

塑性加工の無潤滑・微量潤滑化 に関する基礎研究

2003/01 松本 良

論文概要

塑性加工では素材－工具間での摩擦や接触部の発熱による加工力の増大，素材の工具への焼付きを防止するため潤滑油が使用される．しかしながら，近年，環境への取組みがさかんに行われるようになり，潤滑油の人体への影響，廃液の処理問題など有害性が問題となっている．塩素を含まない潤滑油など無害な潤滑油の開発，極微量の潤滑油を噴霧する極微量潤滑（セミドライ）加工，潤滑油を全く用いない無潤滑（ドライ）加工が注目されている．しかし，無潤滑加工では工具摩耗が大きくなり工具寿命の低下，素材の工具への焼付きによる素材の表面性状の悪化などが問題となり，塑性加工では無潤滑加工はほとんど検討されていない．本論文では，無潤滑塑性加工を実用化するために，硬質膜を被膜処理した塑性加工用工具による無潤滑塑性加工，ミスト潤滑による極微量潤滑塑性加工における摩擦特性についての基礎研究を行う．また軽量，高強度，さらにリサイクル性に優れ，環境負荷が小さいマグネシウム合金の鍛造加工法の開発を行う．

まず鍛造加工等での摩擦係数測定に広く使用されるリング圧縮試験において，高摩擦域においても高精度で摩擦係数が評価できる初期試験片形状を剛塑性有限要素解析により決定する．決定された高摩擦域用試験片形状を用いて，表面被覆工具の無潤滑塑性加工における摩擦特性について述べる．工具被覆物質と被加工材との適切な加工条件，工具表面粗さ，素材表面の酸化物が摩擦におよぼす影響について調べ，アルミニウム合金の無潤滑加工における DLC 被膜の効果を示す．

次にミスト噴霧による微量潤滑すえ込み加工について，ミスト状潤滑油の工具表面への噴霧状態を調べ，極微量潤滑における潤滑油量と摩擦，被加工物の表面粗さの関係を示す．またミスト微量潤滑の潤滑機構について，摩擦試験後の被加工物の表面状態から考察する．さらにミスト微量潤滑における潤滑油の効果と無潤滑での表面被覆工具の効果との比較を行う．

マグネシウム合金の無潤滑および微量潤滑における摩擦特性を明らかにするため，すべり試験，リング圧縮試験を行う．またマグネシウム合金の鍛造加工における潤滑方法について述べ，液体潤滑油の評価を行う．最後にマグネシウム合金の精密鍛造を目指し，材料特性を利用した温間鍛造法について述べる．加熱炉を使用しない加熱方法，加工軟化特性を利用した鍛造法を提案し，モデル実験，有限要素解析を行う．

1. 緒言

近年、塑性加工において環境への取組みが重要視され、潤滑油の人体への影響、廃液の処理問題など有害性が問題となっている。塩素を含まない潤滑油など無害な潤滑油の開発、極微量の潤滑油を噴霧する極微量潤滑（セミドライ）加工、潤滑油を全く用いない無潤滑（ドライ）加工が注目されている。塑性加工の無潤滑、微量潤滑化は環境への影響を少なくするだけでなく、潤滑油のコスト削減にもつながる。しかし、無潤滑加工では工具寿命の低下、素材の工具への焼付き等が問題となるため、塑性加工では無潤滑、微量潤滑化はほとんど実現されておらず、研究段階である。

一方、切削加工では、超硬合金工具の開発、CVD法、PVD法による表面被覆工具の開発により、工具の耐熱性、耐摩耗性が改善され、潤滑油を用いないドライカッティングが可能になりつつある。また切削加工では、一般に数十～数百 l/h の潤滑油を用いるが、10ml/h 以下の微量の潤滑油を噴霧する MQL (Minimal Quantity Lubricants) 加工が実用化しつつある。

本研究では、塑性加工の無潤滑、微量潤滑化を目指し、無潤滑、微量潤滑での鍛造加工の摩擦特性を調べる。

2. リング圧縮試験法

摩擦特性は鍛造加工における摩擦測定に一般に用いられるリング圧縮試験により測定した。Fig. 1 に示すようにリング圧縮試験はリング状の試験片を平行工具間で圧縮し、摩擦状態によって圧縮後の試験片形状が変化することを利用して、摩擦係数を求める試験法である。あらかじめ有限要素シミュレーション等により圧縮率 $\Delta h/h_0$ と内径変化率 De の関係を表す摩擦係数検定曲線 (Fig. 2) を求めておき、圧縮前後のリング状試験片の内径と高さの測定結果をプロットして摩擦係数を求める。

試験片は工業用純アルミニウム (A1050)、純銅 (C1020)、0.45%炭素鋼 (S45C) を用いて、外径 $D_0 = 21.0\text{mm}$ 、内径 $d_0 = 7.0\text{mm}$ 、高さ $h_0 = 7.0\text{mm}$ のリングに旋削加工した。試験片圧縮面の表面粗さは摩擦に大きく影響するものと考えられるため、平均粗さ $R_a = 1.0\mu\text{m}$ 以下にし、圧縮前にエタノールで脱脂した。

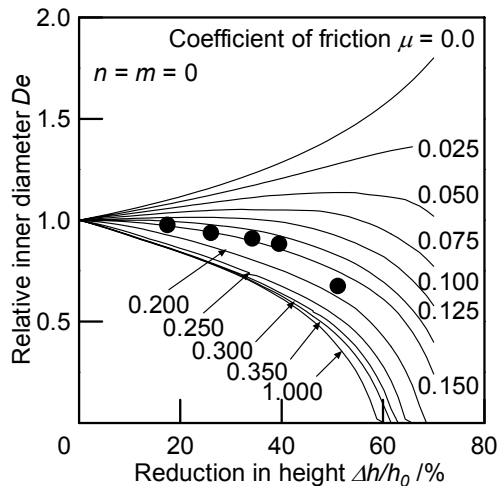


Fig. 2 Calibration curve of ring specimen ($D_0: d_0: h_0 = 6: 3: 2$)

