

冷間アルミニウム押し出し製品曲がり量のトライボロジカル制御

鹿児島大学 学術研究院理工学域工学系
教授 上谷 俊平

(平成 27 年度 一般研究開発助成 AF-2015032)

キーワード：アルミニウム，冷間押し出し，製品曲がり量

1. 研究の目的と背景

塑性加工において、工具と被加工材間に生じる摩擦をトライボロジー技術により低減させることは、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する。塑性加工における摩擦低減は、工具や被加工材表面への表面テクスチャの活用^{1)~3)}、潤滑方法の工夫、潤滑剤の開発、工具表面処理の検討、等により取り組みが行われている。これらの技術活用には、使用する潤滑剤のトライボロジー特性を考慮する必要がある、どのような潤滑剤を適材適所に使用するか、すなわち「潤滑剤の選択」は重要な鍵となるが、その選択のためのデータベースは十分とはいえない。

素材を金型内に充填して所定のダイス孔から押し出して製品を加工する押し出し加工では、押し出される製品の曲がり量をコントロールするために、ダイス形状、押し出し条件、ダイス内メタルフローの制御、ダイス出口に設けるダイベアリング部の設定等についての検討が必要である。また、押し出し製品の曲がり量は型形状や工具摩擦と関連し⁴⁾、押し出し製品の曲がり量を積極的に利用する加工法も提案⁵⁾されている。ダイスやダイベアリング部と被加工材間のトライボ条件（摩擦・潤滑条件）の把握は、高い精度の製品加工を行うためのトライボロジカル制御（摩擦や潤滑状態の制御）を行う上で重要である。

著者らは、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、潤滑面近傍の塑性流動の違いとして明確に現れる平面工具を用いた金型からなる、平面押し出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^{6),7)}や摩擦力測定⁸⁾を行ってきた。

本研究では、押し出し製品の曲がり量に及ぼす摩擦面の影響を実験的に調べることにより、押し出し加工における押し出し製品曲がり量のトライボロジカル制御に関する基礎データを得ることを目的とする。

本研究では、冷間押し出し加工における製品曲がり量に及ぼす工具摩擦面の摩擦拘束状態の影響を平面工具を用いた押し出し加工実験装置により実験的に測定する。測定と併せて、格子線解析法により被加工材の金型内部での変形機構（塑性流れ速度）を実験結果（被加工材の変形状態）から算出し、摩擦が塑性変形に及ぼす影響についても検討を行った。

2・1 実験装置

図1の平面ひずみ押し出し加工タイプの試験装置は、ダイとコンテナは一体で、平面工具（試験面）とダイ（平面ダイ、テーパダイ）から構成され、共に分割構造になっており、金型開口部は図2に示す平面ダイを使用した場合、押し出し比2、3及び4に設定した。また、図3に示すテーパダイを使用し、テーパ部長さを変える実験では、押し出し比を2とした。

本試験装置は、平面工具試験面全体が潤滑試験面となり、すべり摩擦の影響によるせん断力の変化を材料流動状態に実現できる。試験面（平面工具）は変形が試験面における摩擦に伴うせん断変形に限定される利点をもつ。

試験面工具材質はSKD11で、焼入れ、焼戻しを施し、平面工具試験面のビッカース硬さは、約750HVである。平面工具の表面粗さは、算術平均粗さで $0.05\mu\text{m}Ra$ に仕上げている。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。試験片の実験前のビッカース硬さは約22HVである。試験面表面粗さは、算術平均粗さで約 $0.35\mu\text{m}Ra$ に仕上げた。試験片は、 $80\text{mm}\times 12\text{mm}\times 10\text{mm}$ の寸法のものを2枚合わせて使用した。試験片は格子線解析^{8),9)}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0.1mm、深さ0.07mmのV字溝による正方格子模様を機械加工にて設けた。

