

# ねじり振動付加鍛造加工法の開発

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  
(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016005)

キーワード：鍛造，ねじり，荷重低減，表面性状

## 1. 研究の目的と背景

輸送機器の軽量化を背景に，高強度材料の使用や中空化，薄肉化等の複雑形状部材の使用が急増している．これらを鍛造加工において取り扱う場合，加工荷重が高くなる傾向にあり，金型材料・構造や加工機械の変更を余儀なくされる場合がある．また鍛造品においては，寸法・形状精度の低下や表面性状の悪化が生じやすくなる．

鍛造加工における加工荷重の一般的な低減手法は，昇温による被加工材の流動応力の低減，潤滑剤や金型表面処理による摩擦の低減，形状変更や多工程化等の工程設計の工夫が挙げられる．加工プロセスによる低減手法には逐次鍛造，揺動鍛造や分流鍛造<sup>1)</sup>が挙げられる．またサーボプレスのスライドモーション制御による潤滑状態の制御<sup>2)</sup>や被加工材の温度分布の制御<sup>3)</sup>による加工荷重の低減も実現されている．しかしながら，これらの加工荷重低減の原理は前述した低減手法（流動応力低減や摩擦低減）と同じである．

一方，異なる方向の応力成分の重ね合わせ（複合化）により，加工方向の応力成分を低減（塑性変形を促進）できること<sup>4)</sup>が知られている．そのうち主加工軸まわりのねじり付加は有効な手法の一つである．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<sup>5)</sup>，型鍛造において両振りねじりを付加する KOBO Type Forming<sup>6)</sup>が提案され，加工荷重の低減や大ひずみ付与による金属組織の変化が報告されている．しかしながら，ねじり付加条件との定性的関係や加工荷重低減の原理は議論されていない．また塑性加工中のねじり・回転付加および塑性加工後の回転付加は摩擦試験としても利用されている<sup>7,8)</sup>．特に型鍛造をはじめとする金型-被加工材の接触部が多い塑性加工では，潤滑・摩擦状態や鍛造後の被加工材の表面性状に大きな影響を及ぼすことが予想される．

一方，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，新たなスライドモーション制御として発展する可能性もある．

本研究では，鍛造加工中に主加工軸まわりのねじり振動を付加するねじり振動付加鍛造加工法を提案する．異なる応力成分の重ね合わせ（複合化）による軸方向荷重の低減を主目的とし，鍛造品の高品質化（表面性状，形状精度や材質）も目指す．本報告書では，据込み鍛造お

よび後方押し鍛造における軸方向荷重の低減，後方押し鍛造後の表面性状について報告する．

## 2. 軸方向の垂直応力と軸まわりのせん断応力の複合応力下における塑性変形

円柱状の理想塑性体を仮定して， $r\theta z$ 座標系において  $z$  方向に垂直応力  $\sigma_z$  と  $\theta$  方向にせん断応力  $\tau_{z\theta}$  が同時にはたらく場合を考える． $z$  方向， $\theta$  方向の塑性ひずみ増分，相当ひずみ増分をそれぞれ  $d\varepsilon_z^p$ ， $d\varepsilon_{z\theta}^p (= d\gamma_{z\theta}^p/2)$ ， $d\bar{\varepsilon}$  とし，流れ則および Mises の降伏条件式に従うと仮定すると，

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

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

と表され， $d\gamma_{z\theta}^p / d\varepsilon_z^p$  の上昇により， $\sigma_z$ ， $d\bar{\varepsilon}$  はそれぞれ低下，上昇する．さらに被加工材の回転軸からの半径方向距離  $r$  での  $z$  方向の圧縮速度を  $v$ ， $\theta$  方向のねじり速度を  $\omega$ ，そして  $\omega=0$  での  $\sigma_z$ ， $d\bar{\varepsilon}$  をそれぞれ  $\sigma_{z0}$ ， $d\bar{\varepsilon}_0$  とすると，式(1)，(2)はそれぞれ，

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

$$\left( d\bar{\varepsilon} / d\bar{\varepsilon}_0 \right)^2 = 1 + (r\omega/v)^2 / 3 \quad (4)$$

と表され， $\sigma_z / \sigma_{z0}$ ， $d\bar{\varepsilon} / d\bar{\varepsilon}_0$  と  $r\omega/v$  の関係は図 1 に示される． $z$  方向に据込み鍛造中に  $\theta$  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．ただし，ねじりによる  $\theta$  方向ひずみは  $r$  方向に分布を有するため，半径  $r$  の被加工材全体の  $\sigma_z / \sigma_{z0}$ ， $d\bar{\varepsilon} / d\bar{\varepsilon}_0$  を考える場合は有効半径  $(0.724r)^3$  で見積もることとした．

