

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月31日現在

機関番号：17701
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22560116
 研究課題名(和文) 塑性加工工具表面テクスチャを有効に活用するための各種潤滑剤の性能評価
 研究課題名(英文) Evaluation of lubrication performance for some lubricants aimed for effective use of tool surface texture in metal forming
 研究代表者
 上谷 俊平(KAMITANI SHUNPEI)
 鹿児島大学・大学院理工学研究科・准教授
 研究者番号：40204622

研究成果の概要(和文)：塑性加工において、工具表面に設けた表面テクスチャ(微細ピット、微細溝列)を利用する場合に、表面テクスチャが潤滑面にどのような影響を及ぼすかを平面ひずみ押し加工実験と平面ひずみ後方押し鍛造実験で明らかにした。塑性加工における潤滑性の向上や表面品質の向上の目的で工具や被加工材表面に微細穴加工や微細溝加工などの表面テクスチャを活用するには、潤滑油の選択が重要であることを実験的に明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文)：The effects of some surface textures, such as micro pits and micro groove arrays, formed on the tool surface were examined by carrying out plane strain extrusion and plane strain multi-gate backward, for improvement of the product quality and reduction of the frictional constraint between the tool and the workpiece. The selection of lubricant is important for the utility of the tool with surface texture, such as micro pits and micro groove arrays.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2010年度 | 2,800,000 | 840,000 | 3,640,000 |
| 2011年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 2012年度 | 300,000 | 90,000 | 390,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,600,000 | 1,080,000 | 4,680,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：塑性加工、アルミニウム、表面テクスチャ、潤滑油、押し加工、鍛造

1. 研究開始当初の背景

塑性加工における潤滑技術は、製品表面品質や製品加工限界の向上、加工動力の低減、金型寿命の延長へと貢献するものである。このことは生産性の向上に貢献するばかりかエネルギーや材料の消費を削減し、環境保全、

地球温暖化防止へ寄与している。近年、塑性加工における潤滑性の向上や表面品質の向上の目的で、工具や被加工材表面に微細穴加工などの表面テクスチャを活用する技術が検討され、摩擦力や、表面性状、加工能力への影響が明らかにされてきている。また、

計算シミュレーション技術の発展に伴い、製品設計・評価まで計算機上で行っていく方向に進んでいるが、この取り組みにおいても、数値シミュレーション技術の進展には、実材料の変形特性値と加工表面における摩擦特性（摩擦係数）の正確な把握と適正な使用が必要とされているがそのデータ活用は十分な段階ではない。さらに、環境問題にからみ、摩擦面での無潤滑化（ドライ加工）や生分解性にすぐれた植物油の活用などの取り組みも検討されている。これらの取り組みにおいて、潤滑技術の発展は重要な鍵となっており、金型表面—潤滑剤—加工材表面間の現象を把握し、有効に活用していく手法の確立が求められている。

国内外でも、工具や被加工材表面に微細加工を施して、加工面平滑化、油膜保持、加工限界の向上、摩擦低減などへの取り組みが行われてきている。国内では、被加工材表面に加工された凹部に導入された潤滑油が材料の塑性変形と工具面の拘束によって加工中に流出する潤滑機構を利用して製品平滑面に仕上げる技術や潤滑機構の解明が、引き抜き加工、しごき加工等の加工分野で発展している。欧米においても、プレス加工や、鍛造や圧延ロール表面に微細加工した場合の摩擦低減等の研究が進められている。また、欧州を中心に、地球温暖化や生分解性などの環境問題の観点から、鉱油から植物油や植物油ベースのグリースなどへの置き換えとそのための研究開発が行われている。

