^{10),11)}、型鍛造において両振りねじりを付加する KOBO 法¹²⁾が考案されている。特に KOBO 法では材質制御の観点からも精力的に調べられている。

本稿では、鍛造における繰返し両振りねじり(ねじり振動)付加の効果について、軸方向荷重、付加ひずみ、塑性流動に大別して、筆者の取組みを紹介する。

2. ねじり付加の種類・部位および加工試験機

2.1 ねじり付加の種類および部位

図 1¹³⁾は円柱および円筒素材に対して、高さ方向(z)軸(半径(r)方向中心)まわりのねじり付加の種類を示したものである。回転させる金型の部位により、被加工材の上・下端面、外・内径部からの 2 種類のねじり付加がある。それぞれ z, r 方向に対して周(θ)方向回転速度が変化し、

$z\theta, r\theta$ 成分のせん断変形が付加されることが示唆される。

金型の周方向回転による被加工材へのモーメントの伝達は金型の形状や表面凹凸による幾何学的拘束と金型-被加工材間のすべり摩擦に大別される。幾何学的拘束では金型と被加工材表面の回転速度は等しく、すべり摩擦では被加工材表面の回転速度は金型の回転速度に対して低い。

2.2 加工試験機

図 2¹⁴⁾はねじり振動付加鍛造加工用に設計・製作した加工試験機の外観写真である。サーボモータを駆動源として、

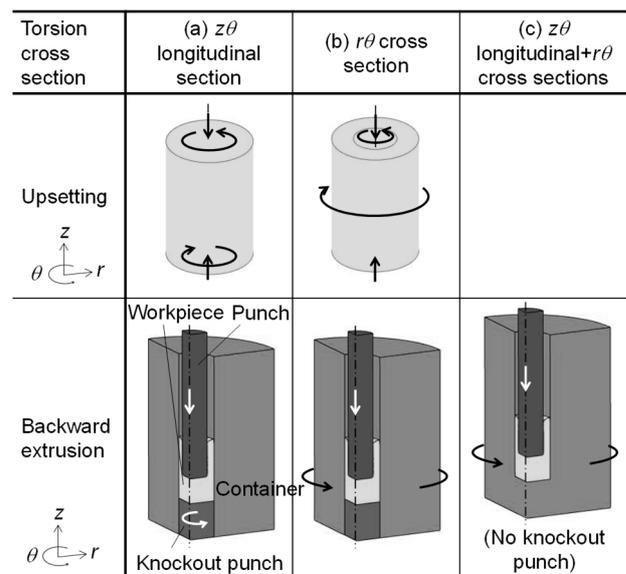


図 1 円柱および円筒素材に対する据込み鍛造、後方押し鍛造におけるねじり付加の種類および金型の動作¹³⁾

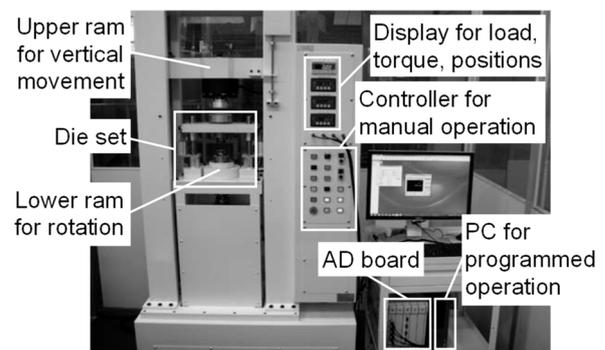


図 2 ねじり振動付加鍛造試験機の外観と構成¹⁴⁾

*大阪大学 准教授

上ラムは上下 (z 方向) へ移動, 下ラムは上下 (z) 軸まわりに θ 方向へ回転する. 上ラムは最大負荷荷重 100kN, 最高速度 10mm/s, 下ラムは最大負荷トルク 200N·m, 最高回転速度 25rpm である. 以降では, 上ラムの下降 (圧縮) 速度を v , 下ラムの回転速度を ω , 振幅角度を a と記し, 特段の説明がない場合, ねじり速度と回転速度は等しいものとする.