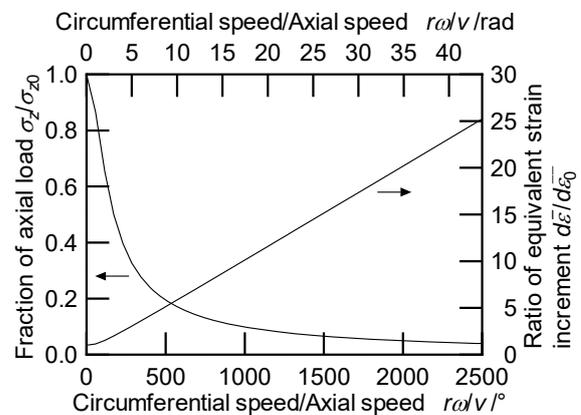


図 1 力学理論による円柱素材の軸方向荷重，相当ひずみとねじり付加の関係（理想塑性体）

### 3. 加工試験機および据込み鍛造条件<sup>9)</sup>

#### 3.1 加工試験機

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を図2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。

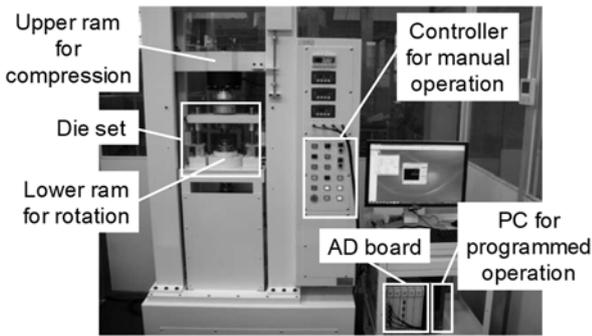


図2 ねじり振動付加鍛造試験機

#### 3.2 据込み鍛造条件

図3に示す据込み鍛造において、円柱状の試験片を上工具により  $z$  方向速度  $v = 0 \sim 0.1 \text{ mm/s}$  で圧縮しながら、下工具を試験片の  $z$  方向中心軸まわりに回転速度  $\omega = 0.1 \sim 1.0 \text{ rpm}$  ( $0.01 \sim 0.1 \text{ rad/s}$ ) で一方向あるいは繰り返し両振り (回転振幅  $a = 1 \sim 22.5^\circ$  ( $\pi/180 \sim \pi/8 \text{ rad}$ ), 最高周波数:  $1.5 \text{ Hz}$ ) で回転させた。ストローク制御または荷重制御にて行い、ストローク制御では室温の A1070 アルミニウム試験片の場合、軸方向圧力が約  $100 \text{ MPa}$  (圧縮ストローク: 約  $1 \text{ mm}$ ) に達した後、 $v$  を保ったままねじりを付加し、 $\omega/v$  を一定とした。一方、荷重制御では設定荷重に達した後、設定荷重を付加しながら  $\omega$  のねじりを付加し続け、 $v$  を従動させることで、 $\omega/v$  を変化させた。

据込み鍛造は室温で行い、試験片には A1070 アルミニウム引抜き棒材を用いた。試験片の長さ方向と引抜き方向が一致するように、直径  $\Phi 10 \text{ mm}$ 、高さ  $10 \text{ mm}$ 、表面粗

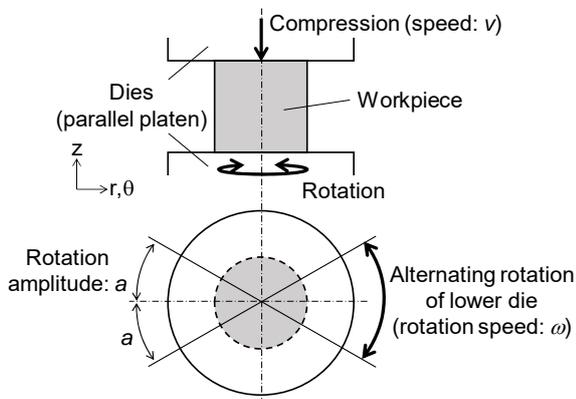


図3 ねじり振動付加据込み鍛造の加工形状および工具動作

さ  $Ra = 0.30 \sim 0.50 \mu\text{m}$  に旋削加工を施した。一方、工具には SKD11 合金工具鋼 (60HRC) を使用し、工具-試験片間にすべりを生じさせることなくねじりを付加するために、工具端面にはローレット溝 (深さ: 約  $0.5 \text{ mm}$ , 頂角:  $60^\circ$ , 間隔:  $0.8 \text{ mm}$ ) を設けた。

