



S. Kamitani

冷間アルミニウム押出し製品曲がり量と トライボロジカル制御

上谷 俊平*

1. まえがき

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り、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であるとはいえない。

素材を金型内に充填して所定のダイス孔から押出して製品を加工する押出し加工では、押出される製品の曲がりをコントロールするために、ダイス形状、押出し条件、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、押出し製品の曲がりは型形状や工具摩擦と関連し⁴⁾、押出し製品の曲がり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、押出し製品の曲がりに及ぼす摩擦面の影響を実験的に調べることで、押出し加工における押出し製品曲がり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。

本論文では、冷間押出し加工における製品曲がり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出し加工実験装置により実験的に検討する。製品曲がり量と製品表面性状の測定・観察を行うとともに、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）から算出して摩擦

拘束が塑性変形に及ぼす影響についても検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置の概要

図1の平面ひずみ押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2本（試験面側、それぞれ厚さ 10mm）とダイ1本（平面ダイ、テーパダイ、厚さ 20mm）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

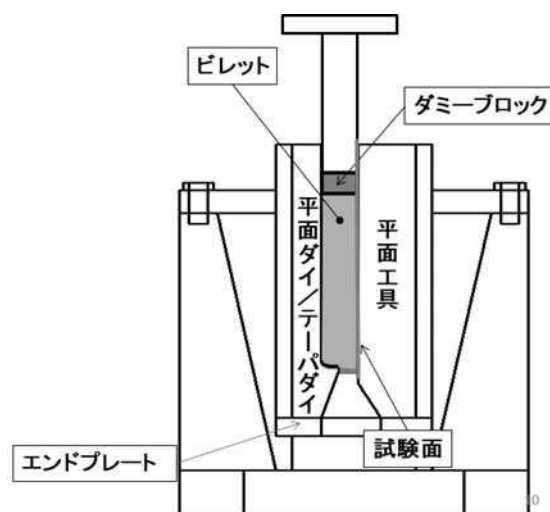


図1 平面ひずみ押出し加工実験装置

* 鹿児島大学 学術研究院理工学域工学系 教授

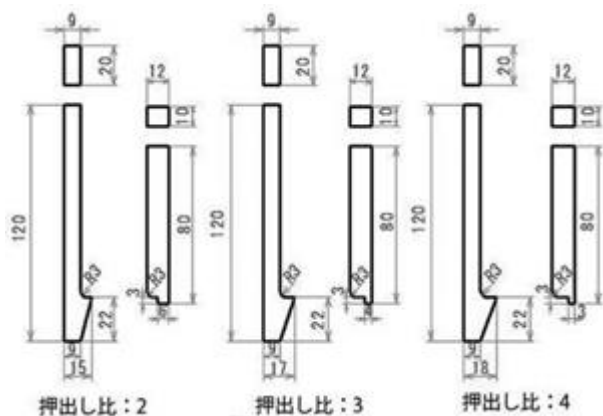


図2 平面ダイとピレット形状寸法（押し出し比）

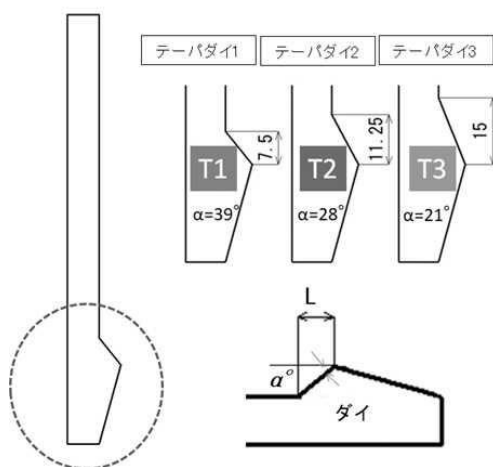
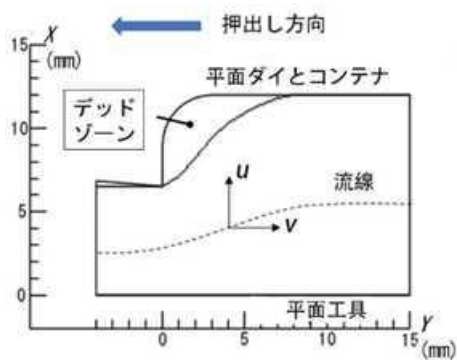