3. 圧縮軸方向荷重の低減および付加ひずみの増大

3.1 力学理論による検討

非加工硬化性の等方性材料を仮定し, $r\theta$ 座標系において z 方向に垂直応力 σ_z と θ 方向にせん断応力 $\tau_{z\theta}$ あるいは $\tau_{\theta z}$ が同時にはたらく場合を考える (ここでは $\tau_{z\theta} = \tau_{\theta z}$ と取り扱う). z 方向, θ 方向の塑性ひずみ増分, 相当応力, 相当ひずみ増分をそれぞれ $d\varepsilon_z^p$, $d\varepsilon_{z\theta}^p (= d\gamma_{z\theta}^p/2)$, $\bar{\sigma}$, $d\bar{\varepsilon}$ とし, 流れ則および Mises の降伏条件式に従うと仮定すると,

$$\sigma_z^2 = 3\bar{\sigma}^2 / \left\{ (d\gamma_{z\theta}^p/d\varepsilon_z^p)^2 + 3 \right\} \quad (1)$$

$$d\bar{\varepsilon}^2 = \left\{ 1 + (d\gamma_{z\theta}^p/d\varepsilon_z^p)^2 / 3 \right\} (d\varepsilon_z^p)^2 \quad (2)$$

と表され, $d\gamma_{z\theta}^p/d\varepsilon_z^p$ の上昇により σ_z , $d\bar{\varepsilon}$ はそれぞれ低下, 増大する. 被加工材の回転 (z) 軸から r 方向距離 r での z 方向の圧縮速度を v , θ 方向のねじり速度を ω とし, $\omega = 0$ での σ_z , $d\bar{\varepsilon}$ をそれぞれ σ_{z0} , $d\varepsilon_0$ とすると, 式(1), (2)はそれぞれ,

$$(\sigma_z/\sigma_{z0})^2 = 3 / \{ (r\omega/v)^2 + 3 \} \quad (3)$$

$$(d\bar{\varepsilon}/d\varepsilon_0)^2 = 1 + (r\omega/v)^2 / 3 \quad (4)$$

と表され, σ_z/σ_{z0} , $d\bar{\varepsilon}/d\varepsilon_0$ と $r\omega/v$ の関係は図 3¹⁵⁾ のように示される. z 方向に塑性変形させながら θ 方向にねじりを付加することで, z 方向荷重の低減, 付加ひずみの増大が示唆される. なおねじりによる θ 方向ひずみは r 方向に分布を有するため, 被加工材全体の σ_z/σ_{z0} , $d\bar{\varepsilon}/d\varepsilon_0$ を考える場合は有効半径 (中実材の場合, $0.724r$)¹⁶⁾ で見積もることとする.

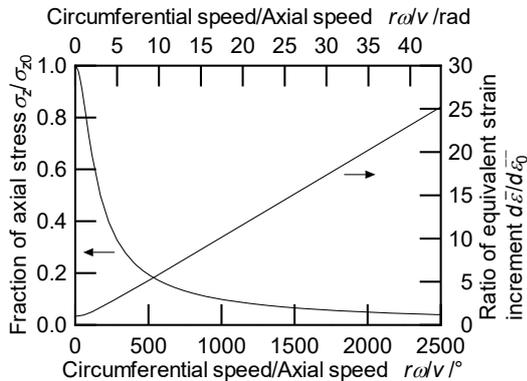


図 3 非加工硬化性の等方性円柱素材の圧縮における軸方向垂直応力, 相当ひずみとねじり速度の関係¹⁵⁾

3.2 据込み鍛造における軸方向荷重の低減

図 4¹⁴⁾ は A1070 アルミニウムの冷間据込み鍛造 (図 1(a)) における軸方向荷重率と ω/v の関係である. 軸方向の圧縮

と圧縮軸まわりの繰返し両振りねじり ($a = 5^\circ$) を同時に付加し, 溝付き工具により工具-被加工材間ですべりを生じさせずにねじりを付加した. また軸方向荷重率はねじりを付加した場合の軸方向荷重をねじりを付加しない場合の軸方向荷重で除したものである. 図 4 では ω/v の上昇とともに軸方向荷重は低下し, $\omega/v \geq 300^\circ/\text{mm}$ では軸方向荷重率は約 0.2 でほぼ一定となった. また ω を一定のまま v を減速させ, ω/v を約 $1700^\circ/\text{mm}$ まで上昇させることを鍛造実験で実現し, 約 0.2 の軸方向荷重率を実証した¹⁴⁾. これらの据込み鍛造では塑性発熱による被加工材の温度上昇は最大でも約 15K ($\omega/v = 600^\circ/\text{mm}$) であり, 被加工材の軟化による荷重低減ではないことが示唆される. 一方, 被加工材の有効半径 (約 3.6mm) を考慮して式(3)の軸方向応力 (σ_z/σ_{z0}) の理論値 (図 4 中の破線) と比較すると, $\omega/v \leq 50^\circ/\text{mm}$ では差異は小さかったが, $\omega/v \geq 50^\circ/\text{mm}$ では差異は大きく, 理論値の方が大幅に低かった. これは摩擦による不均一変形 (たる形変形), ねじりの不均一や加工硬化等の材料特性に起因するものと考えられる.