研究代表者らは、これまでに、工具接触面潤滑条件（潤滑油粘度や塗布量）の違いが、塑性流動の違いとして明確に現れる形状の金型からなる、片側平面押し加工装置を試作し、アルミニウムを加工材として、一連の潤滑特性評価に関する検討を行ってきた。また、同実験方法で、植物油であるパーム油と鉱油の比較実験を実施してきた。また、工具表面テクスチャに関する研究では、工具表面に微細ピット加工を施した平面工具を用いて、アルミニウムとアルミニウム合金を加工材として平面ひずみ押し加工実験を行い、アルミニウム合金においては微細ピットとパーム油の組合せで荷重低減効果が生じることを明らかにした。また、平面工具に微細溝列を設けた平面ひずみ押し加工実験で、広い粘度範囲で加工表面の平滑加工が可能となることを報告している。これらの技術が実用化されると動力の削減や金型寿命の延長、工程の削減などの効果が得られると考えられる。

2. 研究の目的

塑性加工における潤滑技術は、製品の表面品質（硬度やなめらかさ）や製品加工限界の向上、加工動力の低減（エネルギー削減）、

金型寿命の延長（金型経費の削減）へと貢献するものである。

塑性加工における潤滑性の向上や表面品質の向上の目的で工具や被加工材表面に微細穴加工や微細溝加工などの表面テクスチャを活用する技術において、表面テクスチャを有効に活用するためにはどのような潤滑剤を使用するか、すなわち潤滑剤の選択が非常に重要となる。

本研究では、平面ひずみ押し加工実験を利用して、(1)微細穴加工や微細溝加工を施した工具面の摩擦係数の測定や摩擦面の観察、加工材の摩擦面近傍及び変形領域全体における塑性流れ解析（格子線解析によるひずみ分布の算定や硬さ分布の測定）により、(2)各種潤滑剤の性能評価を行い、(3)各表面テクスチャに対して有効に作用する潤滑剤ではどのような特性が寄与しているか、またそのときの潤滑機構はどうなっているかを明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

塑性加工における金型表面—潤滑剤—加工材表面間の現象を、実際の加工で有効に活用していくためには、工具や加工材における表面テクスチャの影響を調べ、それぞれの条件にあった潤滑方法や潤滑剤の適切な選択が必要である。本研究では、冷間平面ひずみ押し加工実験および冷間平面ひずみ後押し加工実験を実施し、微細穴加工や微細溝加工を施した工具を使用した場合の、工具面と加工材表面の観察、加工材の摩擦面近傍及び変形領域全体における塑性流れ解析（格子線解析によるひずみ分布の算定や硬さ分布の測定）により、各種潤滑剤の性能評価を行った。その評価方法として、以下の5つの方法により検討を行った。

(1) 微細溝列工具による製品表面平滑加工の加工表面性状と塑性流動の評価

平面工具（溝なし平面工具）と微細溝列を施した平面工具を使用して冷間平面ひずみ押し加工実験を実施し、微細溝列工具による製品表面平滑化への潤滑剤の粘度の影響を溝なし平面工具を使用した場合の結果と比較し、加工材の変形領域全体におけるひずみ分布の算定や製品部の硬さ分布の測定による評価を行った。

①実験装置

本研究で使用した平面ひずみ押し加工試験装置はダイス半角 45° のテーパダイと平面工具（試験面）で金型部を構成している。金型開口部は押し比2である。平面工具表面に微細溝列を設けた溝列平面工具は、溝列が頂角 60° のV字溝を平面工具の金型内部（塑性変形領域部分）試験面に押し出し方向に直交する方向へ3本平行に配置している。

試験片は、2枚合わせて使用した。押し

方向に平行な面で半分割の構造であり、塑性流れの観察面となる分割面（合わせ面）の一方にはV字溝による正方格子模様をけがき加工してある。実験後、ビレットの格子模様のゆがみから格子線解析により金型内部塑性変形領域の変形機構を調べた。