#### 3.3 有限要素シミュレーション条件

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.14.0.1 を使用して、アルミニウム試験片の弾塑性変形および温度変化を 3 次元にて計算した。アルミニウムの物性値は 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、工具は剛体として端面にローレット溝を設けず、工具端面-試験片端面間を固着させて、試験片にねじりを付加した。工具-試験片間の熱伝達率、大気-試験片間の熱伝達率は、試験片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。

### 4. 据込み鍛造の実験結果および考察<sup>9)</sup>

#### 4.1 試験片のねじり角度

工具端面に設けたローレット溝によるアルミニウム試験片へのねじり付加の状態を調べた。8kN の軸方向圧縮力 (軸方向圧力: 約  $100 \text{ MPa}$ ) を付加しながら、下工具を  $\omega = 0.5 \text{ rpm}$ 、 $1 \text{ rpm}$  で一方向回転させた場合の試験片のねじれ角度を測定した結果を図4に示す。ねじれ角度は試験片端面に設けた放射状のけがき線のねじり付加後の上下端面での角度差により算出した。 $\omega = 0.5 \text{ rpm}$  では工具-試験片間で周方向にすべることなくねじることが可能であり、 $\omega = 1 \text{ rpm}$  では  $360^\circ$  の工具回転に対して約  $180^\circ$  のねじれとなり、周方向にすべりが生じた。

次に  $\omega = 0.5 \text{ rpm}$  の一方向回転において、試験片高さ方向でのねじれ角度の分布を測定した結果を図5に示す。ねじれ角度は試験片側面に設けた高さ方向のけがき線の

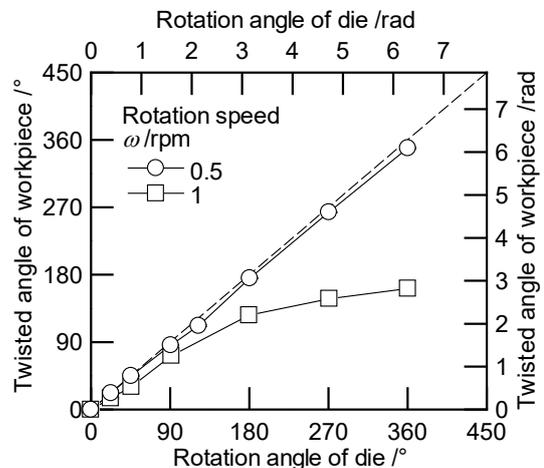


図4 試験片のねじれ角度と下工具の回転角度の関係 (軸方向圧力: 約  $100 \text{ MPa}$ )

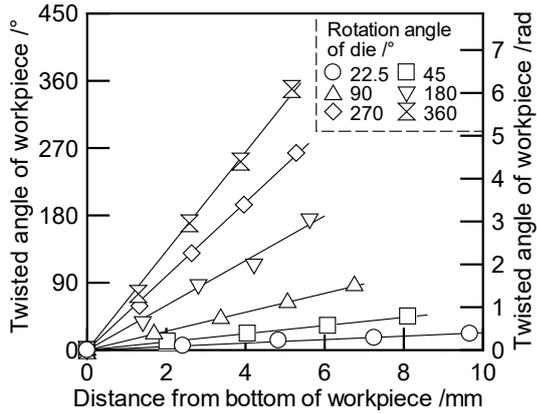


図5 試験片のねじれ角度と試験片底面からの距離の関係 (軸方向圧力: 約 100MPa,  $\omega = 0.5\text{rpm}$ )

ねじり付加後の周方向傾斜角により算出した。360°以下の工具回転ではねじれ角度と試験片底面からの距離は線形関係にあり、試験片高さ方向に線形的なねじりを付加できることが分かった。

#### 4.2 ストローク制御加工における軸方向荷重

図6に一方ねじり付加据込み鍛造における工具回転角度、トルクおよび軸方向荷重の測定結果を示す。工具回転の開始と同時にトルクが上昇し、軸方向荷重が低下した。工具回転(ねじり)速度が高いほど大きなトルクが付加され、軸方向荷重の低減量は大きくなった。 $\omega > 0.25\text{rpm}$  ( $\omega/v > 15^\circ/\text{mm}$ )のねじり付加で5%以上の軸方向荷重の低減が得られた。

次に $\omega = 0.5\text{rpm}$  ( $\omega/v = 30^\circ/\text{mm}$ )のねじり振動付加据込み鍛造における工具回転角度、トルクおよび軸方向荷重の測定結果を図7に示す。 $a = 1^\circ$ のねじり振動付加により、軸方向荷重は最大で約20%低下した。弾性力学理論