工具は工具母材に超硬合金 (WC : 85%, Co : 15%) を用いて、平均粗さ $R_a = 0.02\mu\text{m}$ に研磨処理した。また表面被覆工具は超硬合金表面に CVD 法または PVD 法によって、TiC, TiN, TiC+TiCN+TiN, TiAlN を膜厚 2.0~7.0 μm で被膜処理した。被膜処理のままでは、平均粗さ $R_a = 0.03\sim 0.18\mu\text{m}$ であり、表面粗さの摩擦への影響を取除くため、 $R_a = 0.02\mu\text{m}$ に研磨処理した。一方、DLC (Diamond Like Carbon) はプラズマ CVD 法により、膜厚 40nm で被膜処理し、平均粗さ $R_a = 0.02\mu\text{m}$ である。

リング圧縮試験は室温および加熱状態でを行い、試験片の圧縮には、機械プレスを用いた。

3. 無潤滑塑性加工における摩擦特性

3.1 工具被覆物質の影響

無潤滑加工における工具被覆物質が摩擦におよぼす影響を調べるため、室温および加熱状態で摩擦係数を測定した。室温における圧縮率 $\Delta h/h_0 = 35\%$ での摩擦係数を測定した結果を Fig. 3 に示す。アルミニウム合金は表面被覆工具を用いると、超硬工具より摩擦係数は低くなる。一方、銅合金は表面被覆工具を用いることで、超硬工具より摩擦係数は高くなる。また炭素鋼では超硬合金と工具被覆物質による摩擦係数の差はみられない。したがって、本実験で用

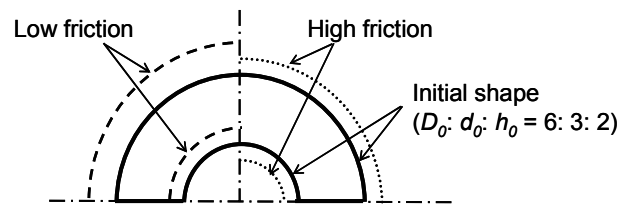
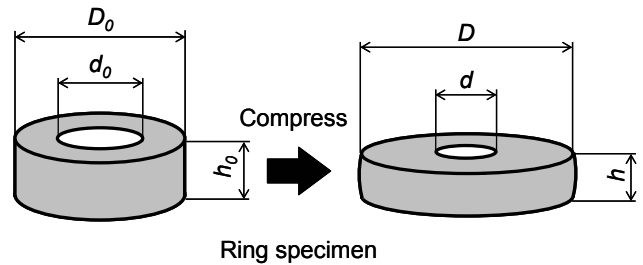


Fig. 1 Deformation of ring specimen during compression

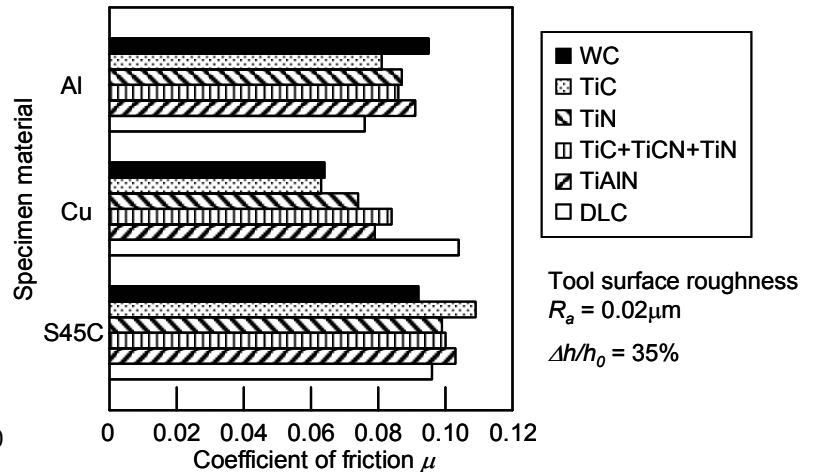


Fig. 3 Effect of tool coating material on coefficient of friction at room temperature

いた工具被覆物質は、アルミニウム合金との摩擦的な相性は良いが、銅合金との相性は良くない。

DLC 被覆工具以外の表面処理方法は摩擦係数の値に大きな差はない。DLC 被覆工具を用いた場合、アルミニウム合金では、表面粗さが同程度の超硬工具を用いた場合に比べ、摩擦係数が低くなる。一方、銅合金では摩擦係数が高くなる。したがって、DLC 被覆工具は加工材料により摩擦が大きく変化する。

アルミニウム合金の無潤滑加工において、DLC は工具表面処理の効果が大きいとみられるため、DLC 被覆工具と超硬工具を用いて、圧縮率と摩擦係数の関係を調べた。摩擦係数の測定結果を Fig. 4 に示す。室温でのアルミニウム-DLC 被覆工具間の摩擦係数は、圧縮率の上昇とともに単調に下がる。一方、アルミニウム-超硬工具間の摩擦係数は、圧縮率 $\Delta h/h_0 = 40\%$ までは下がるが、高圧縮率では摩擦係数は再び大きくなる。また工具は室温のまま、アルミニウム試験片を 200°C に加熱した場合、超硬工具では圧縮率の上昇とともに摩擦係数が大きく上昇するが、DLC 被覆工具では室温と同じである。

