

ドライおよびセミドライ塑性加工における摩擦機構の解明

大阪大学 大学院基礎工学研究科 機能創成専攻
教授 小坂田宏造
(平成 15 年度研究開発助成 AF-2003010)

キーワード：無潤滑・微量潤滑，冷間鍛造，アルミニウム合金

1. 研究の目的と背景

現在，環境保護は重要な課題であり，環境対応加工の早急な実用化が強く望まれている．加工分野においては，潤滑油を全く使用しない無潤滑（ドライ）加工，極微量の潤滑油を使用する極微量潤滑（セミドライ）加工，無害な潤滑油の開発が進められている 1)-3)．切削加工では以前から無潤滑化への取組みがさかんに行われており，無潤滑切削加工（ドライカッティング），MQL（Minimal Quantity Lubricants）加工が一部実用化されている．一方，塑性加工では，無潤滑化技術の多くは研究・開発段階であり，実用化はわずかである．

塑性加工では，潤滑油は塩素を含まない塩素フリーの潤滑油，加工後に洗浄が不要な無洗浄油（揮発性潤滑油），白色系潤滑油，水潤滑などが開発され，環境負荷の低減が試みられている．また冷間鍛造では，リン酸塩・石鹸処理（ボンデ・ボンダリユーベ処理）に代わる潤滑油の開発が望まれているが，ボンデ処理と同等の潤滑効果は得られていない．無潤滑化，微量潤滑化については，工具では硬質膜の工具表面への被膜処理，加工材料では自己潤滑特性を持つ新素材の開発，あるいは無潤滑化に対応した加工プロセスの開発が行われている．

本研究では，アルミニウム合金の冷間鍛造における無潤滑・微量潤滑化を目指して，リング圧縮試験，プラグ通し試験を行い，摩擦，工具への焼付きを評価する．

2. 実験方法

2.1 リング圧縮試験

試験片材料にアルミニウム合金 A5052 を用いてリング圧縮試験⁴⁾を行った．試験片は外径 D_0 ：内径 d_0 ：高さ $h_0 = 6:3:2$ となるように， $D_0 = 15.0\text{mm}$ ， $d_0 = 7.5\text{mm}$ ， $h_0 = 5.0\text{mm}$ とし，試験片の工具接触面の表面粗さを $1\mu\text{mRa}$ に旋削仕上げした．圧縮用工具には鏡面仕上げ（ $0.02\mu\text{mRa}$ ）した超硬合金（85%WC-15%Co）を用いた．潤滑油は鉱油 VG32（動粘度： $32.5\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ （ 40°C ））を使用し，図 1 に示すようにエア缶に繋がったエアブラシを用いて工具表面にミスト状に極微量を噴霧した．エアブラシのノズル口径は 0.3mm ，吹付け圧力は約 0.3MPa とした．

本試験では油圧多軸サーボプレスに金型を取付け，試験片，工具ともに室温で，速度 $5.0\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ でリング状試験片を圧縮した．

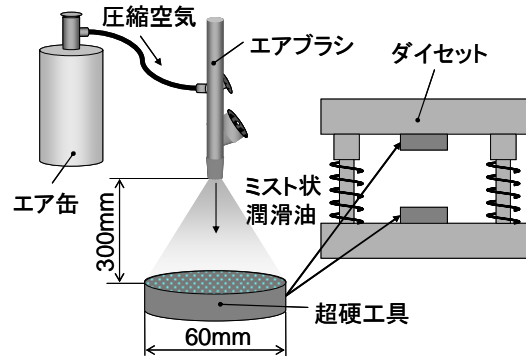


図 1 リング圧縮試験で用いたミスト状潤滑油の供給装置

2.2 プラグ通し試験

図 2 にテーパ付プラグ通し試験装置を示す．テーパ付プラグ通し試験⁵⁾ではコンテナに挿入した厚肉円筒状試験片を試験片上面から試験片内径より大きな直径のテーパ付プラグを押し通し，押し通し荷重や試験片内径面の表面状態から焼付き，摩擦を評価する．減面率 R をプラグ最大直径 D_p ，コンテナ内径 D_c ，試験片内径 d_0 を用いて，

$$\text{減面率 } R = \frac{D_p^2 - d_0^2}{D_c^2 - d_0^2} \times 100 \quad \% \quad (1)$$