②実験条件

加工材に純アルミニウム A1050 材を使用し、試験用潤滑油には粘度の異なるパラフィン系無添加鉱油 VG32 と VG460 の 2 種類を使用した。

ほぼ同じ加工表面性状ではあるが平面工具面摩擦拘束状態の違いが塑性流れに及ぼす影響を検討するために、平面工具表面に微細溝列を設けた溝列平面工具を使用した場合の塑性流れについても検討を行った。溝列は頂角 60° の V 字溝を押し出し方向に直交する方向へ金型出口部から内部方向へ 6.5mm（深さ 0.06mm）、7.5mm（深さ 0.08mm）、8.5mm（深さ 0.10mm）の位置に 3 本平行に配置した。微細溝列は、初回の加工初期段階にアルミニウム流入が生じるが、その後は流入が生ぜず安定した溝形状を保つ。今回の解析では、安定した溝列形状で行った実験結果を使用した。金型内部潤滑条件の設定は、試験面については、試験用潤滑油の初期塗布量を塗布質量で 5mg ($0.48\text{mg}/\text{cm}^2$) とした。試験面以外の被加工材との接触面については、パラフィン系無添加鉱油 VG460 を毎回ほぼ同量となるよう塗布した。実験は室温にて実施した。

③実験方法

30 トン複動油圧プレスを使用して、平面ひずみ冷間押し出し加工実験を行った。押し出し速度が一定となり材料の変形が定常状態となったとき、加工を停止して試験片を取り出した。押し出し加工実験中の押し出し荷重、プレスラム変位を荷重変換器、変位センサにて測定し、動ひずみ増幅器で増幅後、アナライジングレコーダーで記録した。実験終了後に試験片をコンテナから取り出して、分割面の格子線模様を写真撮影し、この拡大図から流れ場を求め、格子線解析を行い、試験片の金型内変形領域における相当ひずみ分布を算出して工具摩擦面の影響が塑性流れに及ぼす影響について検討を行った。また、金型出口部分ビレット内部の硬さを測定して、相当ひずみ分布との関連を調べた。

(2) 平面ひずみ押し出し加工タイプの摩擦測定装置の改良と摩擦係数の測定

平面ひずみ押し出し加工タイプ試験装置による冷間押し出し加工実験により、金型変形領域内工具面での摩擦係数の測定を行った。

①実験装置

(1) で使用した平面ひずみ押し出し加工タイプの試験装置を使用した。ここでは、平面工具部に、圧縮力の測定から摩擦係数を算出できる構造をもつ摩擦測定部を設けている。

摩擦力測定部は、平面工具試験面上のビレット変形領域内に設置し、ひずみゲージで圧縮力を計測することにより、摩擦係数の算出を行う。摩擦係数を算出するために、角度の異なる 2 種類の平面工具を金型内に組み込んで使用した。

②実験条件

金型内部の潤滑条件は、試験面（平面工具部）については、試験油の初期塗布油量を塗布質量で 15mg ($1.4\text{mg}/\text{cm}^2$) とした。試験油には、低粘度から高粘度まで数種類の粘度の異なるパラフィン系無添加鉱油とナフテン系無添加鉱油を使用した。試験面以外のビレットとの接触面については、パラフィン系無添加鉱油 VG460 を毎回ほぼ同量となるよう塗布した。被加工材試験片（ビレット）には工業用純アルミニウム A1050（JIS）の焼なまし材を使用した。実験は室温にて実施した。

③実験方法

実験は、(1) と同様の方法で実施したが、加えて、押し出し加工実験中に摩擦力測定部にかかる圧縮力をひずみゲージにより測定し、動ひずみ増幅器で増幅後、アナライジングレコーダーで記録した。実験終了後に試験片をコンテナから取り出して、摩擦力測定面の潤滑状態の妥当性について、ビレット試験面の表面観察により確認した。

(3) 平面工具に微細ピットを設けた場合と設けない場合について、製品流出方向（製品曲がり量）と被加工材の塑性流れの評価

潤滑油粘度と潤滑油の種類、工具（平面工具に微細ピットを設けた場合と設けない場合）の組み合わせで製品流出方向（製品曲がり量）の比較検討を行った。

①実験装置

ダイスとコンテナは一体で、平面工具（試験面）とダイス半角 90° の平面ダイス共に分割構造になっている平面ひずみ押し出し加工タイプの試験装置を使用した。金型開口部は押し出し比 2 に設定した。

