

# 溝列工具を用いた押し出し加工によるアルミニウムの 表面平滑加工と加工条件

鹿児島大学 学術研究院理工学域工学系  
教授 上谷 俊平

(2019 年度 一般研究開発助成 AF-2019030-B3)

キーワード：押し出し加工，表面平滑，アルミニウム

## 1. 研究の目的と背景

塑性加工における潤滑技術は，製品表面品質，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)に寄与する重要な支援技術である。単位時間あたりの生産性に優れる塑性加工によって平滑な表面仕上げ加工が可能となれば，切削加工や研削加工等の最終仕上げ工程を省くことができ，加工時間の短縮や低コストにつながり，CO<sub>2</sub>削減や環境保全等にも大きく貢献できる。アルミニウムの表面仕上げに関しては，引抜きやしごき加工において鏡面加工を行った例<sup>1), 2)</sup>が挙げられるが，押し出し加工(鍛造)においては表面平滑化に関する研究<sup>3)</sup>や著者らにより提案された微細溝列工具を用いた加工例<sup>4)~8)</sup>など，報告例は少ない。工具や被加工材表面に微細穴加工や微細溝加工などを施す表面テクスチャ<sup>1), 9), 10)</sup>を適材適所で有効に活用するためには，金型表面-潤滑剤-加工材表面間の潤滑現象を把握する必要がある。塑性流動や加工表面に及ぼす潤滑剤の特性を把握して摩擦面の制御に利用することは，塑性加工への表面テクスチャ活用技術において重要課題と考える。

著者らは平面工具面に設けた溝列を利用した押し出し加工によるアルミニウムの平滑加工について検討を行っており，加工初期に加工材の一部流入に伴い再形成される微細溝形状が，加工表面性状に影響すること，再形成される溝断面形状は使用する潤滑油の特性によって異なり，加工面の油膜形成に影響することなどを報告<sup>6), 8)</sup>している。冷間加工において平滑な加工表面を成形するためには，必要最小限の油膜が工具面に施した溝部分を通過した後も確保されねばならない。潤滑油膜の形成は，潤滑油粘度，潤滑油種類，溝断面形状のほかにも，加工表面面積拡大率など，金型形状によっても影響を受ける。本研究では，溝列工具を用いた平面ひずみ押し出し加工実験によるアルミニウムの平滑加工の加工条件に関して加工表面性状への塑性流動の影響と潤滑油の役割を把握するために，3種類の形状の異なる絞り工具を使用して金型内塑性変形領域における塑性流動状態が加工表面の平滑加工性に及ぼす影響を実験的に調査することを目的とする。

## 2. 実験装置と実験方法

### 2.1 実験装置の概要

図1は本実験で使用した平面ひずみ押し出し加工タイプの

試験装置概略図である。ダイスとコンテナは一体で，試験面となる平面工具と塑性流動を変えるための絞り工具からなる。工具材質はSKD11で，焼入れ，焼戻しを施し，工具試験表面のビッカース硬さは，760HVである。工具試験面の表面粗さは，0.05 $\mu$ mRa~0.06 $\mu$ mRaに仕上げた。絞り工具には，図2に示す絞り形状の異なる3種類の工具(テーパダイ(Taper)・凸形状ダイ(Convex)・凹形状ダイ(Concave))を用いた。金型開口部は押し出し比2に設定した。