他に A6061-T6 アルミニウム合金, C1020 銅, C2700 黄銅, AZ31B マグネシウム合金の冷間据込み鍛造, Ti-6Al-4V チタン合金の熱間据込み鍛造¹⁷⁾ において, 同様の軸方向荷重の低減が確認された.

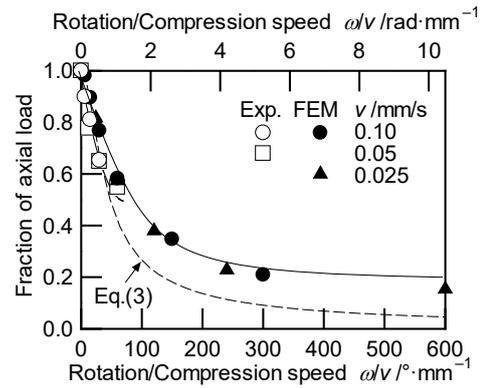


図 4 A1070 アルミニウム円筒素材の据込み鍛造における軸方向荷重とねじり速度の関係¹⁴⁾

3.3 後方押し鍛造における軸方向荷重の低減

図 5¹⁵⁾ は A1070 アルミニウムの冷間後方押し鍛造 (図 1(a)) における押し圧力 (押し荷重/押しパンチ先端部の断面積) である. 押しパンチを押し方向に移動させながら, ノックアウトパンチを押し軸まわりに繰返し両振り回転 ($a = 5^\circ$) させた. 溝付きパンチによりパンチ端面-被加工材端面間にすべりを生じさせることなくねじりを付加した.

図 5 では $\omega/v \geq 18^\circ/\text{mm}$ のねじり付加ではねじり開始とともに押し圧力が低下し, $\omega/v = 30^\circ/\text{mm}$ の両振りねじり付加での加工終盤では約 20%低下した. ただし, ノックアウトパンチの回転が反転する $\pm 5^\circ$ の位置では, 瞬間的にねじりが付加されないため, 瞬間的な押し圧力の上昇が見られた. また図 5 内の点線は先端面を鏡面仕上げした溝な

しパンチを用いて、先端面にも鉱油を塗布して、ねじりを付加せずに押し出した場合の押し出し圧力である。 $\omega/v=6^\circ/\text{mm}$ のねじり付加での押し出し圧力と同程度であったことから、溝付きパンチを用いた $\omega/v \geq 18^\circ/\text{mm}$ のねじり付加の方がパンチ端面-被加工材端面間の摩擦低減よりも押し出し荷重低減に対する効果が高かったことが示唆される。

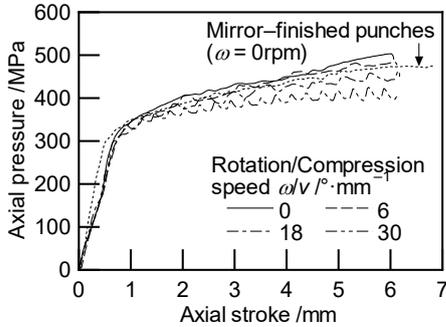


図5 A1070 アルミニウム円筒素材の後方押し出し鍛造における両振りねじり付加と押し出し圧力の関係¹⁵⁾

3.4 ひずみ分布の変化

図6¹³⁾は円柱素材の据込み鍛造(図1(a))における相当ひずみ分布の有限要素解析の結果である。式(4)で示唆されたとおり、ねじり付加により付加ひずみは増大した。また工具-被加工材間ですべりなくねじりを付加するため、せん断摩擦係数を $m=1.0$ としたことから、ねじりを付加せずすべらせた場合($m=0.2$)に対してひずみ分布の不均一度(変動係数)が高まる。またねじりによるせん断ひずみは被加工材の半径に比例するため、ねじりを付加しない場合と比較して外周部の相当ひずみが高い。圧縮ストロークとねじり角度を調整することで、圧縮のみでは得られない特異なひずみ分布を形成できることが示唆される。