被加工材試験片（ビレット）には工業用純アルミニウム A1050 材と Al-Mg 合金 A5052（JIS）の焼なまし材を使用した。ここで、一部の試験片は格子線解析により金型内の変形機構を調べるために押し出し方向に平行な面で半分割の構造とし、塑性流れの観察面となる分割面の一方には 1mm 間隔で幅 0.1mm、深さ 0.07mm の V 字溝による正方格子模様をけがき加工した。

②実験条件

平面工具面に施した微細ピットが塑性流れに及ぼす影響を確認するために、ピットなし平面工具とピットあり平面工具を用いた押し出し加工実験を行った。ピットあり平面工具には、平面工具の加工品出口付近の変形領域部に、マイクロビッカース硬さ試験機で正 4 角すいピットを成形加工して千鳥状に配置した。ピット配置部におけるピット面積率

(ピット総面積/ピット配置部総面積)は、約12%になる。

試験用潤滑油には、粘度の異なるナフテン系無添加鉱油を使用した。

金型内部の潤滑条件は、試験用潤滑油の初期塗布油量を塗布質量で15mgとした。試験面以外の被加工材との接触面については、パラフィン系無添加鉱油VG460を毎回ほぼ同量となるよう塗布した。実験は室温にて実施した。

③実験・解析方法

実験は、(1)と同様の方法で行った。実験終了後に試験片をコンテナから取り出して、製品部の曲がり量を計測した。また、分割面の格子模様を写真撮影し、この拡大図から流れ場を求め、格子線解析を行い、試験片の金型内変形領域における速度分布、相当ひずみ分布を算出した。

(4) 工具表面に設けた微細溝列を使用した押出し加工実験における表面平滑化への潤滑剤種類の影響

工具表面に設けた微細溝列を使用して押出し加工実験を実施し、表面平滑化への潤滑剤種類の影響を検討した。

①実験装置

(1) で使用した平面ひずみ押出し加工タイプの試験装置を使用した。ビレットには工業用純アルミニウム A1050 (JIS、金型開口部は押出比2) の焼なまし材を使用した。

②実験条件

実験では、製品表面平滑化に及ぼす潤滑油の種類の影響を検討した。溝なし平面工具1種類と溝列本数を3本設けた溝列平面工具を準備した。

金型内潤滑条件(試験面)は、試験油の初期塗布油量を塗布質量で5mg(0.48mg/cm²)とした。試験油には、粘度がほぼ同等の5種類の潤滑油、ポリオールエステル POE (VG68)、市販冷間鍛造用潤滑油 UPT (VG68)、流動パラフィン L3 (VG83)、ナフテン系無添加鉱油 N2 (VG22)、パラフィン系無添加鉱油 P2 (VG32) を使用した。試験面以外のビレットとの接触面については、パラフィン系無添加鉱油 VG460 を毎回ほぼ同量となるよう塗布した。実験は室温にて実施した。

③実験・解析方法

実験は、(1)と同様の方法で行った。実験終了後にビレットをコンテナから取り出して、表面観察と表面粗さの測定を行い、製品表面性状の検討を行った。溝列工具については、同一工具で2回実験を行った。

(5) 平面ひずみ後方押出し鍛造試験による工具表面に設けた微細溝列と微細ピット模様が加工状態に及ぼす影響

平面ひずみ後方押出し鍛造試験装置による冷間鍛造実験において、工具表面に設けた微細溝列と微細ピット模様が加工状態に及ぼす影響を検討した。

① 実験装置

平面ひずみ後方押出し加工タイプの試験装置を使用した。金型部は、パンチホルダー、パンチ、被加工材試験片、アンビル、ダイスで構成される。押出し比は2に設定した。

被加工材試験片(ビレット)には工業用純アルミニウム A1050 の焼なまし材を使用した。試験片は、実験後、ビレットの格子模様のゆがみから格子線解析により金型内部塑性変形領域の変形機構を調べるため、2枚合わせて使用した。押出し方向に平行な面で半分分割の構造であり、塑性流れの観察面となる分割面(合わせ面)の一方には1mm間隔で幅0.08mm、深さ0.08mmのV字溝による正方格子模様をけがき加工してある。