被加工材(ビレット)には80mm×15mm×5mmの寸法の工業用純アルミニウムA1050の焼なまし材(実験前のビ

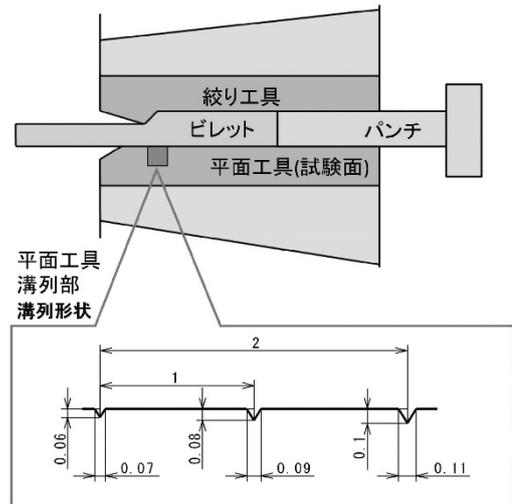


図1 実験装置概略図と溝列工具溝形状

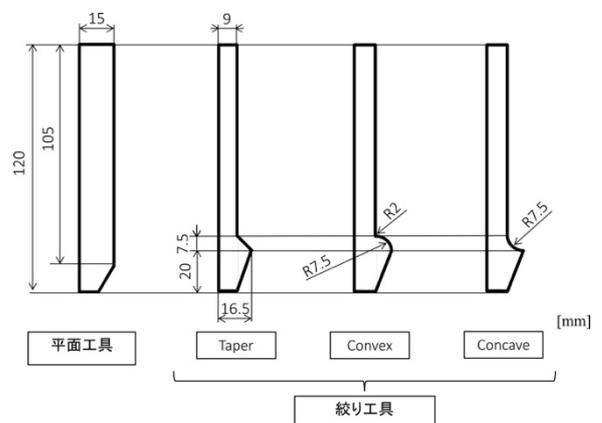


図2 平面工具と絞り工具寸法

ッカーズ硬さは約 23HV) を 2 枚合わせて使用した。格子線解析<sup>11)</sup>によるピレット金型内変形領域の塑性流動状態を調べるためにピレットの合わせ面の片方に 1mm×1mm の格子線模様を機械加工で設けた。試験面の表面粗さは約 0.3 $\mu$ mRa に仕上げた。

## 2・2 実験条件

実験では各絞り工具ごとに押出し加工実験を行い、潤滑油の粘度の違いにより製品表面粗さ(平面工具側)がどのように変化するかを調べ、絞り工具形状による金型内部塑性流動の違いが加工表面の平滑さに及ぼす影響を検討した。試験面となる平面工具には、溝なし平面工具と溝列本数を 3 本設けた溝列平面工具を準備した。微細溝断面形状と寸法、および平面工具面上の配置位置を図 1 に示す。溝列は、金型内部のピレット変形領域内(溝列平面工具押出し出口部を 0mm としたとき、金型内部へ 5.5mm~7.5mm の部分)に配置した。図 1 に示す V 字溝形状の溝列工具(未使用工具)は、加工実験 1 回目を実施した時の押出し初期の過程で溝列部にアルミニウムが流入凝着して微細溝列の溝断面形状が変化するが、2 回目の加工実験以降では、溝列形状は大きく変化せずに溝断面形状が安定する傾向を示す。

平面工具(試験面)に実験前に塗布する潤滑油量については、これまでの溝列工具を使用した実験<sup>4)</sup>と同様に試験油の初期塗布油量を塗布質量で 5mg(0.48mg/cm<sup>2</sup>)とした。試験用潤滑油には、粘度グレード(VG)の異なる 5 種類のパラフィン系無添加鉱油(VG7, VG32, VG100, VG220, VG460)を使用した。試験面以外のピ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。

## 2・3 実験方法

30 トン複動油圧プレスを使用して、平面ひずみ冷間押出し加工実験を行った。押出し変形が定常状態にある押出し変位 35mm で、加工を停止してピレットを取り出した。押出し加工実験中の押出し荷重、プレスラム変位を記録した。実験終了後にピレットの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。また、ピレット合わせ面の格子線模様を写真撮影して拡大図から流れ場を求めて格子線解析を行い、ピレット変形領域内の相当ひずみを算出した。

溝列工具については、焼付き等がない場合は同一工具・同一潤滑油で 2~3 回実験を行ったが、押出し実験後に毎回工具面をアセトンで軽く拭き取った後に次の押出し加工実験を実施した。

## 3. 実験成果

### 3・1 絞り工具形状と塑性流動状態

図 3 は、溝なし平面工具を用いて各絞り工具で押出し加工実験を行い得られた最大押出し荷重を比較したものである。最大押出し荷重は、テーパダイ(Taper)を使用した場合に荷重がわずかに低くなり、凸形状ダイ(Convex)と凹形状ダイ(Concave)の場合、ほぼ同じ荷重でテーパダイの場合よりわずかに大きい値を示す。これは、金型内