図7¹⁸⁾はC2700黄銅円柱素材のねじり付加冷間据込み鍛造(図1(a))後の組織写真である。変形集中領域(図中のX状領域)が両振りねじり付加により拡幅した。また等軸組織のTi-6Al-4Vチタン合金の熱間据込み鍛造(図1(a))においても、ねじり付加により広い領域で結晶粒が微細化された¹⁹⁾。ただし、いずれの場合も両振りねじり付加ではねじり方向の反転に起因して、一方向ねじり付加の場合よりも若干の粒成長が生じた。

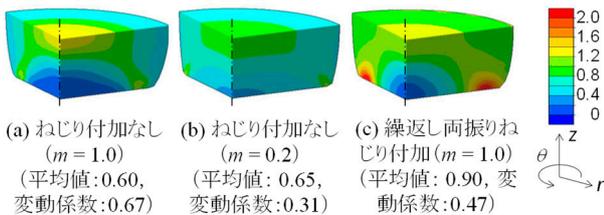
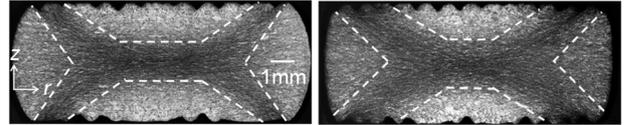


図6 A1050 アルミニウムの据込み鍛造におけるねじり付加と相当ひずみ分布の関係(z 方向下側1/2部, θ 方向1/4部, 圧縮率:50%, m :工具-被加工材間のせん断摩擦係数)(FEM解析)¹³⁾



(a) ねじり付加なし (b) 繰返し両振りねじり付加 ($\alpha=45^\circ, \theta_{cum}=180^\circ$)

図7 C2700 黄銅円柱素材の冷間据込み鍛造後の rz 断面写真(圧縮率:58%, θ_{cum} :下工具の累積回転角度)¹⁸⁾

3.5 割れ発生の抑制

図8²⁰⁾はAZ31Bマグネシウム合金円柱素材の冷間据込み鍛造(図1(a))におけるねじり速度と変形能(割れが発生しない最高圧縮率)の関係である。 $\omega/v=400^\circ/\text{mm}$ の両振りねじり付加により変形能は約1.8倍に向上した。これは巨視的には軸方向応力とせん断応力の変化、微視的には底面すべりの活動度の変化によるものと推察される^{20),21)}。一方、一方向ねじり付加ではせん断変形が局所集中し、変形能は約0.7倍に低下した。また冷間後方押し出し鍛造においても同様の変形能の向上²²⁾が確認された。

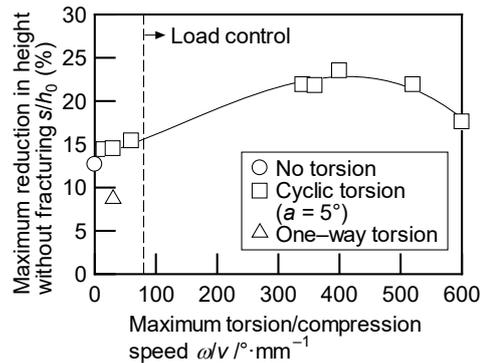


図8 AZ31B マグネシウム合金円柱素材の冷間据込み鍛造におけるねじり速度と変形能の関係²⁰⁾

4. 塑性流動

4.1 力学理論による検討

$r\theta$ 円筒座標系において、 $r\theta$ 面に平行な一対の平工具間に配置された等方変形・摩擦特性を有する円柱素材($r\theta$ 面:円断面)の工具接触面($r\theta$ 面)に生じる応力について考える。ただし、工具-被加工材間の摩擦はCoulomb則に従い、摩擦係数 μ を等方性とする。

平工具により z 方向に圧縮応力 σ_z と z 軸(r 方向中心)まわり(θ 方向)にねじりトルク付加によるせん断応力 τ が同時に付加される場合、工具接触面内のせん断応力ベクトルの大きさは、

$$t = \sqrt{(\mu\sigma_z)^2 + \tau^2} \quad (5)$$

と表される。ただし、被加工材の $r\theta$ 断面が真円を維持したまま θ 方向へ回転およびねじれながら変形することを仮定する。一方、 z 方向に圧縮応力 σ_{z0} のみが付加される場合、工具接触面内のせん断応力ベクトルの大きさは、

$$t_0 = \mu\sigma_{z0} \quad (6)$$

と表される．ここでねじりトルクの付加により，

$$\sigma_z = \alpha \sigma_{z0} \quad (0 < \alpha < 1) \quad (7)$$

に低減されることが式(3)より示されたことから，式(5)は，

$$t = \sqrt{(\mu \alpha \sigma_{z0})^2 + \tau^2} \quad (8)$$

と表される．一方， t が高いほど工具接触面での被加工材の r 方向流動は大きいと考えられ， r 方向流動を増進させるために必要なせん断応力は，式(6)，(8)より，