以上より、無潤滑加工では工具表面への硬質皮膜処理は有効であるが、摩擦を低減するためには被加工材料に適した工具被覆物質を開発することが重要である。アルミニウム合金の加工では、DLC 被覆工具は加工度が高い範囲で摩擦、加工荷重を小さくする。DLC 被膜はアルミニウム合金の加工に適した被膜処理であることが分かる。

3.2 工具表面粗さの影響

表面粗さ $R_a = 0.02 \sim 0.18 \mu\text{m}$ の表面被覆工具を用いて、工具表面粗さが摩擦におよぼす影響を室温で調べた。摩擦係数の測定結果を Fig. 5 に示す。DLC 被覆工具を除いて、摩擦は工具被覆物質によらず工具表面粗さの増大とともに大きくなる。無潤滑加工では工具表面が被加工物に直接接触するため、工具表面粗さが摩擦におよぼす影響は大きいことが分かる。したがって、表面被覆工具を被膜処理後に鏡面仕上げにすることにより、アルミニウム合金、銅合金の無潤滑加工が実現できる可能性が高い。

3.3 炭素鋼における酸化膜の影響

炭素鋼表面に付着する酸化膜が摩擦におよぼす影響を調べた。加熱雰囲気は空気およびアルゴン雰囲気で行った。大気中で酸化させたものは厚さ約 0.12mm の酸化膜が試験片表面にできた。一方、アルゴン雰囲気中で酸化させたものは非常に薄い酸化膜 (1nm のオーダー) が試験片表面にできたが、測定は不可能であった。ここで酸化膜の厚さは加熱前と加熱後室温まで冷却した試験片の寸法をそれぞれ測定して求めた。加工温度は 1000°C と室温で行い、熱間加工、冷間加工で酸化膜の影響を調べた。なお冷間加工では試験片を炉内で加熱し酸化させ、室温まで空冷したものを用いた。測定結果を Fig. 6 に示す。工具被覆物質による摩擦係数の変化はほとんどみられない。

熱間加工では酸化膜が付着した試験片の方が、酸化膜がほとんど付着していない試験片に比べて摩擦係数は低い。炭素鋼の酸化膜は摩擦を低くすることが分かる。したがって炭素鋼の熱間加工では酸化膜を利用することで、潤滑剤を用いない無潤滑加工が可能であると考えられる。

一方、冷間加工では酸化膜が付着していない試験片は摩

擦係数 $\mu =$ 約 0.10 と低い。酸化膜が付着した試験片は非常に薄い酸化膜が付着したもので $\mu =$ 約 0.18、厚さ 0.10mm の酸化膜が付着したもので $\mu =$ 約 0.25 と非常に摩擦が高くなる。室温の加工では、酸化膜自体の摩擦が測定されたものと考えられる。切削加工では、工具面が絶えず素材の新

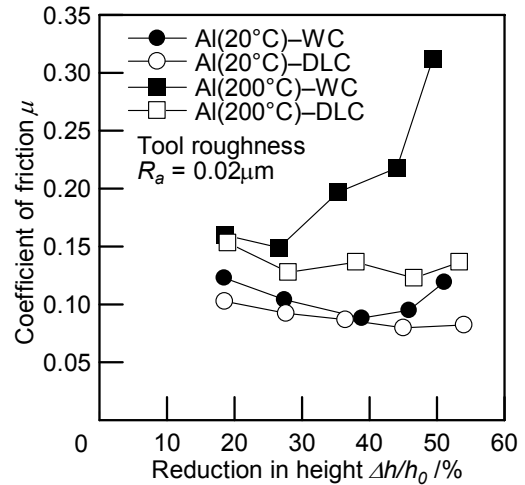


Fig. 4 Effect of reduction in height on coefficient of friction for aluminum billet sliding over WC tool and DLC coating

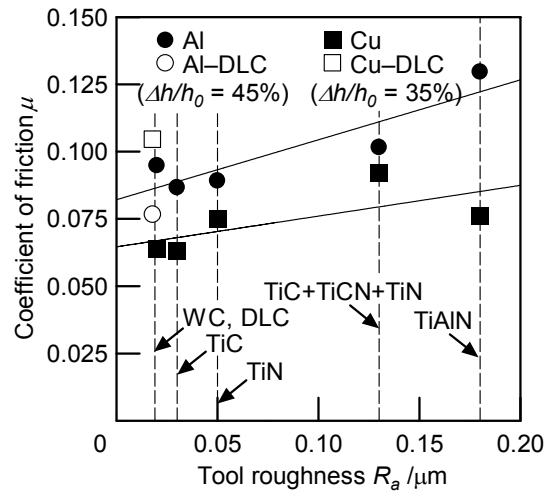


Fig. 5 Effect of tool roughness on coefficient of friction at room temperature

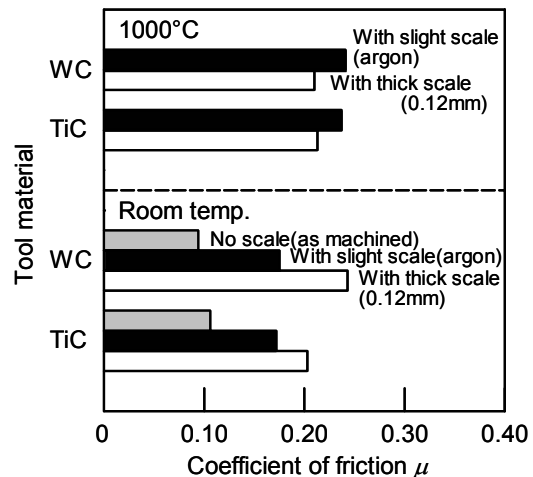


Fig. 6 Effect of oxide layer on 0.45% carbon steel billet surface at 1000°C and room temperature