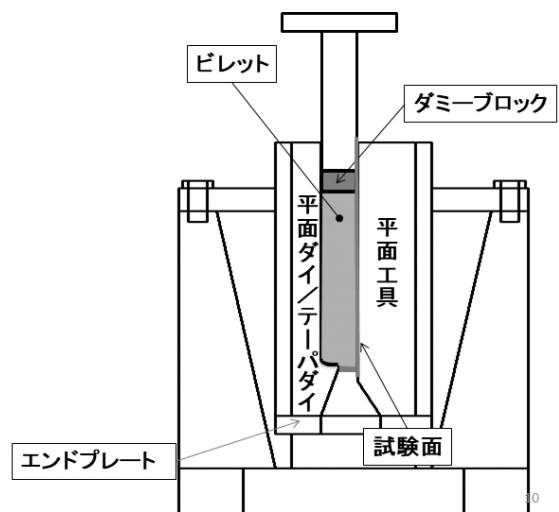


図1 平面ひずみ押し出し加工実験装置

2. 実験方法

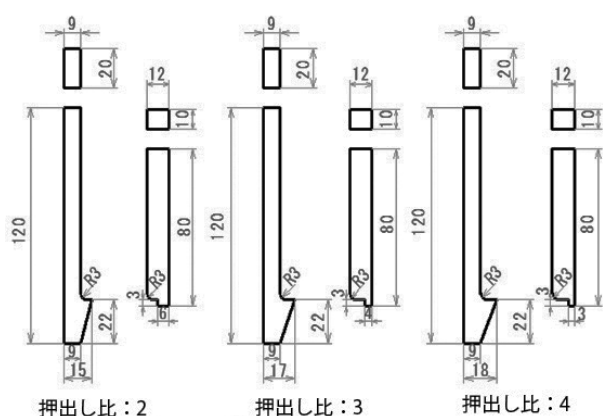


図2 平面ダイとピレット形状寸法（押し比）

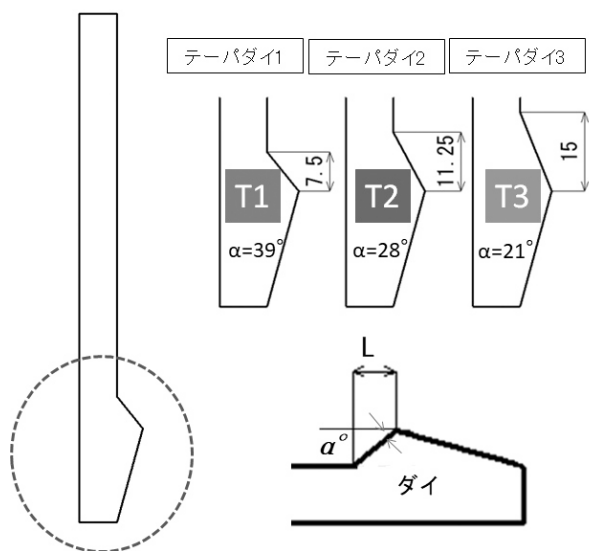


図3 テーパーダイの形状寸法（テーパー部長さ L）

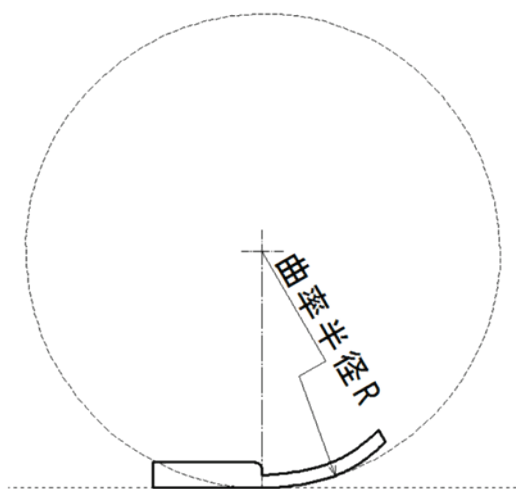


図4 製品曲がり量の測定方法

2.2 実験条件

試験用潤滑油には、粘度の異なるナフテン系無添加鉱油 N10(VG10), N22(VG22), N70(VG70), N100(VG100), N200(VG200), N460(VG460)を使用した。金型内部の潤滑条件は、試験面（平面工具）については、質量 0.1mg まで読みとり可能な分析用電子天秤により、試験用潤滑油の初期塗布油量を塗布質量で 15mg (N10については、0.5mg, 1mg, 5mg, 15mg) とした。実験結果は潤滑油粘度で示した。塗布前に工具と被加工材の試験面はアセトンで脱脂を行い、試験用潤滑油は平面工具試験面側に塗布した。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（一部 VG200 を使用）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。