$$\tau \geq \sqrt{1 - \alpha^2} \mu \sigma_{z0} \quad (9)$$

である．

せん断応力の付加により t の向きが r 方向から θ 方向へ傾くため， r 方向へ Δr 分流動させるためにはより大きな流動が必要である．したがって，式(9)の τ はトルク付加による r 方向への流動増進の十分条件ではないが，トルク付加により圧縮荷重が低下しても式(9)を満たすトルクが付加されれば， r 方向への流動増進が期待できる．工具接触面での塑性流動量の変化は被加工材全体の不均一変形，例えば，たる形変形や曲がりへ影響を及ぼす．

図 9²³⁾は有限要素解析により求めた円柱素材（変形抵抗：1MPa）の圧縮中の工具接触面での r 方向位置の推移を示す．被加工材へのトルク付加は工具－被加工材間の摩擦を介したため，ねじり速度は ω より低い． $\mu \leq 0.3$ でのトルク付加での r 方向流動は圧縮力のみでの付加における $\mu = 0$ の場合と同程度であった．一般に据込み鍛造のような塑性変形では高圧縮率まで工具－被加工材間の摩擦係数を $\mu \leq 0.05$ 以下に維持させることは困難であり，鍛造中のねじり付加による特有の変形である．

以上の結果は，ねじり付加がたる形変形低減の新たな手法に加わる可能性を示すものである．

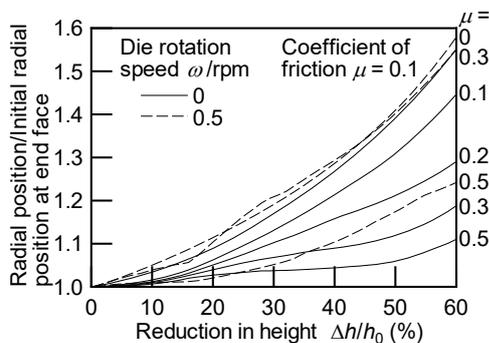


図 9 ねじり付加据込み鍛造における等方性円柱素材端面での半径方向位置と摩擦係数の関係（FEM 解析）²³⁾

4.2 円筒の据込み鍛造におけるたる形変形軽減

中空部材の塑性加工では，たる形変形，曲がりや座屈等の形状不良が生じやすく，軸方向荷重と塑性流動の制御が重要である．図 10²⁴⁾はねじり付加据込み鍛造（図 1(a)）後の A1070 アルミニウム円筒素材の rz 断面写真である．据込み鍛造方法は 3.2 節と同様であるが，鏡面仕上げした円錐形工具を用い，工具－被加工材間をすべらせながら，ねじりを付加した． $\omega = 0 \text{rpm}$ では工具の円錐形状および工

具－被加工材間の摩擦の影響により，外・内周面ともに高さ方向中央部が端面部より r 方向へ大きく変形（たる形）した．一方，両振り，一方向工具回転いずれの場合も工具回転速度が高いほど端面部が高さ方向中央部より r 方向へ大きく変形（つぶみ形）した．ただし，一方向工具回転では被加工材の r 方向中心位置が z 軸から傾いたため，注意を要する．

図 11²⁵⁾は $\omega/v = 30^\circ/\text{mm}$ での据込み鍛造（図 1(a)）における A1070 アルミニウム円筒素材の初期形状と鍛造後形状の関係である．ただし，鏡面仕上げした平工具を用いたため，ねじり／圧縮速度は約 $6^\circ/\text{mm}$ である．ねじり付加により被加工材端面部において外径方向への塑性流動が促進され，たる形変形が軽減される初期形状の範囲が広がった．また初期内径／外径比 = 0.7 の被加工材では， $a =$ 約 1° と振幅角度を小さくすることで，初期高さ／外径比 = 約 1.0～2.0 の被加工材のたる形変形も軽減された²⁶⁾．