生面に接触しており酸化膜の影響がないため、摩擦が小さくドライカッティングが可能であると考えられる。一方、塑性加工では素材-工具接触面は新生面ではなく酸化物などの不純物が付着しており、これらが摩擦を大きくするものと考えられる。したがって、冷間の塑性加工では加工前にビレットに付着した酸化物等の不純物を取除くことが必要である。

4. ミスト微量潤滑すえ込み加工

4.1 ミスト状潤滑油の噴霧

潤滑油の工具表面への噴霧には、切削加工用の市販ミスト供給装置（田中インポートグループ社製）を機械プレスに取付けて用いた（Fig. 7）。潤滑油供給量を1.6ml/h、圧縮空気の供給圧力を0.1MPaとし、潤滑油は鉱油系潤滑油（鉱油：70wt%，アルコール（炭素数12および13）：30wt%，動粘度27.7 mm²/s（40°C），密度 $\rho=885\text{kg/m}^3$ ）を用いた。ただし、ノズル先端から供給される潤滑油のほとんどは超硬工具表面全体（直径60mm）に噴霧された。一般に鍛造加工では5~40g/m²程度の潤滑油が塗布されるが、ミスト供給装置を用いることにより、0.1g/m²程度の潤滑油の噴霧が可能である。

Fig. 8に噴霧時間と工具表面に付着するミスト状潤滑油量および付着面積割合の関係を示す。ただし、潤滑油の工具表面への付着量は噴霧前後の重量差から、工具表面上での付着面積は工具表面に固定した青色BTB試験紙に酸性

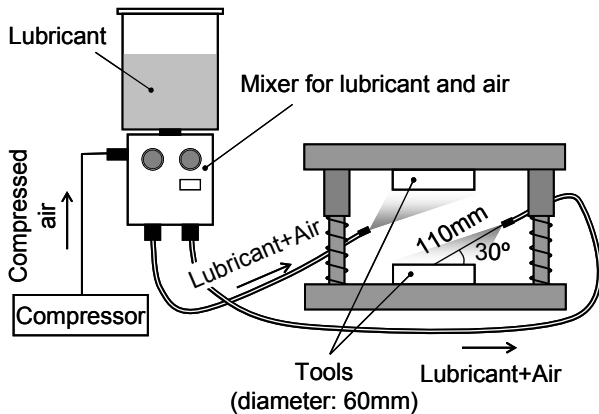


Fig. 7 Apparatus for mist lubricant spraying system

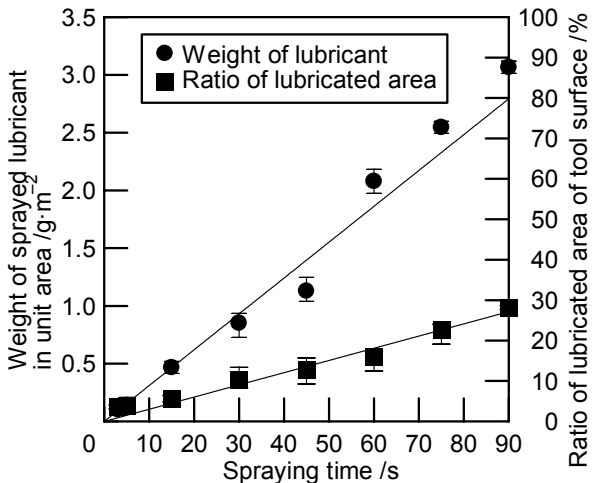


Fig. 8 Relationship between weight of sprayed lubricant on tool surface and spraying time

潤滑油を噴霧し、潤滑油が付着した部分のみを黄色に変色させて、画像処理を行った。本研究では、潤滑油の噴霧時間を0~75秒間（0~2.55g/m²）で8段階に調整して、リング圧縮試験を行った。したがって、ミスト状潤滑油の工具表面での付着面積割合は最大約25%であり、工具表面の大部分には潤滑油が付着していない状態である。

4.2 ミスト微量潤滑でのリング圧縮試験結果

アルミニウム試験片（A1050）を用いて室温および加熱状態でリング圧縮試験を行った。Fig. 9に工具表面に噴霧された潤滑油が摩擦におよぼす影響を示す。無潤滑では摩擦係数は室温で $\mu=0.14\sim0.23$ 、200°Cで $\mu=0.20$ 以上であるが、潤滑油を0.5g/m²程度噴霧することで、200°Cでは、 $\mu=0.10$ 以下にまで下げることができる。さらに潤滑油を0.5g/m²以上噴霧した場合、加工温度、圧縮率にかかわらず摩擦係数は $\mu=0.08$ 程度となり、極微量の潤滑油を噴霧することで摩擦を大きく低減できることが分かる。

4.3 薄膜潤滑における摩擦測定

極微量ミスト潤滑では、ミスト状潤滑油の付着部分がわずかであり、工具表面のほとんどは未付着（無潤滑）部分である。したがって、試験片表面においては、潤滑される部分と無潤滑の部分がある。そこでミスト微量潤滑と比較するため、工具表面に均一な潤滑油膜を塗布した場合の摩擦を測定した。