と定義する．

テーパ付プラグ，コンテナ内面は超硬合金（WC-5%Co）で作成し，プラグはストレート部直径 $D_p = 13.0\text{mm}$ ，テーパ角度 $\theta = 10^\circ$ ，表面粗さ $0.03\mu\text{mRa}$ に鏡面仕上げした．試験片材料はアルミニウム合金 A5052 を使用し，外径 29.9mm ，初期内径 $d_0 = 12.0, 12.5\text{mm}$ （減面率 $R = 3.3, 1.7\%$ ），初期高さ $h_0 = 30.0, 40.0\text{mm}$ とし，内径面表面粗さを $1.0\mu\text{mRa}$ に仕上げた．また潤滑油には鉱油 VG32（動粘度： $32.5\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ （ 40°C ））を使用し，揮発性のベンジン

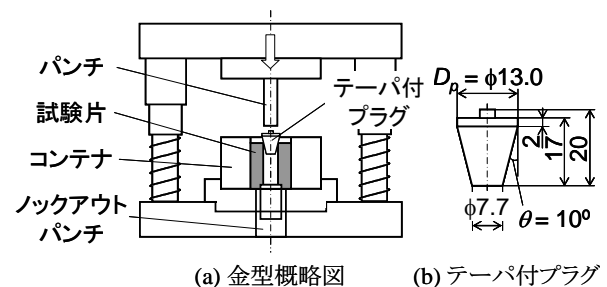


図 2 テーパ付プラグ通し試験装置図

で希釈し、プラグ表面に塗布した。ベンジンは塗布後、数秒で蒸発し潤滑油のみプラグ表面に残るため、塗布量を調節することで、0~2.0 m の薄膜状 (0~1.8g・m⁻²) に塗布した。

本試験では、油圧多軸サーボプレスに金型を取付け、速度 20mm・s⁻¹、室温でプラグを試験片に押通した。なお試験前にプラグ表面、試験片内面を脱脂した。

3. 研究成果

3.1 リング圧縮試験

3.1.1 ミスト状潤滑油の噴霧状態

ミスト状潤滑油の工具表面への付着状態を調べた。工具表面全体 (工具直径 60mm) への潤滑油の様な噴霧は困難であるため、リング圧縮試験時に工具と試験片が接触する最大領域 (工具中央の直径 35mm) 内に噴霧される潤滑油量と付着面積割合を調べた。ここで付着面積割合は工具表面に付着した潤滑油の面積割合とする。図 3 に工具中央の測定領域 (直径 35mm) に噴霧されたミスト状潤滑油の様子を示す。本噴霧方法により潤滑油を測定領域にほぼ一様に噴霧できることが分かる。

次に噴霧時間と噴霧された潤滑油量、付着面積割合の関係を図 4 に示す。工具表面に付着する潤滑油量はプラスチックシート (直径 35mm) に潤滑油を噴霧し、噴霧前後の重量変化から求めた。また付着面積割合は潤滑油の付着により、黒色に変色する市販の青色の油吸収フィルム (90mm×55mm) に潤滑油を噴霧し、画像処理 (二値化) により求めた。噴霧時間と潤滑油量、付着面積割合はともに比例関係にあり、付着面積割合は 25% 以下であり、本実験では工具表面の大部分に潤滑油が付着していない状態であることが分かる。