部の絞り工具形状の違いによる工具面とピレットの接触面積の差が原因で、凸形状ダイと凹形状ダイの方がピレットの金型内接触面長さが長いことによる摩擦の影響であると考えられる。

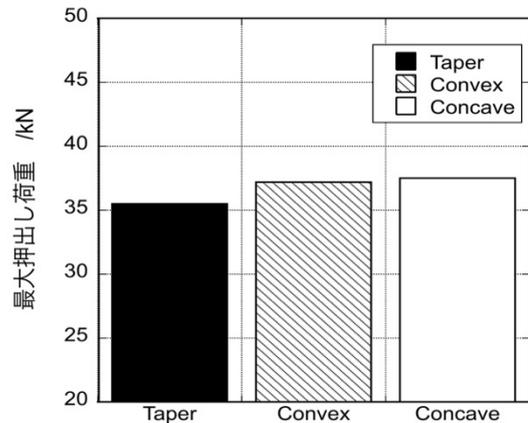


図 3 最大押出し荷重の比較(溝なし工具の場合)

図 4 は、溝なし平面工具による実験における格子線解析によって得られたピレット試験面表面の押出し出口から変形領域内部 8mm(溝列工具の溝部入り口側)における相当ひずみを比較したものである。溝列工具を使用した場合、溝部分により潤滑油膜が減ざられ加工表面の平滑加工がなされるため、ピレット試験面表面の相当ひずみの大きさは表面積拡大による油膜厚さの違い<sup>12)</sup>に影響するので重要である。変形領域内部 8mm の位置はちょうど溝列工具の場合には溝列部入口部に相当するため、この位置での比較を行った。格子線解析によって得られた相当ひずみ値を比べるとテーパダイと凹形状ダイの相当ひずみより凸形状ダイの相当ひずみが絞り工具形状の影響で大きくなっている。このことは、金型内部の変形領域入口側により近い位置で凸形状ダイを使用した場合、試験面の潤滑油膜が薄くなる可能性を示している。

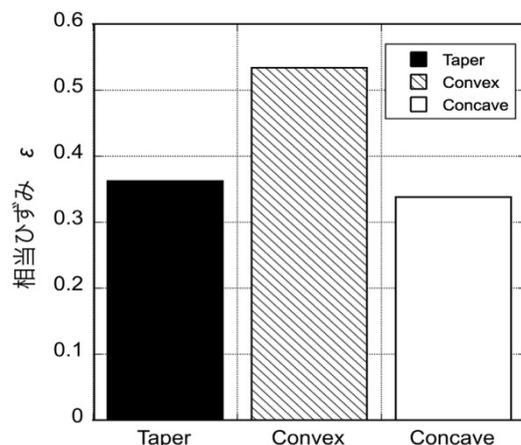


図 4 ピレット試験面押出し出口から変形領域内部 8mm 位置のピレット試験面表面部相当ひずみの比較(溝なし工具の場合)

### 3・2 製品表面粗さに及ぼす絞り工具形状の影響

各絞り工具形状で、製品表面粗さが工具表面粗さと同じ値以下に平滑化できた動粘度範囲（室温）は、テーパ形状の絞り工具は 71~3336mm<sup>2</sup>/s、凸形状の絞り工具は 240~1435mm<sup>2</sup>/s、凹形状の絞り工具は 11~1435mm<sup>2</sup>/s であった。