潤滑油の塗布方法は潤滑油をベンジンで100倍程度に希釈し、工具表面にピペットで潤滑油のベンジン溶液を滴下することにより、潤滑油を工具全面に均一に広げることができる。潤滑油の滴下量はミスト微量潤滑時と同程度にし、潤滑膜厚を $t=0.25\sim2.0\mu\text{m}$ に調整した。

ミスト微量潤滑で用いた鉱油系潤滑油を薄膜状に工具表面に塗布して、リング圧縮試験を行った。アルミニウム試験片を室温および200°Cにした場合の摩擦係数をFig. 10に示す。ミスト微量潤滑と同様、潤滑油の塗布量が0.5g/m²以下で摩擦係数は急上昇する。実加工では、0.5 μm 以下の潤滑薄膜を工具上に均一に塗布することは困難であるが、ミスト微量潤滑は潤滑量を制御しやすく、実加工に適した塗布方法と考えられる。

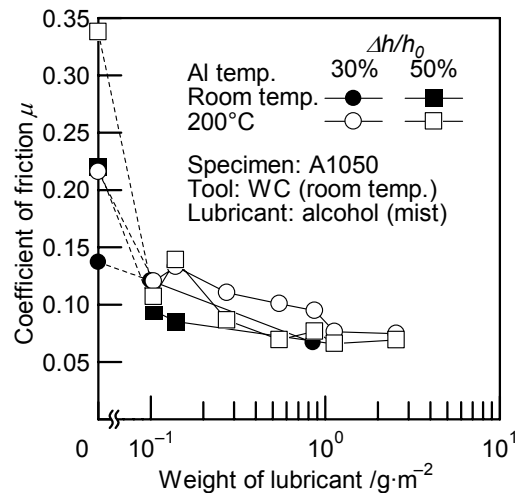


Fig. 9 Effect of weight of sprayed lubricant on coefficient of friction in ring compression test of aluminum billet at room temperature and 200°C

4.3 ミスト状潤滑油の潤滑機構

Fig. 11 に室温でのミスト微量潤滑と薄膜潤滑におけるリング圧縮試験前後のアルミニウム試験片の圧縮面での半径方向の表面プロファイルを示す. ただし, 圧縮前の試験片表面は旋削仕上げした. また, ミスト微量潤滑, 薄膜潤滑ともに平均潤滑膜厚を $t = 1.0\mu\text{m}$ とし, ミスト微量潤滑では付着面積割合が約 10% で, 工具表面のほとんどが潤滑油が付着していない状態である. すべての圧縮率で無潤滑の場合よりも潤滑を行った場合の方が, 圧縮後の試験片圧縮面の表面粗さは大きくなった. 圧縮率 $\Delta h/h_0 = 10\%$ (最大面圧: 約 95MPa) では, ミスト微量潤滑に比べて薄膜潤滑で圧縮された試験片表面の方が, 表面粗さは大きい. また摩擦係数はミスト微量潤滑では $\mu = 0.10$, 薄膜潤滑では $\mu = 0.069$ である. これより薄膜潤滑では工具表面全体に潤滑油があり, 工具-試験片間で潤滑油が均一に閉じ込められたが, ミスト微量潤滑では圧縮中にミスト状潤滑油が工具-試験片間で接触面全体に押し広げられなかったことが分かる.

$\Delta h/h_0 = 30, 50\%$ (最大面圧: 約 110, 130MPa) では, ミスト微量潤滑の方が薄膜潤滑よりも表面粗さは大きい, ミスト微量潤滑と薄膜潤滑で表面凹凸の形状, 摩擦係数に大きな違いはみられない. 圧縮中にミスト状潤滑油が工具

試験片間で接触面全体に押し広げられ, 膜厚は均一ではないが, 薄膜になったと考えられる. ミスト微量潤滑の方が表面粗さが大きいのは, 押し広げられたミスト状潤滑油の膜厚が不均一であることに起因すると考えられる.

以上より, ミスト微量潤滑では面圧が低い場合, ミスト状潤滑油が試験片表面の凹凸に閉じ込められることで, 潤滑効果が得られる. 一方, 面圧が高くなるにつれて, ミスト状潤滑油は試験片圧縮中に工具-試験片間で押し広げられ, 膜厚 $1\mu\text{m}$ 以下の薄膜になると考えられる.

4.4 表面被覆工具の効果

表面被覆工具を用いて, 極微量潤滑での摩擦を測定する. 表面被覆工具は TiAlN 被覆工具, DLC 被覆工具を用いる. 表面粗さはともに $R_a = 0.02\mu\text{m}$ である. 一方, 潤滑油は鉱油系潤滑油を用いて, 工具表面にミスト状に噴霧した. 200°C に加熱したアルミニウム合金の圧縮率 $\Delta h/h_0 = 50\%$ でのリング圧縮試験の結果を Fig. 12 に示す. 平均潤滑膜厚 $t = 0.2\mu\text{m}$ 以上では, 工具表面処理による摩擦係数の違いはほとんどみられない. 微量潤滑加工では試験片は工具表面に直接接せず, 潤滑油と接触するため, 表面被覆工具による摩擦低減は生じなかったものと考えられる. 一方, 無潤滑加工での DLC 被覆工具の使用は, 膜厚 $t = 0.25 \sim 0.50\mu\text{m}$ の潤滑油と同等の効果があることが分かる.