3.1.2 摩擦係数測定結果

工具表面にミスト状潤滑油を噴霧して行ったリング圧縮試験の結果を図 5 に示す。圧縮率 30% では、0.7g・m⁻² のミスト状潤滑油の噴霧により摩擦係数を無潤滑の場合の $\mu = 0.12$ から 0.05 まで下げることができ、0.7g・m⁻² 以上の潤滑油を噴霧しても摩擦係数をさらに低減させることはできなかった。圧縮率 50% では、0.5g・m⁻² のミスト状潤滑油の噴霧することにより摩擦係数を無潤滑の場合の $\mu = 0.14$ から 0.07 まで下げることができ、0.5g・m⁻² 以上の潤滑油を噴霧してもさらなる摩擦係数の低減はできなかった。

3.1.3 リング圧縮試験後の試験片表面粗さ

リング圧縮試験後のアルミニウム試験片の表面粗さを図 6 に示す。無潤滑の場合、工具と試験片が直接接触して工具の表面粗さ (0.02 μ mRa) が試験片表面に転写されるため、加工後表面粗さは工具表面粗さと同程度になり、潤滑油量の増加にともない、潤滑油が工具-試験片間に閉込められ、工具と試験片の接触が妨げられるために表面粗さが無潤滑の場合に比べて大きくなる。本実験のように鏡面仕上げされた工具に 1.0g・m⁻² 以下の潤滑油を供

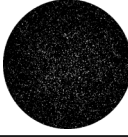
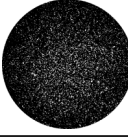
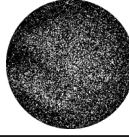
噴霧時間 /s	3	5	10
工具表面			
噴霧量 /g・m ⁻²	0.62	0.96	1.73
付着面積割合 /%	5.9	11.5	25.3

図 3 工具表面に噴霧された潤滑油

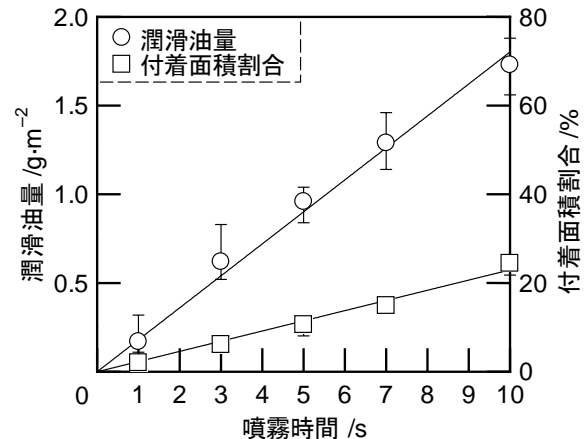


図 4 潤滑油噴霧時間と潤滑油量、付着面積割合の関係

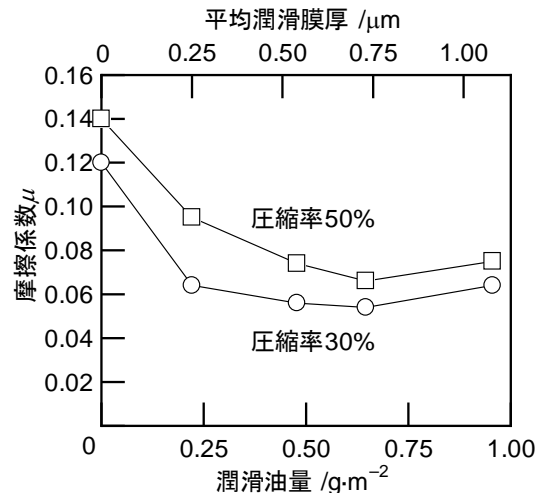


図 5 ミスト潤滑リング圧縮試験におけるアルミニウム合金の摩擦係数測定結果

給する場合は圧縮後表面粗さを 1.0 μ mRa 以下にすることができる。

3.1.4 最適潤滑油量の検討

前節までのミスト潤滑リング圧縮試験の結果より、最適潤滑油量について検討する。摩擦係数はある潤滑油量以下で急激に上昇し、圧縮後の表面粗さは潤滑油量に比例して大きくなる。そこで急激に摩擦係数、加工面圧が上昇することのない最小の潤滑油量を最適潤滑油量とすると、図 5、6 より、0.5~0.7g・m⁻² の潤滑油が本実験での最小潤滑油量と考えられる。最適潤滑油を供給した