図5は、各潤滑油粘度グレードにおける各絞り工具で行った加工実験後のビレット試験面押し出し出口部製品平滑表面部の表面粗さ（算術平均粗さ）値の一例である。それぞれの絞り工具において、粘度の広い範囲で加工表面粗さが平面工具表面粗さ（0.05~0.06μmRa）以下になっており、平滑な加工表面が得られた。ただし、図に示していないが、高粘度 VG460 の潤滑油については、高粘度で油膜が厚く形成されるため、溝列工具による溝列部分での油膜制御が難しくなり、表面粗さを工具表面粗さ以下に維持することは難しくなった。これは、高粘度において試験面の潤滑油膜が厚く形成され、溝列部の溝による油膜制御ができなくなったためである。また、粘度グレードが VG7 と VG32 の低粘度における条件では、絞り工具形状によって製品性状（表面粗さ）の状態が異なってくる。低粘度条件で最も安定した平滑面を加工できるのは凹形状の絞り工具を使用した場合であった。凸形状の絞り工具の場合は VG32 の条件で平面工具表面の押し出し出口部付近でうっすらとアルミニウムの凝着が観察された。図6に示すように、VG7 の条件では、凸形状の絞り工具の場合は押し出し出口部付近に焼付きが発生した。テーパダイの場合は溝部から押し出し出口部にかけてうっすらと凝着が観察された。図7に VG7 の条件における押し出し出口部付近のビレット製品表面写真を示す。図(a)のテーパダイと(b)の凸形状ダイ（工具焼付きのない部分）の場合、ビレット表面に擦り傷が見られる。図(c)の凹型ダイの場合はきれいな平滑表面であった。

押し出し出口部付近では油膜厚さが薄くなりやすく焼付きや凝着は発生しやすい<sup>13)</sup>。図4で示した変形領域内部8mm位置の相当ひずみが最も大きくなっている凸形状の絞り工具で、低粘度での油膜切れに起因する凝着や焼付き

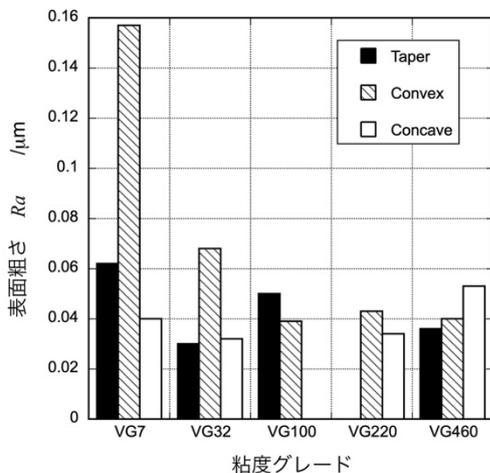


図5 各潤滑油粘度グレードでのビレット試験面押し出し出口部製品表面の表面粗さ（算術平均粗さ）

が起こっていることから、絞り工具形状による塑性流動の違いによって試験面の潤滑油膜厚さを調整できる可能性があることがわかった。また、低粘度潤滑油 VG7 を使用したテーパダイの加工条件で発生した凝着は凹形状ダイを使用することで回避できて平滑な加工表面加工が可能になった。

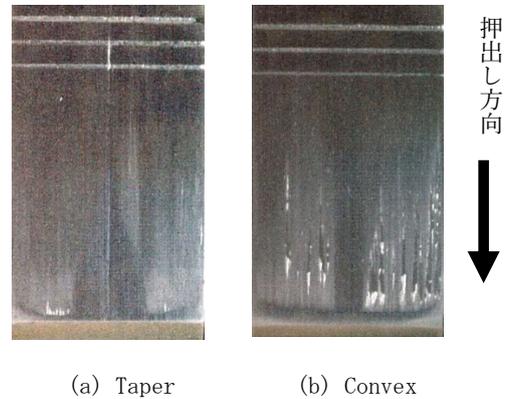


図6 溝列平面工具表面写真 (VG7 の場合)



(a) 絞り工具：テーパダイ (Taper)



(b) 絞り工具：凸形状ダイ (Convex)



(c) 絞り工具：凹形状ダイ (Concave)

図7 ビレット試験面押し出し出口部の製品表面写真 (VG7 の場合)

図8は、潤滑油条件 VG32 におけるピレット試験面押し出口部の製品表面部の表面粗さと光沢度  $G_s(20^\circ)$  (Rhopoint instruments 製微小・曲面光沢度計 FLEX20) を比較している。凸形状ダイ (Convex) の場合、表面粗さ  $Ra$  はすこし大きくなっているが、光沢度  $G_s(20^\circ)$  は 500 程度で、いずれの加工表面も平滑な加工面となっている。