2.3 実験方法

実験は、30 トン複動油圧プレスを使用して冷間平面ひずみ押し加工を行い、押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。押し加工実験中の押し荷重、プレスラム変位を荷重変換器、変位センサーにて測定し、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^{8), 9)}を行い、試験片の金型内変形領域における塑性流れ速度分布を算出した。

また、製品の曲がり量は、図4に示すように、製品出口部付近のピレット平面工具側の製品曲率を算出して評価した。また、ピレット試験面の表面粗さも測定した。製品曲がり量を摩擦拘束の観点から明らかにするために、製品曲がり量をピレットの加工後の表面粗さの変化と金型内部の塑性流れ速度に着目して検討を行った。

3. 実験成果

3.1 製品曲がり量に及ぼす押し比の影響

図5に押し比の異なる押し後のピレット形状例を示す。押し比が小さいほど、曲がり量は大きくなっているのがわかる。この製品曲がり量を図4に示した方法で、曲率を算出した。

塑性加工における被加工材の表面は、工具表面、潤滑剤等との相互作用の結果として創成される¹⁰⁾。従って、表面創成と平面工具面の摩擦拘束状態は密接に関連すると考えられる。曲がり量が摩擦面の潤滑状態の影響でどのように変化するかを調べるために、図6に示すように、被加工材の金型出口部付近の算術平均粗さ Ra で、製品曲がり量を整理した。本実験では、押し比が同じであれば、摩擦拘束の違いは平面工具上の潤滑状態の違いに起因するので、得られた曲がり量を金型出口付近の製品表面粗さで整理した。それぞれの押し比に対して、平面工具に塗布する潤滑油の粘度と塗布量を変えて潤滑状態を変化させた。

製品曲がり量は、押し比の小さい条件で、曲がり量が

大きくなっている。また、曲がり量は異なるが、曲がり量の変化幅は押出し比にかかわらずほぼ同一であった。また、どの押出し条件においても、押出し比にかかわらず、曲がり量の増減の変化が同じ表面粗さに対応する傾向を示している。すなわち、どの条件においても、 $0.1\mu mRa \sim 0.15\mu mRa$ で、曲がり量の大きなピークがあり、 $0.2\mu mRa$ 付近で極小値を示す。また、 $0.6\mu mRa$ より大きくなるとほとんど変化しないということが図からわかる。

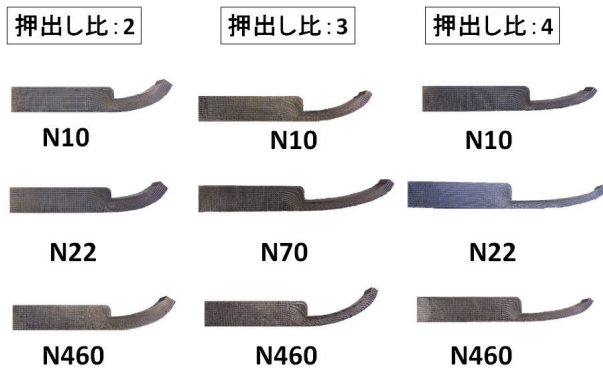


図5 押し出し後のピレット形状 (押し出し比による比較)