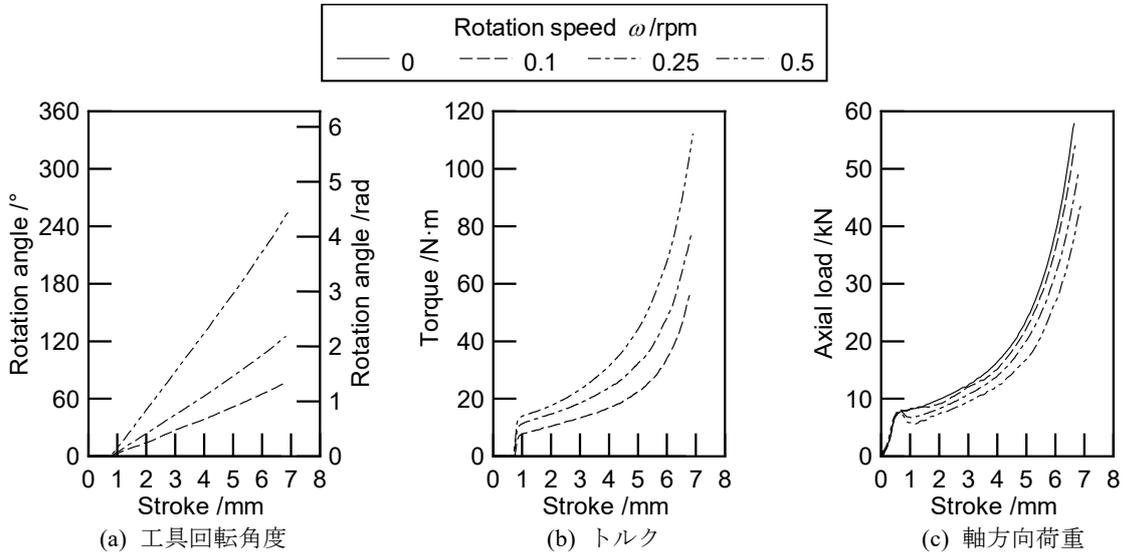


図6 一方ねじり付加据込み鍛造における工具回転角度、トルクおよび軸方向荷重の測定結果

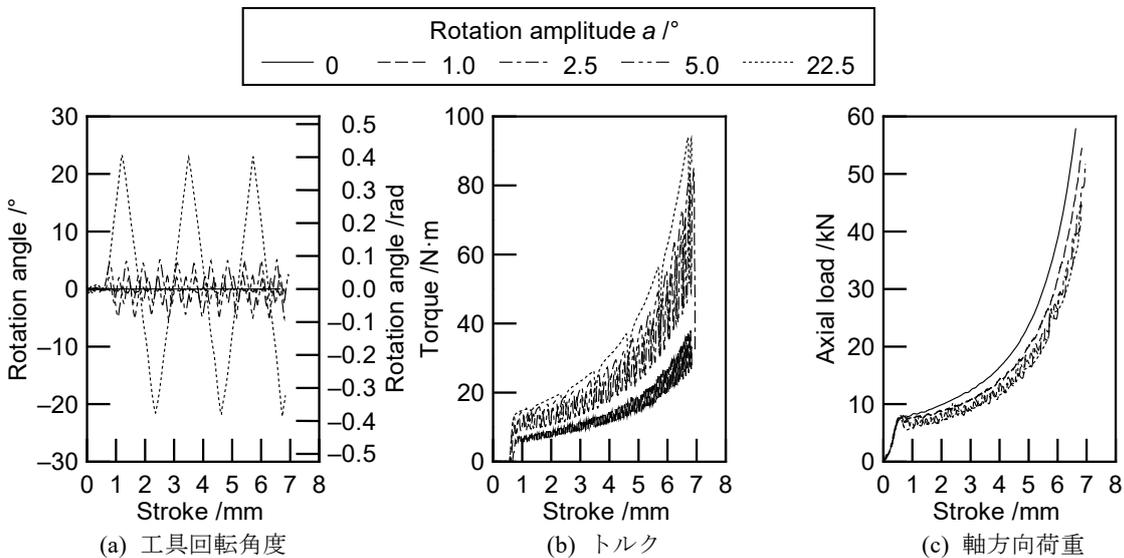


図7 ねじり振動付加据込み鍛造における工具回転角度、トルクおよび軸方向荷重の測定結果

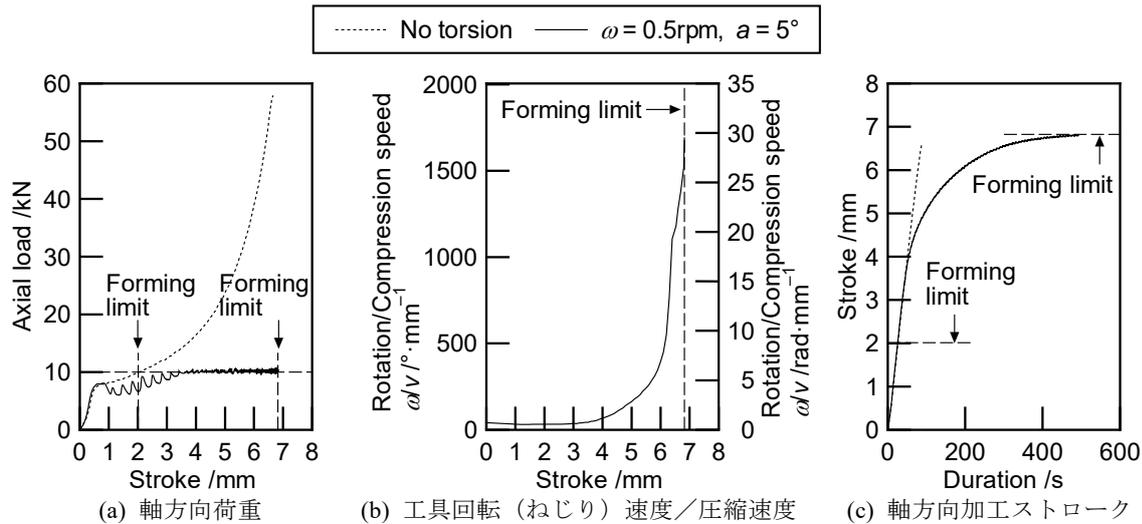


図8 ねじり振動付加据込み鍛造における軸方向荷重制御での荷重，工具回転速度および加工ストロークの測定結果

による簡易計算では， $a = 1^\circ$ のねじり付加で試験片の $r\theta$ 断面内の約98%の領域が降伏するため，応力成分の重ね合わせにより軸方向荷重が低下したと考えられる。

ねじり振動付加による軸方向荷重の低減について，応力成分の重ね合わせのほかに塑性発熱の増大による被加工材の軟化によることも考えられる。しかしながら，有限要素シミュレーションによると本鍛造条件での被加工材の温度上昇は5K以下であり，流動応力の低下はほとんど生じない。したがって，塑性発熱の増大に起因する軸方向荷重の低減ではないものと考えられる。

以上より， $a > 1^\circ$ ， $\omega > 0.25\text{rpm}$  ( $\omega/v > 15^\circ/\text{mm}$ )のねじり振動付加により軸方向荷重を約5%以上低減できることが分かった。