② 実験条件

実験では、パンチ先端の先端面形状が平坦面となるパンチ(パンチ①)と先端面角部に面取りを施した平坦面をもつパンチ(パンチ②)について、パンチ側面部に溝列加工とピット模様加工を施したもの、何も加工を施さなかったものを準備し、冷間平面ひずみ後方多列押出し加工実験を行った。

試験用潤滑油として市販冷間鍛造用潤滑油(VG68)を使用した。使用したパンチは3本のパンチを組み合わせた分割型で、パンチへの表面テクスチャ加工は溝列については1組3本のパンチ試験面各面に、ピットについては1組3本のうち2本のパンチ試験面3面(試験片の半分はピット付き工具、半分はピットなしの平面工具で加工)に施した。実験は室温にて実施した。

③ 実験方法

30トン複動油圧プレスにて成形加工実験を行った。後方押出し加工の非定常加工過程を格子線解析法で解析するために、それぞれのパンチについて、パンチ移動量を加工開始位置から終了位置までの間で4段階に変えた逐次加工実験を行った。押出し加工実験中の押出し荷重、プレスラム変位を荷重変換器、変位センサにて測定し、動ひずみ増幅器で増幅後、アナライジングレコーダーで記録した。実験終了後に試験片を取り出して、製品部表面の表面粗さと硬さを測定するとともに表面観察および格子線解析を行った。

4. 研究成果

3. の5つの方法により得られた研究成果を以下にあげる。

(1) 微細溝列工具による製品表面平滑加工の加工表面性状と塑性流動の評価

(主な成果) 溝列工具を使用した場合、溝なし平面工具を使用した場合と比較して、製品表面性状や塑性変形領域全体のひずみ分布に及ぼす潤滑油粘度の影響は小さいこと、表面層に加工硬化が生じ表面硬度が増すことがわかった。

(意義と展望) 製品表面平滑化は、製品の美観、表面損傷防止や表面強度特性の向上に寄与する。押し出し加工を利用した製品表面平滑化において、微細溝列工具の利用は、製品表面の平滑加工を可能とするとともに、製品表面硬度や製品内部の変形への潤滑剤の粘度の影響が小さくなることが確認できたので、使用する潤滑剤粘度の選択範囲が広がることわかった。

(2) 平面ひずみ押し出し加工タイプの摩擦測定装置の改良と摩擦係数の測定

(主な成果) 平面ひずみ押し出し加工タイプの摩擦測定装置の改良を行い、実験精度が向上した。改良した摩擦測定装置を使用して、2種類の鉱油について工具表面に微細加工を施さない場合の冷間押し出し加工実験(摩擦測定)を行い、潤滑油粘度の違いによる摩擦係数の比較を行った。

(意義と展望) 定常変形状態の摩擦係数と摩擦力測定部で実験後のビレット表面粗さとの関係を検討することにより、ビレット表面粗さが工具試験面表面粗さとほぼ同じ程度の状態になったとき、摩擦係数が大きく変化することがわかった。表面テクスチャの影響についても、接触面の状態と摩擦係数の関連性を検討していきたい。

(3) 平面工具に微細ピットを設けた場合と設けない場合について、製品流出方向(製品曲がり量)と被加工材の塑性流れの評価

(主な成果) 製品流出方向(製品曲がり量)と被加工材の塑性流れの関連性を、平面工具に微細ピットを設けた場合と設けない場合について比較検討し、潤滑油粘度と潤滑油の種類、工具の組み合わせで製品流出方向(製品曲がり量)が変化することを明らかにした。

(意義と展望) 塑性加工において、工具表面に設けた表面テクスチャ(微細ピット)を利用することにより、製品の曲がり量を変化させることができることがわかった。

(4) 工具表面に設けた微細溝列を使用した押し出し加工実験における表面平滑化への潤滑剤種類の影響

(主な成果) 流動パラフィン L3 (VG83)、ナフテン系無添加鉱油 N2 (VG22)、パラフィン系無添加鉱油 P2 (VG32) は、微細溝列を使用した押し出し加工実験で、工具表面とほぼ同程度の平滑な表面粗さの製品表面を得たが、ポリオールエステル POE (VG68) と市販冷間鍛造用潤滑油 UPT (VG68) では、比較的低粘度であるにもかかわらず表面の平滑化は達成できなかった。