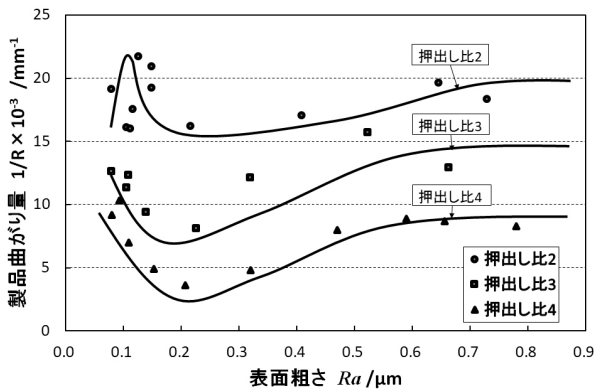


図6 製品曲がり量と製品表面粗さの関係 (押し出し比による比較)

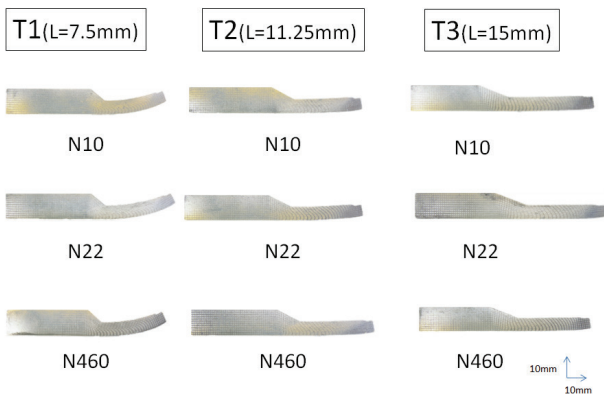


図7 押し出し後のピレット形状 (テーパ部長さ L による比較)

3.2 製品曲がり量に及ぼすテーパダイテーパ部長さの影響

押し出し比を2に設定し、平面工具と相対するダイ形状をテーパダイとし、テーパ部長さを3種類変えて、同様の実験を行った。図7に押し出し後のピレット形状例を示す。図8に製品曲がり量を製品表面粗さに対して示した。この場合も、テーパ部長さの違いで、曲がり量は異なるが、テーパ部長さが長くなるほど曲がり量は小さくなった。また、曲がり量の変化幅もテーパ部長さが長くなるほど小さくなった。テーパ部長さが異なるにも関わらず、また、曲がり量の変化幅も異なるにもかかわらず、表面粗さに対する曲がり量の増減変化は、押し出し比の異なる実験結果と同様の結果を示し、曲がり量の変化に対応する表面粗さの値もほぼ同じ範囲であった。このことから、曲がり量の変化は、工具面の潤滑状態によって生じ、トライボロジカル制御を行うためには、摩擦面の表面粗さを考慮することが必要であることがわかった。

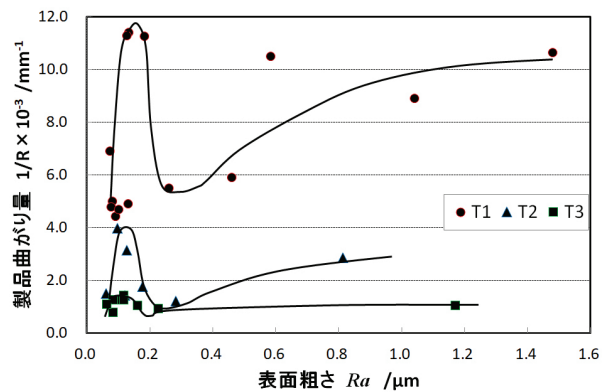


図8 製品曲がり量と製品表面粗さの関係 (テーパ部長さによる比較)

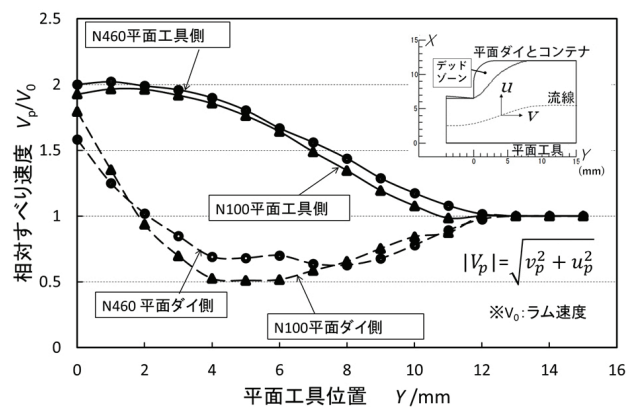


図9 金型変形領域内のピレットすべり面相対すべり速度 (ダイ:押し出し比2の平面ダイ, 潤滑油:N100とN460, 曲がり量:N100<N460)