図3 テーパーダイの形状寸法（テーパー部長さ L ）



(a) 実験後のピレット格子線模様



(b) 座標系

図4 格子線解析に用いた座標系

は、算術平均粗さで約 $0.35 \mu m Ra$ に仕上げた。試験片は、 $80mm \times 12mm \times 10mm$ の寸法のもを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。

2.2 実験条件

試験面（平面工具）に塗布す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 N10 (VG10), N22 (VG22), N70 (VG70), N100 (VG100), N200 (VG200), N460 (VG460), N1200 (VG1200, T1の実験のみ)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平面工具1本につき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 実験方法と格子線解析

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出し加工を行い、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。図4に格子線解析で用いた座標系を示す。ここで、 X 軸は押し出し方向と直交方向、 Y

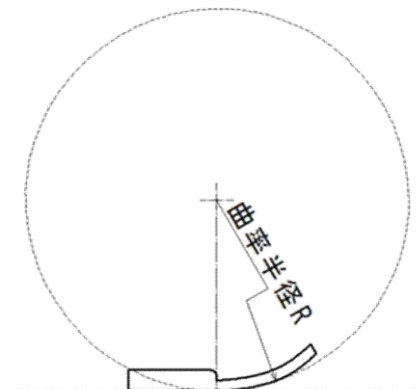


図5 製品曲がり量の測定方法

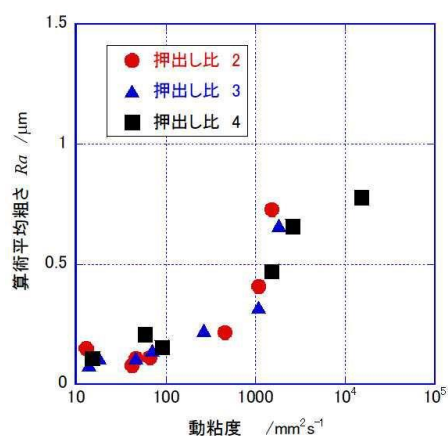
軸は押し出し方向に座標をとっている。 u と v はそれぞれ押し出し方向に直交する方向と押し出し方向の塑性流れ速度成分である。

実験後のビレット製品曲がり量を潤滑状態(平面工具面の摩擦拘束)との関連から明らかにするために、製品曲がり量の違いを、加工により成形されたビレット製品試験面側の表面粗さと金型内部の塑性流れ速度に着目して検討を行った。製品の曲がり量は、図5に示すように、製品出口部付近のビレット平面工具側の製品曲率を算出して評価した。また、ビレット試験面の表面粗さは押し出し方向と直交する方向に接触式表面粗さ測定機で測定した。

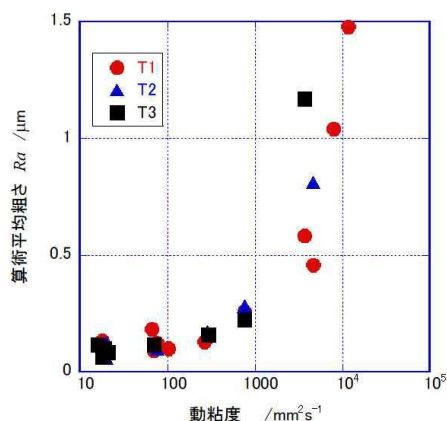
3. 実験成果

3.1 潤滑油粘度と製品表面粗さ

図6は、平面工具試験面に塗布した潤滑油の実験時の粘度と、その潤滑油で加工実験を行ったビレット加工面の金型出口部付近の平面工具側表面粗さを比較している。塗布量が15mgの場合について、平面ダイとテーパダイを使用した場合の実験結果を整理した。粘度が高くなると加工表面粗さは大きくなった。また、押し出し比やテーパ部長さの違いによる影響はほとんど見られない。