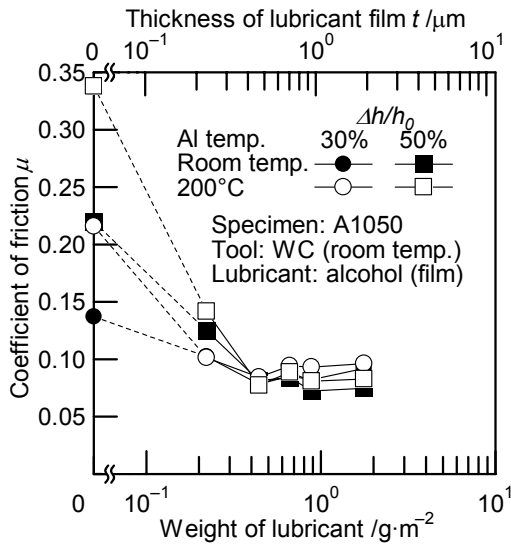


Fig. 10 Measured coefficients of friction for aluminum billet with thin lubricant film

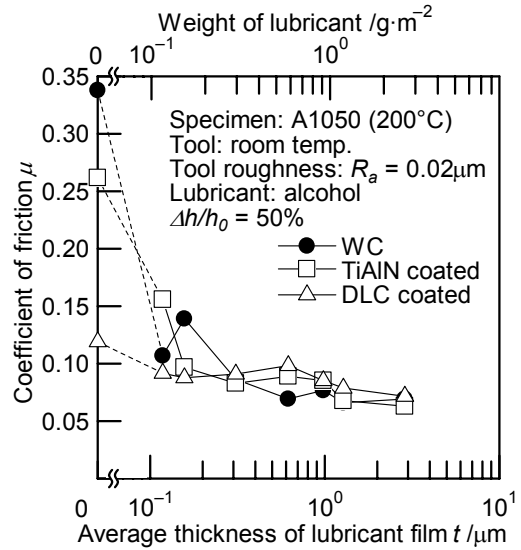


Fig. 12 Effect of tool coating material on coefficient of friction under mist lubrication

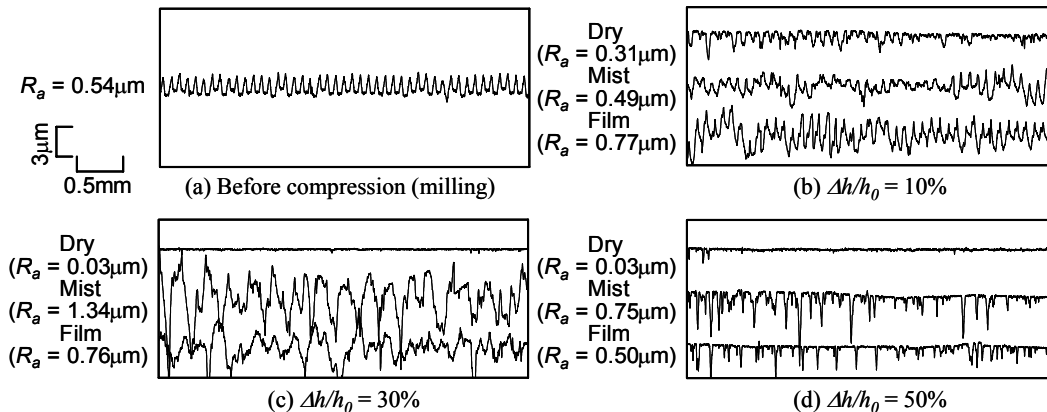


Fig. 11 Surface profiles of aluminum billet surface after compression with flat WC tools at room temperature (thickness of lubricant film $t = 1.0\mu\text{m}$)

5. 実用化への検討

以上の結果から、無潤滑加工では鏡面仕上げした表面被覆工具を用いることで、特に DLC 被覆工具はアルミニウム合金の加工において摩擦を小さくすることが分かった。またミスト微量潤滑加工はアルミニウム合金のすえ込み加工では $0.5\text{g}/\text{m}^2$ 程度の潤滑油を供給により、摩擦係数を 0.1 程度に下げ、表面粗度の良い加工表面を得られることが分かった。しかしながら、本研究で摩擦試験として行ったリング圧縮試験は試験片—工具間でのすべりが小さいため、型鍛造などの摩擦状態が厳しい加工に本研究の結果を直接適用することは困難である。一方、ミスト状潤滑油の噴霧については、複雑な形状をした金型や円筒内部等への噴霧方法や広い面積へ噴霧可能な噴霧方法などの開発が実加工への課題であり、ノズル先端部の改良、複数のノズルの使用等が必要と考えられる。

したがって、本研究の結果はすえ込み加工やサイジング加工などの摩擦状態が厳しくない加工や仕上げ加工あるいは局所的な変形を与える引抜き加工、圧延加工に適用できるものと考えられる。

6. マグネシウム合金の無潤滑摩擦特性

6.1 まえがき

マグネシウムは実用金属材料中、最軽量、高比強度であり、切削性や振動吸収性、放熱性、電磁波シールド性等に優れた特性を持つ。リサイクル性も良いことから、環境負荷の小さい金属材料として注目されている。

現在、マグネシウム合金を使用した大量生産製品の製造は、主にダイカストやチクソモルディングによって行われているが、これらでは生産性や鑄造欠陥が問題である。そこで生産性の向上、環境負荷の低減のため、マグネシウム合金の精密鍛造の開発に期待がよせられているが、加工特性に大きな影響を与える摩擦特性についてはほとんど調べられていない。