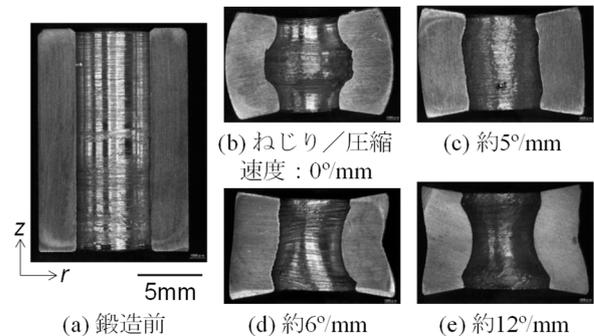


図 10 円錐形工具によるねじり付加据込み鍛造後の A1070 アルミニウム円筒素材の rz 断面写真（圧縮率：40%）²⁴⁾

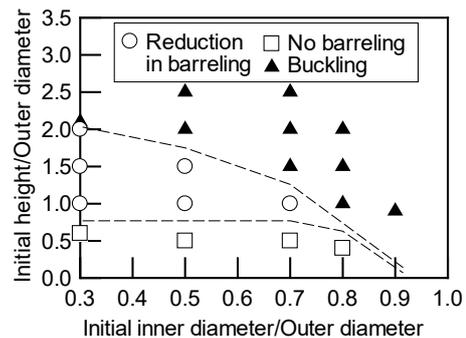


図 11 平工具によるねじり付加据込み鍛造における A1070 アルミニウム円筒素材の初期形状と鍛造後形状の関係（ $\omega/v = 30^\circ/\text{mm}$ （ねじり／圧縮速度：約 $6^\circ/\text{mm}$ ），圧縮率：30%）²⁵⁾

4.3 側方押しにおける歯部への充填

図 12²⁵⁾は側方押し鍛造の金型構成および側方押し鍛造後の A1070 アルミニウム素材の外観写真である．パンチ先端部に正六角形溝を設け，ダイの側方押し部は十分長く，押し終了時に充填しないようにした．パンチの下降と同時にコンテナおよびダイを z 軸（ r 方向中心）ま

わりに一方向あるいは両振りで回転させ、パンチ、ダイと被加工材のかみ合いによりねじりを付加した。図 13²⁵⁾は側方押し鍛造後の被加工材の側方押し部底面の形状である。ねじり付加により側方押し部周方向中央部で押し部長さは約 5~7%長くなり、側方押し部の $r\theta$ 断面積は一方向ねじり付加で約 5%増加、両振りねじり付加で約 25%増加した。また一方向ねじり付加ではダイ回転方向（紙面上時計回り）に対して後方側の側方押し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、回転方向の反転により周方向に対して均等に押し出された。さらに C1100 銅素材では、ねじりを付加しない場合に対して側方押し部側面の硬さが約 15%上昇することも確認された。なお側方押し鍛造においても軸方向荷重は最大で約 25%低減された²⁵⁾。

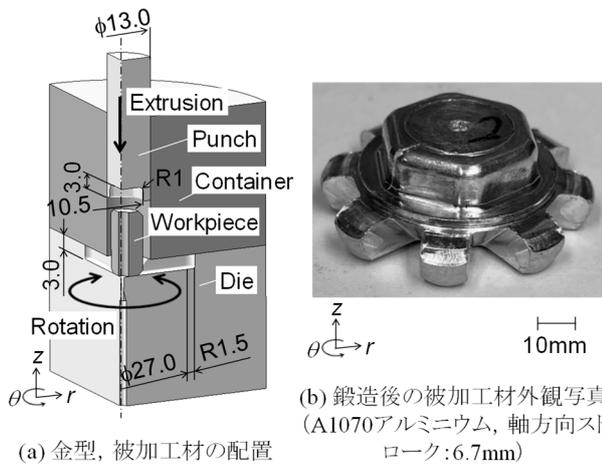


図 12 ねじり付加側方押し鍛造の金型構成および鍛造後の被加工材外観写真²⁵⁾

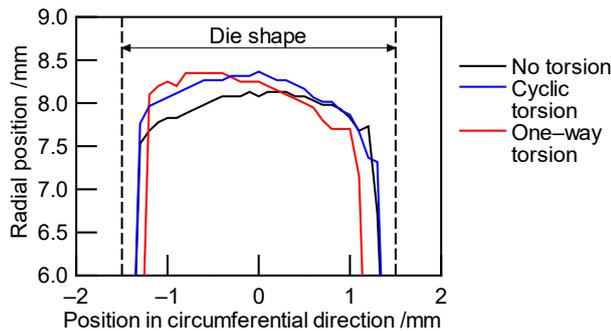


図 13 ねじり付加側方押し鍛造後の被加工材の側方押し部底面形状（軸方向ストローク：6.7mm）²⁵⁾

4.4 歯形押しにおける歯部への充填

歯車や歯形の冷間鍛造では、加工荷重の低減と歯部への充填に対して分流鍛造法²⁷⁾、コンテナ駆動閉塞鍛造²⁸⁾やサーボプレスによるスライド速度制御鍛造法²⁹⁾が提案されている。本節では歯形押し鍛造を対象に、ねじり付加による歯部への塑性流動の促進について述べる。