3・3 製品曲がり量に及ぼす相対すべり速度の影響

図9は、金型変形領域内のピレットの平面工具側すべり面上における相対すべり速度と、相対するダイ側（ここでは平面ダイ側）のダイとの接触面及びデッドゾーンせん断面を通過する流線上の相対すべり速度分布の一例を示す。押し出し方向の塑性流れ速度を v_p 、押し出し方向と直交する方向の塑性流れ速度を u_p として、定常プレスラム速度（押し出し速度）を V_0 とするとき、 V_p/V_0 を相対すべり速度とした⁸⁾。 V_p は $(v_p^2 + u_p^2)^{1/2}$ である。

ここでは、実験条件として、平面ダイを使用し、押し出し比 2、N100 と N460 の場合を示す。製品曲がり量は、N460>N100 であるが、曲がり量の大きな条件は、金型出口部付近で平面工具側と平面ダイ側の相対すべり速度の差が大きくなる傾向を示した。

4. 結論

冷間押し出し加工実験により、押し出し製品曲がり量に及ぼす平面工具摩擦面の摩擦拘束の影響を、押し出し比と平面工具試験面に相対するテーパダイ部長さを変え、平面工具試験面に塗布する潤滑油の粘度を変える加工実験を行い、実験的に調査して以下のことがわかった。

(1) 製品曲がり量は、押し出し比の小さい条件で、曲がり量が大きくなる。また、曲がり量は異なるが、曲がり量の変化幅は押し出し比にかかわらずほぼ同一であった。

(2) テーパ部長さの違いで、製品曲がり量は異なるが、テーパ部長さが長くなるほど曲がり量は小さくなる。また、曲がり量の変化幅もテーパ部長さが長くなるほど小さくなった。

(3) すべてのダイ条件において、製品曲がり量の増減変化は表面粗さで整理することができた。0.1 μmRa ~ 0.15 μmRa で、曲がり量の大きなピークがあり、0.2 μmRa 付近で極小値を示す。また、0.6 μmRa より大きい領域ではほとんど変化しない。

(4) 製品曲がり量は、金型出口部付近での平面工具側とダイ側の相対すべり速度の差が大きいほど、大きくなる傾向を示した。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の平成 27 年度一般研究開発助成（AF-2015032）のご支援を受けて実施しました。ここに謝意を表します。また、本研究を進めるにあたり、実験で協力をいただいた鹿児島大学大学院生の白山瞬君と永野大樹君、潤滑油を提供いただいた出光興産株式会社に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) H. Kudo and A. Azushima: Proc. 2nd ICTP, (1987), 373.
- 2) 王志剛・堂田邦明・春山義夫・横井信安：機論 C, 65-636(1999), 3408.
- 3) S. SHEU, L. G. Hector Jr. and O. Richmond: ASME J. Tribology, 120(1998), 517.
- 4) 木内 学・陳 仁泰・新谷 賢：塑性と加工, 37-426 (1996), 711.
- 5) 白石光信・新川真人・山口正史：塑性と加工, 40-462 (1999), 683.
- 6) 楊 从新・中西賢二・上谷俊平：トライボロジスト, 49-3 (2004), 240.
- 7) シャルライル サミオン・中西賢二・上谷俊平：トライボロジスト, 50-12 (2005), 877.
- 8) S. Kamitani, K. Nakanishi, T. Matsushita and S. Syahrullail: Tribology Online, 7-4 (2012), 249.
- 9) 中西賢二・岡村俊一・中村正久：塑性と加工, 18-203 (1977), 990.
- 10) 日本塑性加工学会：プロセストライボロジー, (1993), 2, コロナ社