(a) 平面ダイを使用した実験の場合



(b) テーパダイを使用した実験の場合

図6 潤滑油粘度と製品表面粗さの関係

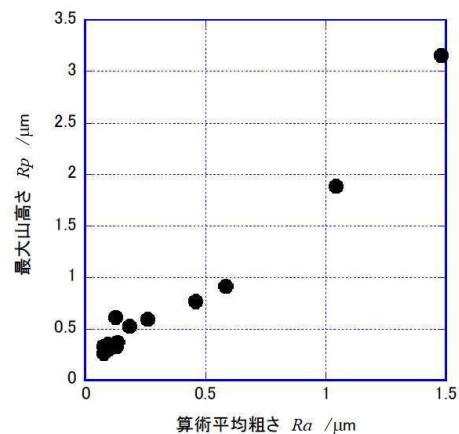
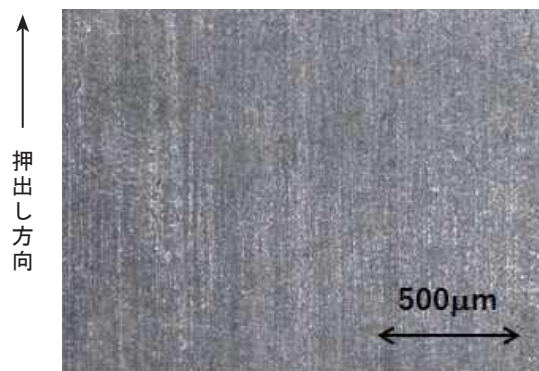
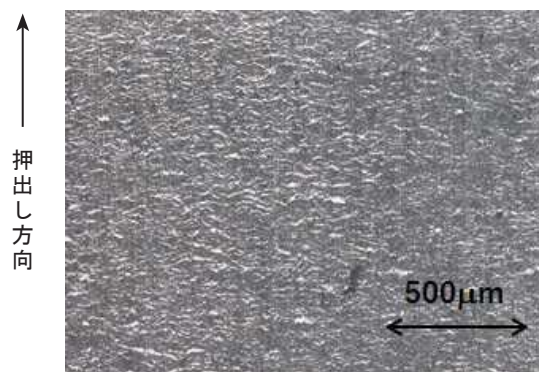


図7 算術平均粗さと最大山高さの関係(実験条件:T1)



(a) 実験条件:T1-N10-15mg, $Ra=0.13\ \mu\text{m}$, $R^{-1}=11.4\times 10^{-3}\text{mm}^{-1}$



(b) 実験条件:T1-N460-15mg, $Ra=0.46\ \mu\text{m}$, $R^{-1}=5.9\times 10^{-3}\text{mm}^{-1}$

図8 製品表面写真(平面工具側, $Y=0\text{mm}$)

図7にテーパダイT1を使用した加工実験における製品表面粗さを二つのパラメータ算術平均粗さ Ra と最大山高さ Rp で整理した。最大山高さは、工具表面への焼付きなどによる材料凝着が生じない場合、工具/被加工材間のおおよその油膜厚さに相当する^{(10),(11)}。本実験では、工具表

面に肉眼で観察できる被加工材の凝着は見られなかった
ので、算術平均粗さが大きいと、試験面における油膜も厚
く形成されていることになる。

図 8 にテーパダイ T1 を使用した場合の低粘度 N10 と高
粘度 N460 の加工条件における製品部の表面拡大写真を示
す。低粘度 N10 の条件では、加工中の平面工具と被加工材
間の形成される油膜が薄くなるため、塑性変形で生じる表
面あれが工具表面に拘束、転写され平坦化している。また
高粘度 N460 の条件では、油膜が N10 の場合より厚く形成
されるため、工具表面の拘束が弱く、表面に凹凸が多く観
察された。

以上のように、本実験では、ビレット加工面の平面工具
側の表面粗さが油膜厚さに関連することから、工具面の摩
擦拘束の影響（潤滑状態）を表面性状パラメータの算術平
均粗さ Ra で整理する。

3.2 製品曲がり量に及ぼす押出し比の影響

図 9 に押出し比の異なる押出し後のビレット形状例を
示す。押出し比が小さいほど、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 5 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¹²⁾。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 10 に示すように、被
加工材の金型出口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、押出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。それぞれの押出し比に対して、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（製品表面
粗さ）を変化させた。

製品曲がり量は、押出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、 $0.1 \mu m Ra$ より
小さくなると製品曲がり量は小さくなっていき、 $0.1 \mu m Ra$
～ $0.15 \mu m Ra$ で、曲がり量の大きくなるピークがあり、
 $0.2 \mu m Ra$ 付近で極小値を示す。また、 $0.5 \sim 0.6 \mu m Ra$ 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。

3.3 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 11 に押出し後のビレット形状例を示す。
図 12 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、