図 14³⁰⁾は歯形押し鍛造の金型構成である。被加工材

(A1070 アルミニウム)、上・下パンチともに円筒形状とした。内径スリーブには歯数 9 枚、コンテナには歯数 18 枚のインボリュート歯形を設け、歯車部品を模した。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 (r 方向中心) まわりにそれぞれ反対方向に回転させ、被加工材の上・下端面から周方向にねじり付加 (図 1(a)) (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 (r 方向中心) 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 (図 1(b)) (以降、断面内ねじり付加と記す)。

(A)では溝付きパンチ、(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。

図 15³⁰⁾は押し鍛造後の被加工材の形状および相当ひずみ分布の有限要素解析結果である。ねじり付加なしでは

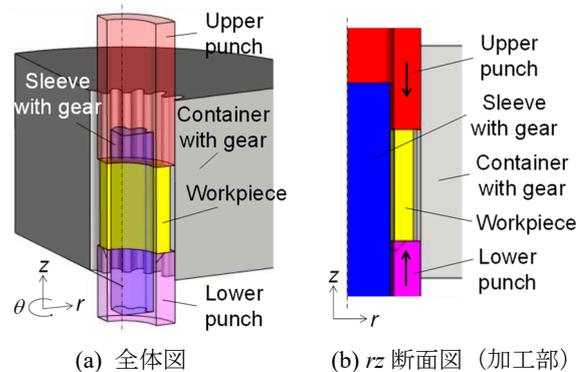


図 14 歯形側方押し鍛造の金型構成³⁰⁾

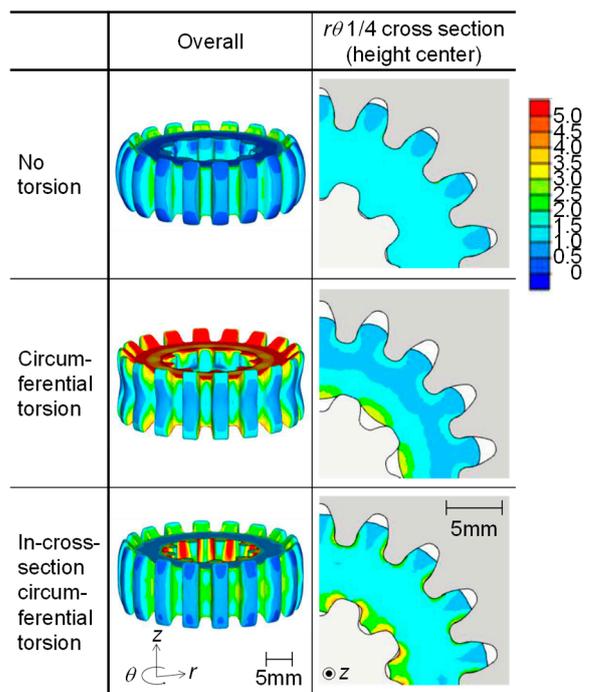


図 15 歯形側方押し鍛造後の被加工材の形状および相当ひずみ分布 ($a=5^\circ$, 軸方向ストローク: 7.0mm)³⁰⁾

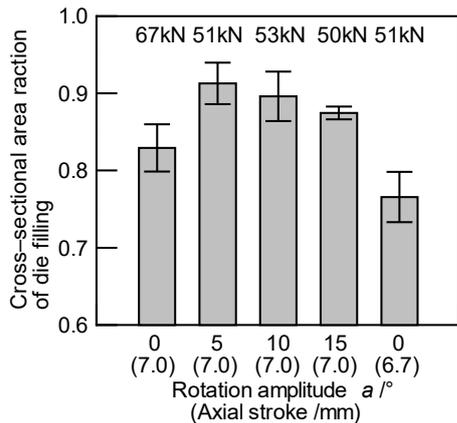


図 16 断面内ねじり付加歯形側方押し鍛造後の被加工材の外歯部への $r\theta$ 断面充満率³⁰⁾

上・下パンチー被加工材間の摩擦によりたる変形が生じた。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たため、上・下端面部分が z 方向中央部より外径が広がるつづみ変形が生じた。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、ほぼ様に r 方向の塑性流動が助長され、たる変形が軽減された。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 16³⁰⁾は押し鍛造後の被加工材の外歯部への $r\theta$ 断面充満率の実験結果である。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、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、コンテナ側面ー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。