場合、無潤滑と比較して摩擦係数は30~50%、圧縮後試験片表面粗さは0.3 μmRa 程度となる。

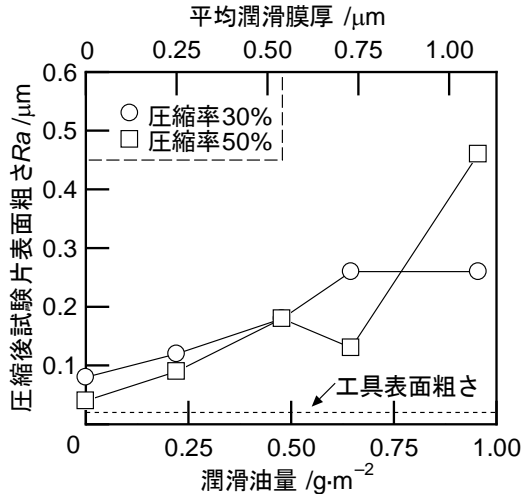


図6 ミスト潤滑リング圧縮試験後の試験片表面粗さ

3.2 プラグ通し試験

3.2.1 試験片内径面の表面状態

減面率 $R = 1.7\%$ で無潤滑および潤滑膜厚 $1.0\mu\text{m}$ で行ったテーパ付プラグ試験後のアルミニウム合金試験片の断面写真と試験片内径面の表面プロファイルを図7に示す。無潤滑では加工初期から軽度の焼付きが生じ、試験片上面から約 12mm の位置から試験片表面の粗さが大きくなり、重度の焼付きが生じた。潤滑膜厚 $1.0\mu\text{m}$ の場合も無潤滑の場合と同様に軽度、重度の順に焼付きが発生した。本研究では目視観察により焼付き状態を評価し、重度の焼付きについて着目する。以降、本文では重度の焼付きを単に焼付きと書く。

試験後のプラグのテーパ部には試験片の一部が凝着したが、紙やすりで取除ける程度の凝着であった。炭素鋼のボール通し試験では、ボール前方部に発生する盛り上がり変形（バルジ）部がボール貫通時にせん断分離する現象が起きることが報告されているが⁶⁾、本実験では試