図 9 押出し後のビレット形状（押出し比による比較）

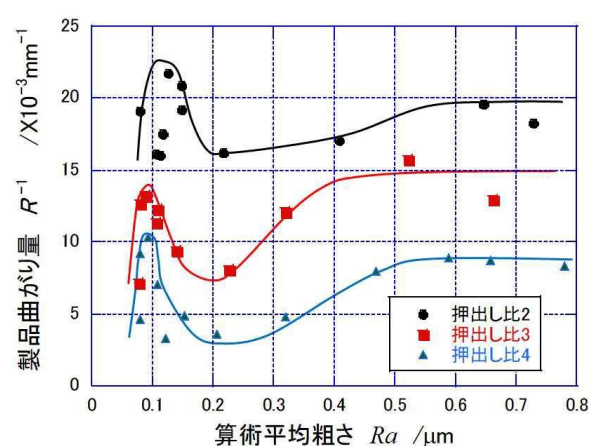


図 10 製品曲がり量と製品表面粗さの関係
（押出し比による比較）

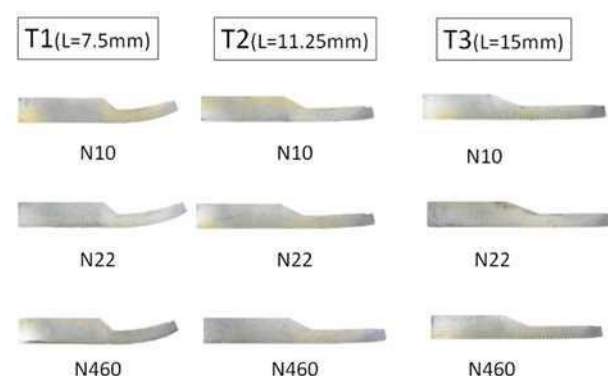


図 11 押出し後のビレット形状
（テーパ部長さ L による比較）

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

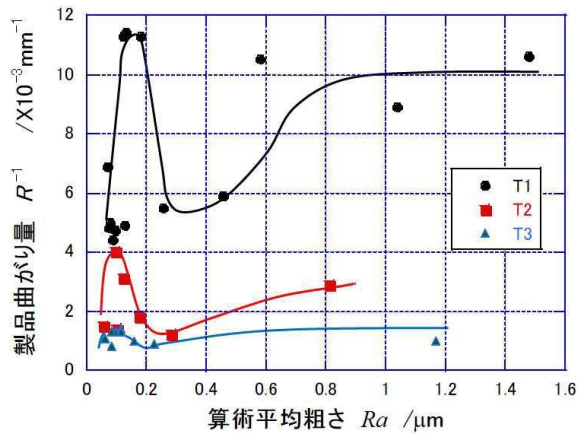


図 12 製品曲がり量と製品表面粗さの関係
(テーパー部長さによる比較)

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、曲がり量の大きさは金型形状によっておおよそ決定されるが、曲がり量の変化は、工具面の潤滑状態の変化によって生じ、トライボロジカル制御を行うためには、摩擦面の表面性状（表面粗さ）に着目した対策を検討する必要があることがわかった。

3.4 製品曲がり量に及ぼす相対すべり速度の影響

図 13 は、金型変形領域内のピレットの平面工具面上における相対すべり速度と、相対するダイ側（ここではテーパーダイ側）のダイとコンテナ部の工具面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、テーパーダイ T1 を使用し、押し出し比 2、使用した試験用潤滑油 N22 と N200 の場合を示した。図 14 に加工後のピレット試験片の写真を示す。N22 の実験ピレットのほうが、N200 の場合よりも製品曲がり量が大きくなっている。図 15 には、両実験の押し出し荷重（押し出し最終荷重）を示す。曲がり量の大きい N22 の条件の押し出し荷重がわずかに低い値を示した。

ピレット平面工具側の相対すべり速度は N22 > N200 となっている。本試験装置を使用した場合、平面工具面での摩擦拘束が小さくなると平面工具側の相対すべり速度は大きくなる傾向を示すことから^{6)~8)}、図 15 の押し出し荷重の結果と合わせて考えると、N22 の条件のほうが N200 の条件よりも平面工具側の摩擦が小さかったと予想される。

押し出し製品曲がり量には金型出口部での被加工材の流出速度分布が影響する^{4), 13)}。図 16 に平面工具側の相対すべり速度とテーパーダイ側の相対すべり速度の差（相対すべり速度差）の分布を示す。曲がり量の大きい N22 のほうが N200 の場合より、金型内部出口付近で相対すべり速度差