5. おわりに

本稿では、鍛造における繰返し両振りねじり（ねじり振動）付加の効果について、加工荷重、付加ひずみ、塑性流動に分けて筆者の取組みを紹介した。

謝 辞

本研究は（公財）天田財団・平成 28 年度一般研究開発助成（交付番号：AF-2016005）、2019 年度一般研究開発助成（交付番号：AF-2019007-B2）および科学研究費補助金・基盤研究(C)（課題番号：15K06504）を受けて実施したことを付記し、深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Tekkaya, A.E., Becker, C., Ortelt, T. & Grzanic, G.: Proc. 7th JSTP Int. Semin. Precis. Forg., (2015), 1-6.
- 2) Zhilyaev, A.P. & Langdon, T.G.: Prog. Mater. Sci., **53-6** (2008), 893-979.
- 3) Saunders, I. & Nutting, J.: Met. Sci., **18-12** (1984), 571-576.

- 4) Yogo, Y., Sawamura, M., Hosoya, M., Kamiyama, M., Iwata, N. & Ishikawa, T.: Mater. Sci. Eng. A, **600** (2014), 82-89.
- 5) Verleysen, P. & Lanjewar, H.: J. Mater. Process. Technol., **276** (2020), 116393.
- 6) Lee, H.H., Kim, W., Jung, K.C., Seo, S., Lee, J.K., Park, H.L., Park, K.T. & Kim, H.S.: J. Mater. Process. Technol., **259** (2018), 305-311.
- 7) Hansen, B.G. & Bay, N.: J. Mech. Work. Technol., **13-2** (1986), 189-204.
- 8) Sawamura, M., Yogo, Y., Kamiyama, M. & Iwata, N.: Procedia Eng., **81** (2014), 1866-1871.
- 9) Bridgman, P.W.: J. Appl. Phys., **14-6** (1943), 273-283.
- 10) 藤森直往: 20 回塑加連講論, (1969), 221-224.
- 11) 藤森直往: 23 回塑加連講論, (1972), 269-272.
- 12) Bochniak, W. & Korbel, A.: J. Mater. Process. Technol., **134-1** (2003), 120-134.
- 13) 松本良: ぷらすとす, **5-50** (2022), 63-68.
- 14) Matsumoto, R., Kou, J. & Utsunomiya, H.: Int. J. Adv. Manuf. Technol., **93-(1-4)** (2017), 933-943.
- 15) 松本良・高塚誠司・宇都宮裕: 塑性と加工, **60-703** (2019), 235-240.
- 16) Barraclough, D.R., Whittaker, H.J., Nair, K.D. & Sellars, C.M.: J. Test. Eval., **1-3** (1973), 220-226.
- 17) 松本良・高本和希・大西初美・松本洋明・宇都宮裕: 2019 塑加春講論, (2019), 61-62.
- 18) 外村圭資・松本良・李相民・宇都宮裕: 銅と銅合金, **60-1** (2021), 176-181.
- 19) Ohnishi, H., Takamoto, K., Matsumoto, H. & Matsumoto, R.: J. Manuf. Process., **58** (2020), 1161-1170.
- 20) 外村圭資・松本良・宇都宮裕: 72 回塑加連講論, (2021), 233-234.
- 21) 外村圭資・松本良・浜孝之・宇都宮裕: 75 回塑加連講論, (2024), 383-384.
- 22) 外村圭資・松本良・宇都宮裕: 2023 塑加春講論, (2023), 185-186.
- 23) 松本良・植松久稔・宇都宮裕: 塑性と加工, **65-764** (2024), 125-130.
- 24) Matsumoto, R., Tanaka, S. & Utsunomiya, H.: Proc. 14th Int. Conf. Technol. Plast. (ICTP 2023), Lect. Notes Mech. Eng., **1** (2023), 27-35.
- 25) Matsumoto, R., Tanaka, S. & Utsunomiya, H.: J. Mater. Process. Technol., **299** (2022), 117369.
- 26) 植松久稔・松本良・宇都宮裕: 2024 塑加春講論, (2024), 43-44.
- 27) 大賀喬一・近藤一義: 日本機械学会論文集 C 編, **48-427** (1982), 425-434.
- 28) 小坂田宏造・花見眞司・王欣: 塑性と加工, **37-426** (1996), 723-728.
- 29) 安藤弘行: 143 回塑加講座テキスト, (2015), 93-102.
- 30) 松本良・宇都宮裕: 72 回塑加連講論, (2021), 213-214.