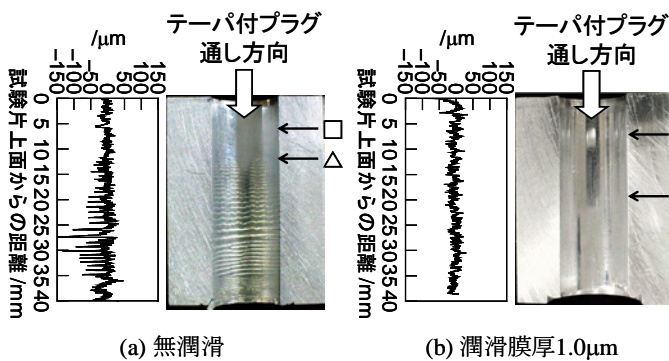


図7 テーパ付プラグ通し試験後のアルミニウム合金A5052試験片の断面写真および試験片内径面の表面プロファイル

験片のせん断破断は生じず、試験片底部まで変形状態は一定に保たれると考えられる。

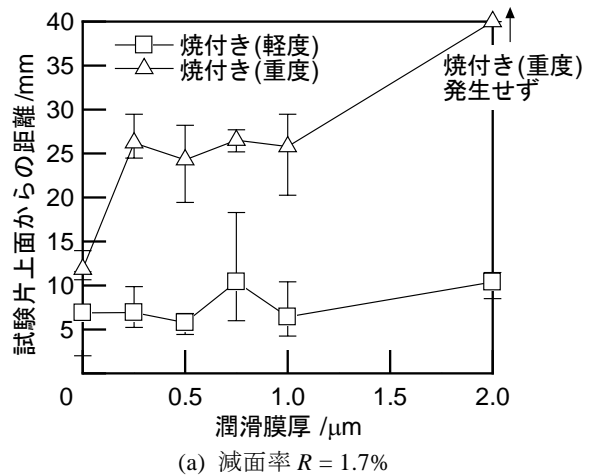
3.2.2 潤滑油量と焼付き発生位置

図8に潤滑油量とアルミニウム合金試験片の焼付き発生位置の関係を示す。減面率 $R = 1.7\%$ では、無潤滑の場合、試験片上面から約 12mm の位置で焼付きが観察され、膜厚 $0.25\sim 1.0\mu\text{m}$ の潤滑油を供給した場合、いずれの場合も試験片上面から 25mm 程度の位置で焼付きが生じた。膜厚 $2.0\mu\text{m}$ とした場合、試験片底部（試験片初期高さ $h_0 = 40\text{mm}$ ）まで焼付きが生じなかった。一方、 $R = 3.3\%$ では、潤滑油量によらず試験片上面から約 10mm 程度の位置で焼付きが生じ、潤滑油量による焼付き発生までのプラグ通し距離に大きな違いは見られなかった。

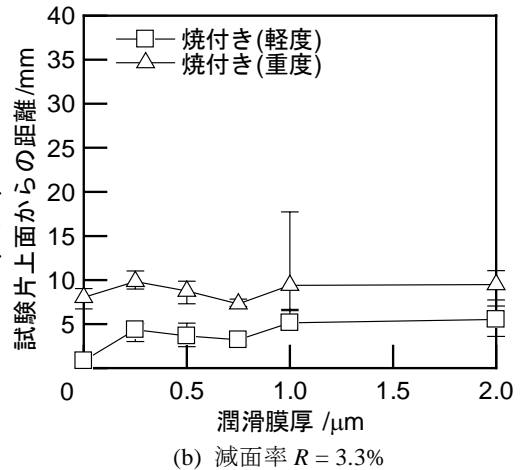
テーパ付プラグ通し試験では減面率が高いほど厳しい加工となり、アルミニウム合金A5052、鋳油VG32に対しては、 $R = 1.7\%$ の試験では潤滑油量により焼付き発生位置に違いが見られ、 $R = 3.3\%$ の試験は加工が厳しく、潤滑効果がほとんどなかったと思われる。

3.2.3 加工荷重—ストローク曲線

プラグ通し試験中の加工荷重—ストローク曲線を図9に示す。プラグのストレート部まで押込まれる試験片上



(a) 減面率 $R = 1.7\%$



(b) 減面率 $R = 3.3\%$

図8 テーパ付プラグ通し試験における潤滑油量とアルミニウム合金試験片の焼付き発生位置の関係

面から 10mm 以上の定常変形域において、潤滑油量が多いほど加工荷重の上昇は少なく、 $R = 1.7\%$ では試験片底部まで焼付きが発生しない潤滑膜厚 $2.0\mu\text{m}$ の場合、加工荷重はほぼ一定である。図 10 に試験片上面から 10~25 mm の定常変形域での加工距離 1.0mm あたりの加工荷重の増加割合を示す。ただし、 $R = 3.3\%$ の無潤滑、潤滑膜厚 $0.25\mu\text{m}$ ではプレス最大加圧能力 (10tonf) を考慮して、