本節では、マグネシウム合金の無潤滑および微量潤滑における摩擦特性を、すべり試験、リング圧縮試験を行い、工具材質、酸化物が摩擦におよぼす影響について調べる。

6.2 すべり試験

旋盤を用いて、Fig. 13 に示すようなすべり試験を行った。試験片、動力計を送り台に、工具をチャック部に取付け、工具すべり面と動力計が直角になるようにした。試験片は先端を円錐状に旋削加工し、旋盤に取付けた工具に 100N の力で押付けた。工具を回転させた際に試験片にかかる摩擦力 F と押付け力 N から摩擦係数 μ を、

$$\mu = F/N$$

と求めた。接触部の試験片直径は約 1.0mm であり、試験の前後で変化しないことを確認した。また試験時間は約 150 秒で、すべり速度は $V_s = 115\text{mm}/\text{s}$ 一定である。

試験片はマグネシウム合金 ZK60 の押し出し棒材を用いた。試験片の機械的性質は、引張り強さ 330MPa、耐力 280MPa、伸び 15% である。工具は第 2 節に示したものを使用した。

6.3 すべり試験結果

表面被覆工具を用いた場合の、ZK60 合金の室温におけるすべり距離による摩擦係数の変化を Fig. 14 に示す。ただ

し、ZK60 試験片はすべり距離 15m で約 120 回、工具表面を回転する。すべり初期は試験片—工具間に凝着物がないため、いずれの工具においても摩擦係数は $\mu = 0.10$ 程度と小さく、すべり距離の増加につれて、超硬工具、TiC+TiCN+TiN 被覆工具では、摩擦係数は $\mu = 0.30$ 程度と非常に大きくなる。一方、DLC 被覆工具では摩擦係数 μ は約 0.10 と一定で、他の工具に比べて小さい。試験後の工具表面粗さを Fig. 15 に示す。超硬工具、TiC+TiCN+TiN 被覆工具ではマグネシウム合金が凝着しており、凝着部分では表面粗さが非常に大きい。このため、すべり距離の増加とともに、摩擦係数が非常に大きくなると考えられる。ただし、超硬工具と TiC+TiCN+TiN 被覆工具では、超硬工具の方が早くマグネシウム合金の凝着が始まった。一方、DLC 被覆工具ではマグネシウム合金の凝着はほとんどみられず、その結果、摩擦係数は 0.1 程度で一定であったと考えられる。以上より、マグネシウム合金の塑性加工において、金型への DLC 被膜の適用は摩擦を小さくし、非常に大きな効果が期待できる。

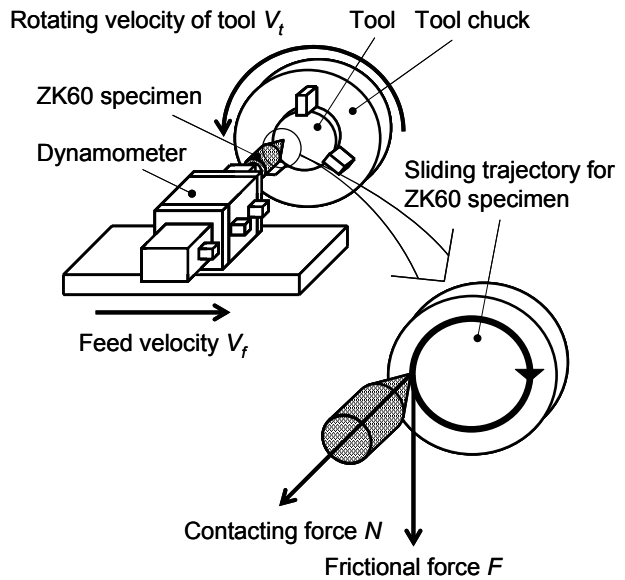


Fig. 13 Sliding test on lathe

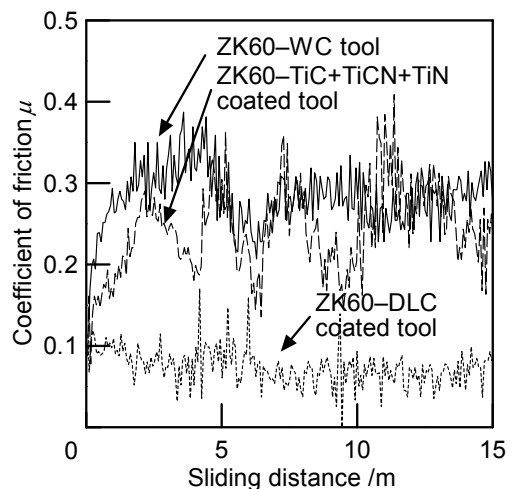


Fig. 14 Change of coefficients of friction for ZK60 with sliding distance for WC and coated surfaces ($R_a = 0.02\mu\text{m}$)

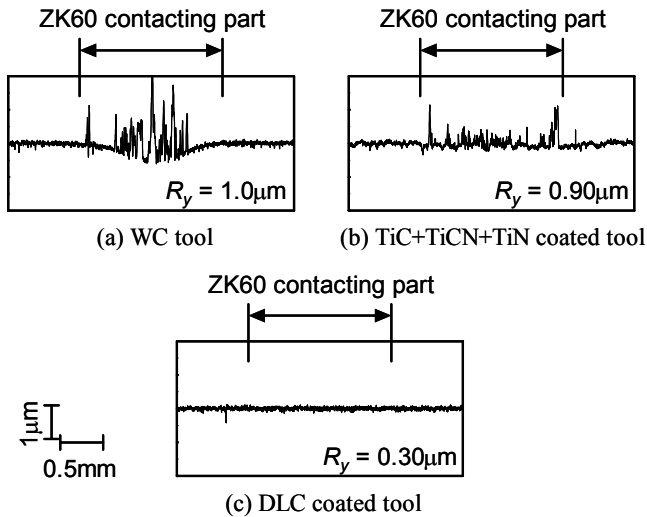


Fig. 15 Tool surface profiles contacting part after concentric sliding test of ZK60 at room temperature (initial tool surface $R_y = 0.30\mu\text{m}$)