#### 4.3 軸方向荷重制御加工における軸方向荷重

4.1節で示した通り，ローレット溝付き工具による $\omega > 1\text{rpm}$ のねじり付加は困難なため， $\omega = 0.5\text{rpm}$ で軸方向荷重制御による加工実験を行った。軸方向荷重制御では，設定荷重(10kN)に達した後，設定荷重を付加した状態で $\omega = 0.5\text{rpm}$ のねじり振動を付加し続け， $v$ を従動させることで， $\omega/v$ を高めることで一定軸方向荷重での加工を行った。図8に軸方向荷重， $\omega/v$ ，軸方向加工ストロークの測定結果を示す。10kNに達した後， $v$ の低下により， $\omega/v$ は約1700°/mmまで上昇し，約6.8mmの加工ストロークまで10kNで加工可能であった。ねじりを付加しない場合，約6.8mmの加工ストロークでは約60kNの加工荷重が必要であるため，軸方向荷重の低減率は約80%となった。また加工限界ストロークを約2.0mmから約6.8mmに大幅に向上させたとも解釈できる。

一方，加工ストローク6.8mmでの試験片直径を考慮して， $\omega/v$ が約1700°/mmでの軸方向荷重の理論荷重率(図1)を計算すると低減率は95%以上となり，加工実験結果より荷重の低減率は高い。これは加工実験では摩擦や不均一変形の影響が生じたためと推察される。