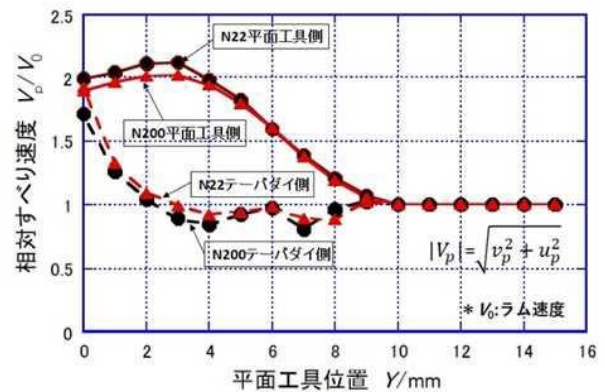


図 13 金型変形領域内のピレットすべり面相対すべり速度
(実験条件：T1，潤滑油：N22 と N200，
表面粗さ： $Ra=0.18 \mu\text{m}$ [N22]， $Ra=0.26 \mu\text{m}$ [N200]，
曲がり量： $R^{-1}=11.3 \times 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ [N22]，
 $R^{-1}=5.5 \times 10^{-3} \text{mm}^{-1}$ [N200])



(a) T1-N22-15mg (曲がり量： $R^{-1}=11.3 \times 10^{-3} \text{mm}^{-1}$)



(b) T1-N200-15mg (曲がり量： $R^{-1}=5.5 \times 10^{-3} \text{mm}^{-1}$)

図 14 実験後のピレット形状

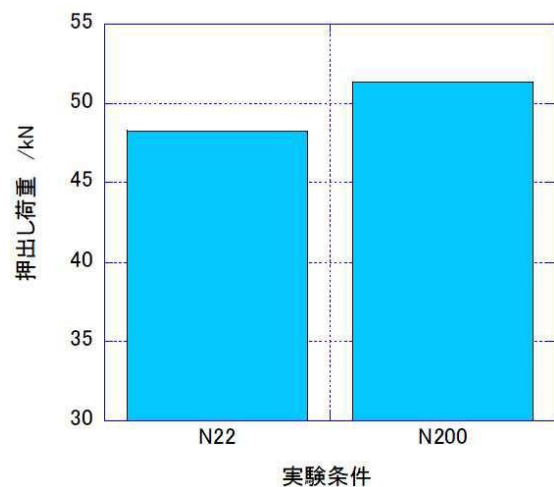


図 15 押し出し荷重の比較 (T1-N22 と T1-N200)

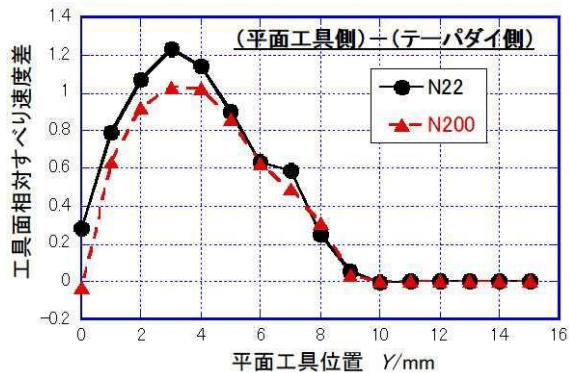


図 16 相対すべり速度差の比較 (T1-N22 と T1-N200)

が大きくなっている。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、平面ダイを使用して押し出し比を変える条件と、テーパダイを使用してテーパダイ部長さを変える条件について、平面工具試験面に塗布する潤滑油の粘度を変えて加工実験を行い、実験的に調査して以下のことがわかった。

(1) 平面ダイを使用して押し出し比を変える条件では、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った。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) テーパダイを使用してテーパダイ部長さを変える条件では、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。

(3) すべての条件において、製品曲がり量の増減変化は表面性状パラメータである算術平均粗さ Ra で整理することが有効であることがわかった。本実験では、ビレット製品部表面粗さが $0.1 \mu mRa$ より小さくなると製品曲がり量

は小さくなっていき、 $0.1 \mu mRa \sim 0.15 \mu mRa$ で、曲がり量の大きくなるピークがあり、 $0.2 \mu mRa$ 付近で極小値を示した。また、 $0.5 \sim 0.6 \mu mRa$ より大きい領域では曲がり量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からの平成 27 年度一般研究開発助成 (AF-2015032) のご支援を受けて実施したことを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

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) 大矢根守哉・小坂田宏造: 日本機械学会論文集, 34-263 (1968), 1336.
- 11) 大矢根守哉: 塑性と加工, 18-193 (1977), 144.
- 12) 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
- 13) 木場博文・中西賢二・上谷俊平: 塑性と加工, 42-488 (2001), 954.