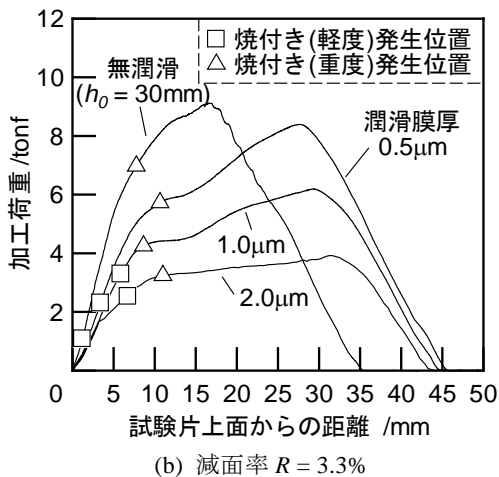
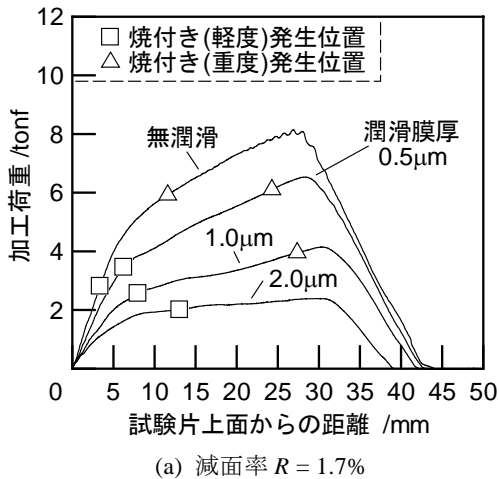


図 9 テーパー付プラグ通し試験における潤滑油量とプラグ通し荷重の関係

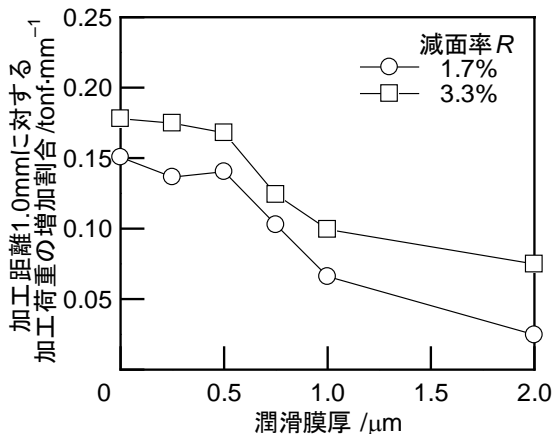


図 10 定常変形域における加工距離 1.0mm あたりの加工荷重の増加割合と潤滑油量の関係

高さ $h_0 = 30\text{mm}$ の試験片を使用し、加工距離 8~18mm で評価した。潤滑油量が少なく減面率が高いほど、加工荷重の増加割合は大きく、加工荷重の増加割合が焼付き性、摩擦を評価する指標の一つとなる可能性があると考えられる。しかしながら、今回の実験では目視による焼付き発生位置と加工荷重曲線、加工荷重の増加割合との明確な対応は見られず、加工荷重曲線を利用した焼付き発生位置の特定法の確立は今後の課題である。

3.3 有限要素シミュレーションによるプラグ通し試験片の試験片変形解析

3.3.1 計算条件

剛塑性有限要素シミュレーター RIPLS-Forge⁷⁾ を使用して、テーパ付プラグ通し試験の変形解析を行った。対称性から断面の右半分の領域について計算し、計算条件は実験条件と同一とした。変形抵抗は端面拘束圧縮試験により求め、摩擦条件は摩擦せん断係数 $m = 0 \sim 0.8$ を与えた。