## 5. 後方押し鍛造への展開

### 5.1 後方押し鍛造条件

図9に示す金型を3.1節で示した加工試験機に取り付け，後方押し鍛造を行った。コンテナ内に挿入した円柱状試験片を押しパンチで軸方向に $v = 0.05, 0.1\text{mm/s}$ で押し出しながら，ノックアウトパンチ(以降，K.O.パンチと書く)を押し軸まわりに $\omega = 0 \sim 5\text{rpm}$  ( $0 \sim 0.52\text{rad/s}$ )， $a = 5^\circ$  ( $\pi/36\text{rad}$ )，最大周波数1.5Hzの繰返し両振りで回転させた。

据込み鍛造実験と同様に室温で行い，A1070アルミニウム引抜き棒材を直径 $\Phi 13.9\text{mm}$ ，高さ12.0mm，表面粗さ $Ra = 0.30 \sim 0.50\mu\text{m}$ に旋削加工を施して，試験片とした。試験片外周面に鉱油(ISO粘度分類：VG32)を膜厚約90 $\mu\text{m}$ で塗布した。一方，金型にはSKH51高速度工具鋼(63HRC)を使用して，両パンチの先端面にローレット溝を設けて，パンチ端面-試験片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。一方，ローレット溝部以外の両パンチ表面およびコンテナ内径面は鏡面仕上げ( $Ra = 0.02 \sim 0.04\mu\text{m}$ )とした。

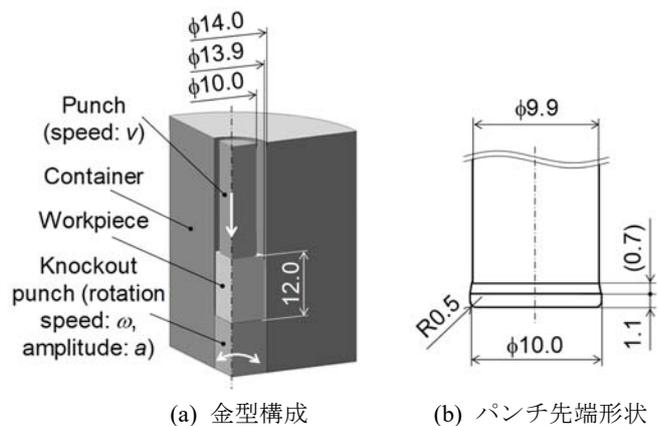


図9 ねじり振動付加後方押し鍛造の金型構成およびパンチ形状

## 5.2 押し荷重の低減<sup>10)</sup>

図 10 に押し圧力の加工実験結果および有限要素シミュレーション結果を示す。加工実験においてパンチ端面—試験片端面間にすべりを生じさせることなくねじりを付加可能な  $\omega/v \leq 60^\circ/\text{mm}$  ( $\omega \leq 0.5\text{rpm}$ ,  $v = 0.05\text{mm/s}$ ) のねじり振動付加では、押し圧力の加工実験結果と有限要素シミュレーション結果で良い一致が見られた。このことから、 $\omega/v > 60^\circ/\text{mm}$  のねじり振動付加においても有限要素シミュレーション結果を信頼できるものと考えられる。 $\omega/v \leq 60^\circ/\text{mm}$  ではねじり速度が速いほど押し圧力は低下し、 $\omega/v > 60^\circ/\text{mm}$  での押しストローク 4.0mm 以上では押し圧力のさらなる低下はほとんど得られず、押し圧力は約 20%の低減に留まった。試験片直径 ( $\Phi 13.9\text{mm}$ ) を考慮して図 1 の理論荷重率 ( $\sigma_z/\sigma_{z0}$ ) と比較すると、理論計算では後方押し鍛造で生じる r 方向

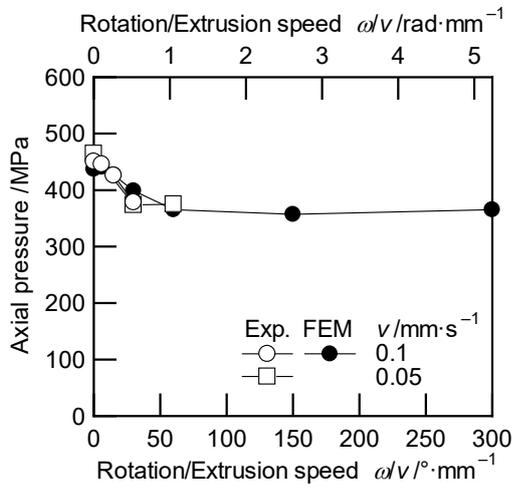


図 10 ねじり振動付加後方押し鍛造における押し圧力とねじり速度の関係 (押しストローク : 4.0mm)

応力を考慮していないため、理論荷重率の方が大幅に低い。また据込み鍛造では、 $\omega/v > 60^\circ/\text{mm}$  のねじり振動付加により 20%以上の軸方向荷重の低減が得られたことから、荷重の低減率は加工様式や形状に依存することが示唆される。