6.4 無潤滑温間鍛造における摩擦測定

鍛造加工におけるマグネシウム合金の摩擦特性を調べるために、リング圧縮試験を行った。試験片はZK60合金、工具は第2節に示したものをを用いた。ただし、DLC被覆工具はPVD法により膜厚 $1.0\mu\text{m}$ に被膜処理されたものを使用した。

Fig. 16にリング圧縮試験の結果を示す。加工温度 $250\sim 300^\circ\text{C}$ では、摩擦係数は $\mu = \text{約} 0.25\sim 0.35$ と大きい。また酸化物を十分に付着させた試験片では摩擦係数は非常に大きくなる。ただし、試験片はあらかじめ炉内で、 450°C 、約9時間加熱し、酸化物を付着させた。ブレーキの摩擦材に酸化マグネシウムが摩擦摩耗調整剤として利用されていることから、酸化物が摩擦増加につながる一因子とみなすことができる。

次にマグネシウム合金の無潤滑温間鍛造において、コーティッド工具の適用を考える。すべり試験で、DLC被膜が凝着を防ぐ効果があることが分かった。コーティッド工具の利用に際しては、工具加熱による被膜の耐久性と加工面圧に対する被膜強度が問題である。そこで、工具を 100°C 、ZK60合金を 300°C でリング圧縮試験を行った。Fig. 17に実験結果を示す。いずれの圧縮率においても、DLC被覆工具を用いることで摩擦を小さくすることができる。しかし圧縮率 $\Delta h/h_0 = 60\%$ （最大面圧：約 380MPa ）では、試験片接触部でDLC被膜のはく離が生じるため、加工面圧には細心の注意が必要である。

7. まとめ

本研究では、塑性加工の無潤滑化および微量潤滑化を実用化するために、硬質膜を被膜処理した塑性加工工具による無潤滑塑性加工、極微量の潤滑油をミスト状態にして供給する極微量潤滑塑性加工における摩擦基礎特性について調べた。また環境荷重が小さいマグネシウム合金の無潤滑摩擦を測定した。得られた結果を以下にまとめる。

1) アルミニウム合金の無潤滑加工においてDLC被覆工具の使用により摩擦係数を低くできる。

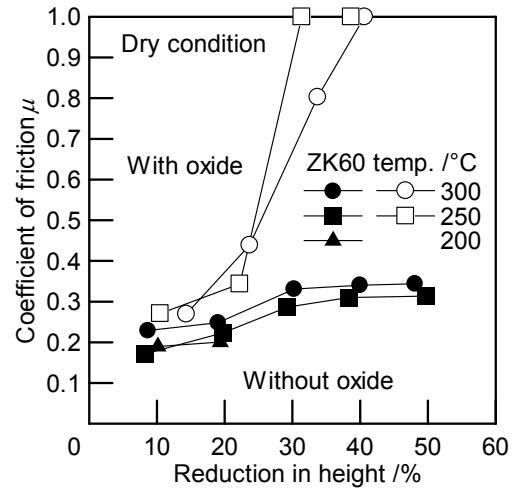


Fig. 16 Effect of oxide layer of ZK60 on friction under dry condition at temperatures from 200°C to 300°C

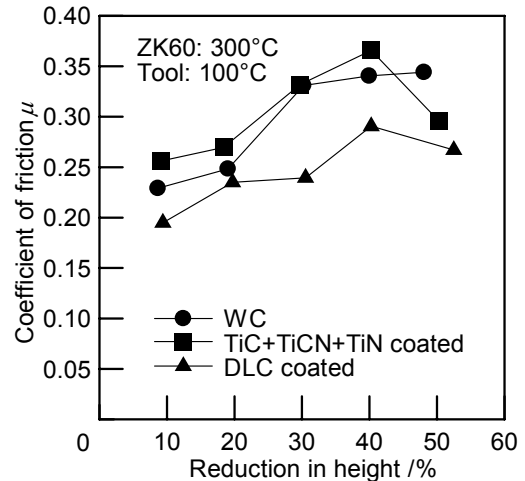


Fig. 17 Effect of tool coating material on friction in ring compression

- 2) 無潤滑加工では、摩擦係数は工具表面粗さにより大きな影響を受ける。無潤滑加工では、冷間加工工具は被膜処理後に鏡面仕上げにし、できるだけ工具表面粗さを小さくすることが重要である。
- 3) アルミニウム合金の微量潤滑すえ込み加工では、 $0.5\text{g}/\text{m}^2$ 程度の潤滑油を供給することにより、無潤滑加工に比べて摩擦係数や加工荷重を約50%低くすることができる。
- 4) 極微量ミスト潤滑では、試験片圧縮前の工具表面のほとんどは潤滑油が未付着（無潤滑）状態である。しかし、試験片圧縮中に工具-試験片間で潤滑油が押し広げられ薄膜状態となり、潤滑油を薄膜状に塗布した場合と同様の潤滑効果が得られる。
- 5) マグネシウム合金の無潤滑加工では、DLC被覆工具を用いることで、凝着を防ぎ、摩擦係数を小さくできる。
- 6) 室温でのすべり試験では、摩擦係数は $\mu = 0.10\sim 0.15$ 、 $200\sim 300^\circ\text{C}$ でのリング圧縮試験では、摩擦係数は $\mu = 0.20\sim 0.35$ となる。両試験法で摩擦係数が大きく異なるが、試験温度の違いや両試験法での摩擦機構の違いが原因と考えられる。