3.3.2 摩擦条件と加工荷重の関係

図 11 に加工荷重の計算結果を示す。摩擦せん断係数が高いほど、定常変形域において加工荷重の上昇が大きい。

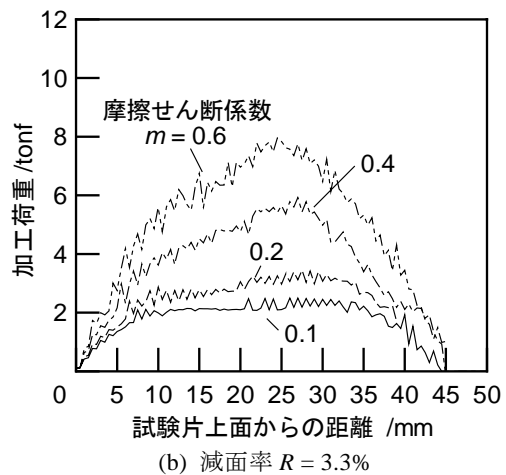
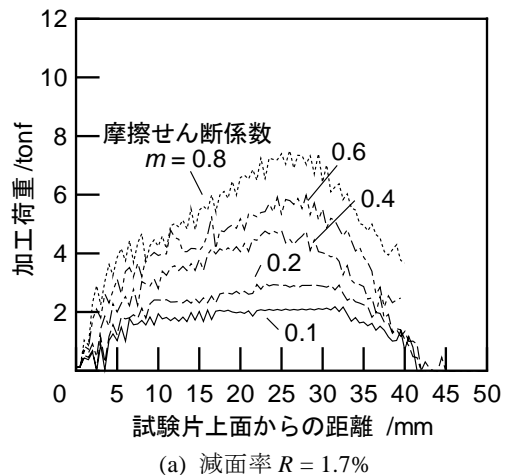


図 11 有限要素シミュレーションによるプラグ通し荷重の計算結果

これは高摩擦になるほどプラグのテーパ部に生じる試験片のバルジ部が大きくなることも一要因である。実験において焼付きが生じなかった $R = 1.7\%$ 、潤滑膜厚 $2.0\mu\text{m}$ の加工荷重曲線 (図 8) と図 11(a) を比較すると、この場合は摩擦せん断係数 $m = 0.2$ 程度と推定できる。図 8 と図 11 を比較することで焼付き発生以前の摩擦状態は推定できると考えられる。

4. 結び

本研究では、無潤滑、微量潤滑下でリング圧縮試験、テーパ付プラグ通し試験を行い、アルミニウム合金のドライ、セミドライ塑性加工の実用化に向けた摩擦基礎特性を調べた。リング圧縮試験では、アルミニウム合金の極微量潤滑冷間鍛造での最適潤滑油量は $0.5\sim 0.7\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ であり、無潤滑と比較して摩擦係数を 30~50% 程度低減でき、表面粗度の良い製品が加工できることが分かった。またテーパ付プラグ通し試験では、減面率 $R = 1.7\%$ では潤滑油量によって焼付き発生位置が変化し、微量潤滑下での本試験の有効性が分かった。ただし、定量的な焼付き評価を行うためには、加工荷重、試験片内径面表面粗さ、有限要素解析等の組み合わせによる評価方法を確立する必要がある。

今後、実加工での無潤滑、微量潤滑塑性加工を目指し

て、加工圧力、工具-素材間すべり距離、温度等の加工条件から無潤滑化、微量潤滑化の可否を定性的に判断できる評価手法を開発する予定である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり研究助成いただいた (財) 天田金属加工技術振興財団に深く感謝の意を表します。また実験では大阪大学大学院基礎工学研究科・助手 松本良博士にご協力いただいたことを附記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) W.J. Bartz: Tribology Int., **31**/1-3(1998), 35-47.
- 2) F. Klocke and G. Eisenblätter: Annals of the CIRP, **46**/2(1997), 519-526.
- 3) 片岡征二: トライボロジスト, **46**-7(2001), 509-515.
- 4) 久能木真人: 科学研究所報告, **30**-2(1954), 63-92.
- 5) K. Kitamura and T. Ohmori: Proc. 6th ICTP, **2**(1999), 875-880.
- 6) 北村憲彦, 大森俊英, 団野 敦, 河村益彦: 塑性と加工, **34**-393(1993), 1178-1183.
- 7) K. Osakada, J. Nakano and K. Mori: Int. J. Mechanical Sciences, **24**-8(1982), 459-468.