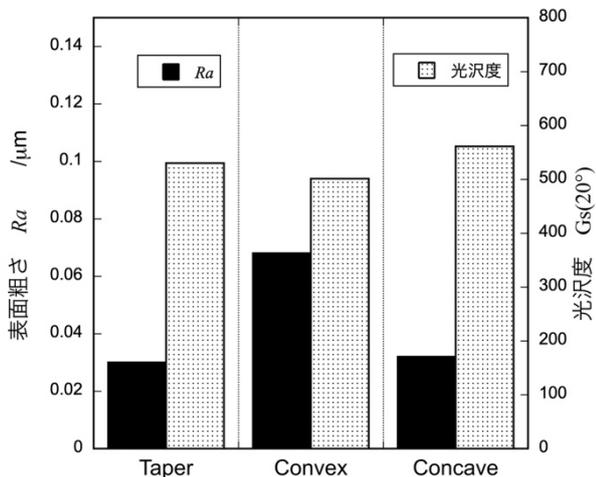


図8 製品表面部の表面粗さと光沢度  $G_s(20^\circ)$  (VG32 の場合)

#### 4. 結論

溝列工具を用いたアルミニウムの平滑加工を可能とする加工条件に及ぼす金型内部の塑性流動の影響を、絞り形状の異なる3種類の工具(テーパダイ・凸形状ダイ・凹形状ダイ)を使用して実験的に調査し、以下の結果を得た。

(1) 広い粘度範囲で、どの絞り工具形状を使用した場合でも溝列工具を使用することで工具表面と同じかそれよりも平滑な加工表面を得ることができた。

(2) 潤滑油に VG460 を使用した条件では、高粘度で厚い油膜が形成されるため、溝列工具による溝列部分での油膜制御が難しく、安定して平滑加工表面を得ることは困難であった。

(3) 各絞り工具形状で平滑加工ができた動粘度範囲は、テーパ形状の絞り工具については  $71\sim 3336\text{mm}^2/\text{s}$ 、凸形状の絞り工具については  $240\sim 1435\text{mm}^2/\text{s}$ 、凹形状の絞り工具については  $11\sim 1435\text{mm}^2/\text{s}$  であった。

(4) VG32 の条件では、凸形状の絞り工具の場合に平面工具表面の押し出し出口部付近でアルミニウムの凝着が観察された。また、VG7 の条件では、凸形状の絞り工具の場合に工具出口部付近に焼付きが発生し、テーパダイの場合は溝部から押し出し出口部にかけて軽度のアルミニウム凝着が観察された。いずれの粘度条件においても、凹形状の絞り工具を使用した場合には平滑な加工表面を得ることが出来た。

#### 謝辞

本研究に対し、公益財団法人天田財団より研究助成をいただきました。記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) H. Kudo・A. Azushima: Proc. 2nd Int. Conf. Techn. Plast. (ICTP1987), (1987), 3734.
- 2) 河合望・堂田邦明・秋山和洋・王志剛: 日本機械学会論文集(C編), **55**-517(1989), 2493.
- 3) 中村保・近藤一義・西ヶ谷知栄: 日本機械学会論文集(C編), **56**-530 (1990), 2794.
- 4) 上谷俊平・中西賢二・シャルライル サミオン: 軽金属, **58**-3 (2008), 111.
- 5) 上谷俊平, 中西賢二, 鷗野大樹, 尾崎正敏: 軽金属, **59**-7(2009), 339.
- 6) S. Kamitani・K. Nakanishi・Y.-M. Guo・M. Ozaki, Y. Honda: Proc. 10th Int. Conf. Techn. Plast. (ICTP2011), (2011), 176.
- 7) S. Kamitani・K. Nakanishi・Y.-M. Guo: Procedia Engineering, **81** (2014), 1878.
- 8) S. Kamitani・Y. Honda・Y.-M. Guo: Procedia Engineering, **207** (2017), 407.
- 9) 王志剛・堂田邦明・春山義夫・横井信安: 日本機械学会論文集(C編), **65**-636 (1999), 3408.
- 10) S. Sheu・L. G. Jr. Hector・O. Richmond: ASME J. Tribol. **120** (1998) 517).
- 11) 中西賢二・岡村俊一・中村正久: 塑性と加工, **18**-203(1977), 990.
- 12) 日本塑性加工学会: プロセス・トライボロジー, (2020), 20, コロナ社
- 13) 中村保・松井伯夫: 日本機械学会論文集(C編), **56**-530(1990), 3332.