## 5.3 押し鍛造後の試験片外周面の表面性状<sup>11)</sup>

図 11 に後方押し鍛造後の試験片外周面の全体写真および拡大写真を示す。いずれの場合も表面きずが残った。コンテナ内径面に試験片の凝着は見られなかったことから、表面きずは初期試験片の旋削加工きずに起因するものと判断する。ねじりを付加しない場合は試験片の高さ (押し) 方向に表面きずが引き伸ばされ、表面きずの間隔や幅が広がった。一方、ねじりを付加した場合はねじり振動、一方向ねじりによる差異は見られず、表面きずの周方向長さは短くなり、水平方向から斜め方向に変化した。

図 12 に後方押し鍛造後の試験片外周面の表面粗さを K.O.パンチの累積回転角度 (試験片の累積ねじり角度) で整理したものを示す。表面粗さは接触式表面粗さ計によって、試験片の高さ (押し) 方向に 4.0mm 毎に 4 箇所、周方向に  $90^\circ$  毎に 4 箇所の合計 16 箇所を測定した。表面粗さについてもねじり振動、一方向ねじりによる差異は見られなかった。累積回転角度が  $\theta_{acc} =$  約  $360^\circ$  以下の範囲では累積回転角度の増加とともに表面粗さの平均値、標準偏差ともに小さくなり、特に  $\theta_{acc} = 200 \sim 360^\circ$  の範囲では初期試験片の表面粗さの平均値、標準偏差より小さくなった。ねじり付加により試験片外周面は平滑化され、凹凸の不均一度も低減されることが分かる。このことからコンテナ内径面—試験片外周面間で潤滑油が試験片の高さ方向のみならず、周方向にも引き伸ばされたため、潤滑状態の不均一度が低減されたことが推察され

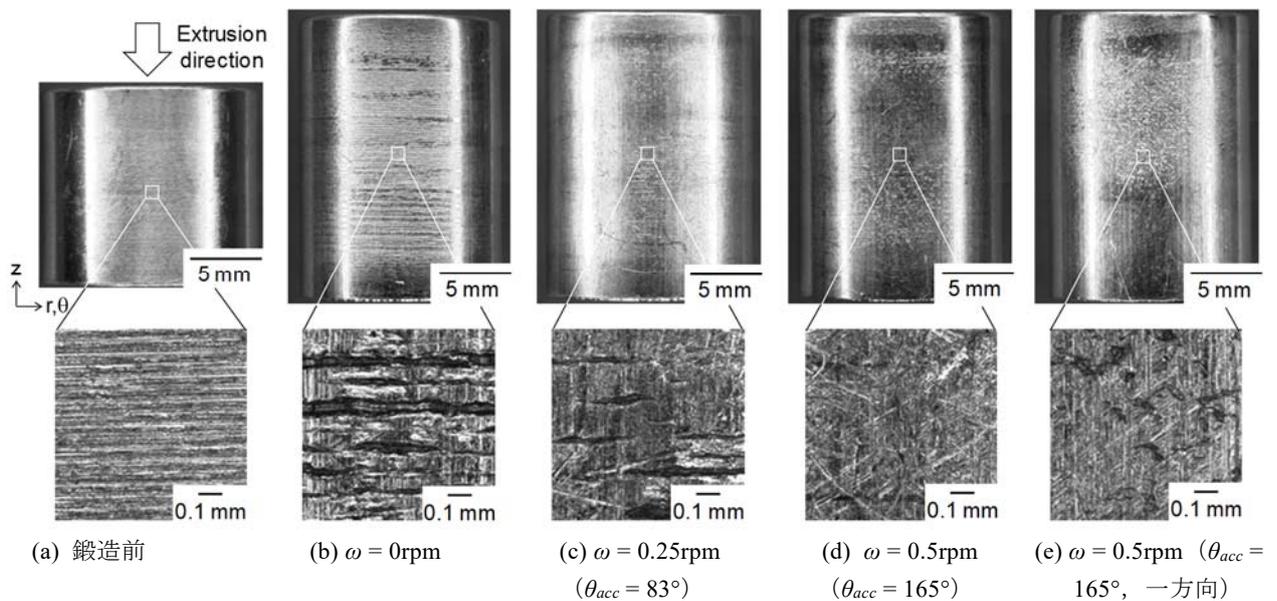
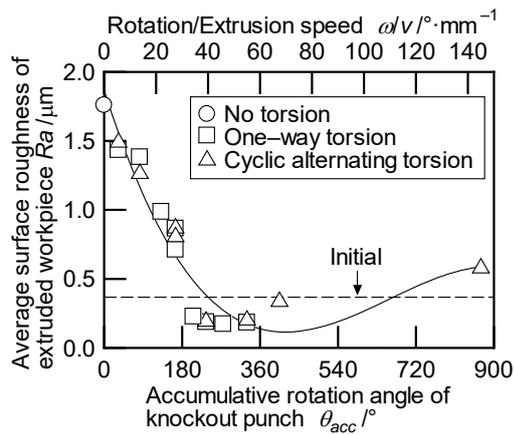
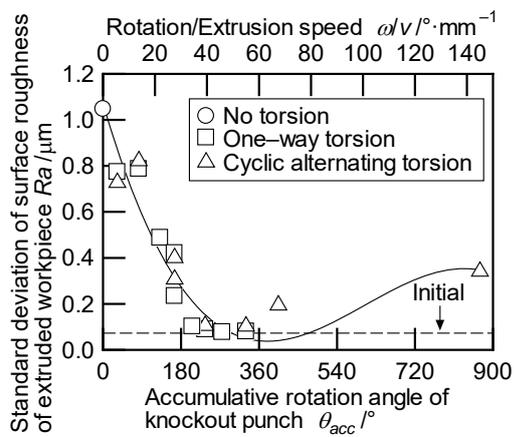