(意義と展望) 塑性加工において、工具表面に設けた表面テクスチャ(微細溝列)を利用する場合に、粘度が大きく違う場合でも潤滑油の種類が異なると、微細溝列の効果が異なることを明らかにした。塑性加工における表面品質の向上の目的で工具表面に微細溝を活用する技術において、潤滑剤の組

み合わせが重要であること示すことができた。

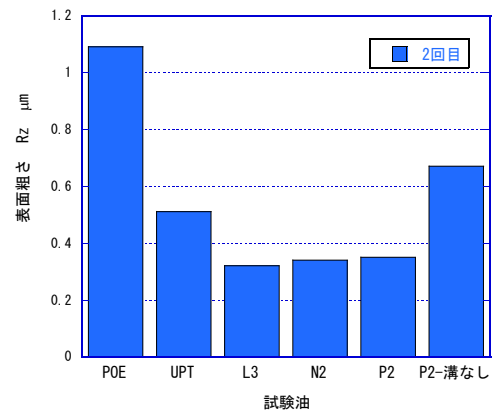


図1 製品表面粗さ Rz の比較

(5) 平面ひずみ後方押し出し鍛造試験による工具表面に設けた微細溝列と微細ピット模様加工状態に及ぼす影響

(主な成果) 平面ひずみ後方押し出し鍛造試験装置による冷間鍛造実験において、工具表面に設けた微細溝列と微細ピット模様が加工状態に及ぼす影響を検討した。微細ピット加工は加工面に潤滑油を保持し、摩擦力を低減することを明らかにした。

(意義と展望) 塑性加工において、工具表面に設けた表面テクスチャ(微細ピット、微細溝列)を利用する場合に、表面テクスチャが潤滑面にどのような影響を及ぼすかを明らかにした。塑性加工における潤滑性の向上や表面品質の向上の目的で工具や被加工材表面に微細穴加工や微細溝加工などの表面テクスチャを活用する技術において、表面テクスチャの有効性を実験的に明らかにすることができた。

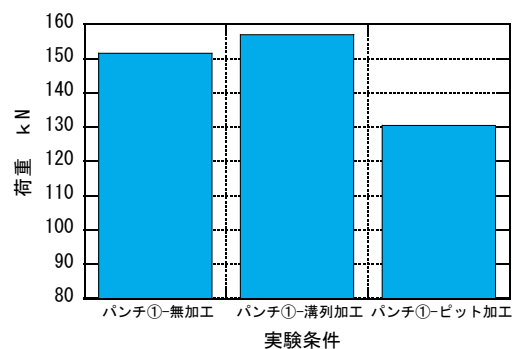


図2 加工荷重の比較

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① S. Kamitani, K. Nakanishi, Y.-M. Guo, M. Ozaki, Y. Honda, Effects of lubricat

ing oils on surface quality of aluminum product by using tool with micro groove arrays formed on its surface in cold extrusion, Proc. 10th international conference on technology of plasticity, ICTP 2011, 査読有, 2011, pp.176-181

[学会発表] (計4件)

- ① 上谷俊平、ピットを施した平面工具を用いた平面ひずみ押し加工実験による製品流出方向の検討、第62回塑性加工連合講演会、23年10月27日、ホテル日航豊橋 (愛知県豊橋市)
- ② S. Kamitani, Effects of lubricating oils on surface quality of aluminum product by using tool with micro groove arrays formed on its surface in cold extrusion, International conference on technology of plasticity, 2011年9月29日, The Eurogress Convention Center (ドイツ・アーヘン)
- ③ 上谷俊平、平面工具を用いた平面ひずみ押し加工実験による加工表面性状と塑性流動の関係、第61回塑性加工連合講演会、2010年10月15日、山形大学工学部米沢キャンパス (山形県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上谷 俊平 (KAMITANI SHUNPEI)

鹿児島大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：40204622