図 11 ねじり振動付加後方押し鍛造後の試験片外周面の写真 ( $v = 0.1\text{mm/s}$ ,  $\theta_{acc}$  : K.O.パンチの累積回転角度, 押しストローク : 6.0mm)



(a) 平均表面粗さ



(b) 平均表面粗さの標準偏差

図 12 ねじり振動付加後方押し鍛造後の試験片外周面の表面粗さと累積ねじり角度の関係 ( $v = 0 \sim 0.1 \text{ mm/s}$ ,  $\omega = 0.5 \text{ rpm}$ , 押しストローク:  $6.0 \text{ mm}$ )

る。一方、 $\theta_{acc} =$  約  $360^\circ$  以上の範囲では表面粗さの平均値、標準偏差ともに徐々に上昇した。過度のねじり付加により試験片外周面の表面性状を悪化させる場合もあるため、注意が必要である。

## 6. まとめ

本研究では、軸方向荷重の低減を主目的とし、鍛造加工中に軸方向周りのねじり振動を付加するねじり振動付加鍛造加工法を提案した。力学理論、加工実験、数値解析シミュレーションにより取り組んだ。以下に得られた結果をまとめる。

- 1) 主加工方向の垂直応力成分と主加工軸まわりのせん断応力成分の重ね合わせにより、据込み鍛造では振幅  $1^\circ$  以上、ねじり速度/軸方向速度  $15^\circ/\text{mm}$  以上の両振りねじり振動の付加により、軸方向荷重を約 5% 以上低減でき、 $1700^\circ/\text{mm}$  のねじり振動の付加により、軸方向荷重を約 80% 低減できた。
- 2) 後方押し鍛造でのねじり振動付加では、ねじり振幅  $5^\circ$ 、ねじり速度/軸方向速度  $60^\circ/\text{mm}$  以上の両振りねじり振動により、押し荷重を 10~20% 低減できた。
- 3) 後方押し鍛造でのねじり振動付加では、累積ねじり角度が概ね  $360^\circ$  以下の範囲では、コンテナ内径面-試験片外周面間の潤滑状態の不均一度が低減され、試験片外周面の凹凸の不均一度も低減できた。

## 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。また本研究の一部は科学研究費補助金・基盤研究(C)を受けて実施したことを付記し、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) 前野智美, 小坂田宏造, 森謙一郎: 塑性と加工, **50**-585 (2009), 951-955.
- 3) Kim, S.Y., Tsuruoka, K. & Yamamoto, T.: Procedia Eng., **81** (2014), 2415-2420.
- 4) Bridgman, P.W.: J. App. Phys., **14** (1943), 273-283.
- 5) 藤森直往: 20 回塑加連講論, (1969), 221-224.
- 6) Bochniak, W. & Korbel, A.: J. Mater. Process. Technol., **134**-1 (2003), 120-134.
- 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) Matsumoto, R., Kou, J. & Utsunomiya, H.: Int. J. Adv. Manuf. Technol., **93**-1-4 (2017), 933-943.
- 10) 松本良, 高塚誠司, 宇都宮裕: 塑性と加工, **60**-703 (2019), 235-240.
- 11) 松本良, 高塚誠司, 宇都宮裕: 塑性と加工, **60**-703 (2019), 241-246.