内面しごき法によるアルミニウム 押出パイプの表面平滑化機構*

斉藤正美^{*1}, 堂田邦明^{*2}, 河合 望^{*3}

Surface Flattening Mechanism of Extruded Aluminum Pipes by Inside-Ironing Process

Masami SAITO, Kuniaki DOHDA and Nozomu KAWAI

A surface flattening test by inside-ironing was carried out for hot-extruded aluminum pipes. The pipes have many scratches with a depth of about 1 μm formed by extrusion on their outer surface. A simulation test was also conducted using pipes with V-shaped grooves of about 14 μm depth which were preformed by a diamond tracer. There exists a difference in flattening process between the scratches and the grooves due to the difference of their initial configuration. The cross-sectional curve of the scratches consists in low-frequency waviness and high-frequency roughness, and the waviness is almost flattened at an earlier stage, followed by the roughness. The scratches thus disappear. The effects of the relative slip between metal and tool surface on the flattening of the scratches should be further clarified.

Key Words: Plastic Forming, Tribology, Ironing Process, Surface Flattening Extruded Aluminum Pipes, Optical Drums

1. 緒 言

光学機器などに用いられる鏡面円筒の量産技術に関し前報⁽¹⁾⁽²⁾では、熱間押出しされたアルミニウムパイプから一工程で鏡面円筒を成形する塑性加工法として内面しごき法を提案した。この方法は、平滑内面をもつ鋼製コンテナ内に挿入した素材円筒の内側からしごきを加え、円筒外側面へコンテナ内面を転写することによって製品形状と外表面性状を同時に仕上げようとするものである。素材となる熱間押出パイプの表面には通常母線に沿って深さ1 μm ほどのすり傷が無数に存在するが、適正条件下ではすり傷はほぼ完全に消滅して平滑な製品表面が得られることが確認されている。製品表面の平滑化問題においては、一般に被加工材と工具の界面における潤滑油挙動の把握と材料表面凹凸の平滑化機構の解明が重要である。V状突起モデルの平滑化問題に関しては実験および理論の両面から多くの検討がなされており、平滑化を支配する因子は面圧、相対滑り量、母材の応力状態と巨視的塑性変形

量などであることが明らかにされている^{(3)~(9)}。

本研究では、アルミニウム押出パイプに内面しごきを施して、外表面に存在する微小すり傷の平滑化過程を詳細に観察する。また、シミュレーション実験として、パイプ素材表面に微小V突起をパイプ長手方向に形成してその平滑化挙動を克明に観察し、面圧、相対滑り量等との関係を検討する。これらの結果に基づいて、本加工における表面平滑化の機構と特徴を明らかにする。

2. 実験方法

図1にしごき装置の主要部を示す。加工原理の詳細は前報⁽²⁾に譲るが、パンチヘッド④によってパイプ素材①の内側をしごくことにより、コンテナ②の内面がパイプ外表面に転写されて平滑化が達成される。コンテナは合金工具鋼SKD11製($H_{RC} \approx 60$)とし、内表面にラッピング仕上げを施した。この表面(粗さ0.3~0.4 μm R_{max} , 図2)には、ラッピング時に生じた微小なひっかき傷が多数観察されるが、肉眼では良好な光輝面である。パンチヘッド半角 α は8°, 12°の2種類とし、パンチヘッド径を変更してしごき率を10, 20, 30, 40, 50%の5段階に変更した。潤滑剤としてパラフィン系鉱油を用い、パイプ外表面には低粘度油

* 平成3年5月12日 平成3年度塑性加工春季講演会において講演、原稿受付 平成3年9月4日。

^{*1} 正員、鈴鹿工業高等専門学校 (〒150-02 鈴鹿市白子町)。

^{*2} 正員、岐阜大学工学部 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)。

^{*3} 正員、静岡理工科大学 (〒437 袋井市豊沢2200番地の2)。

PO 1 ($3.32 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 20°C) を、内面には高粘度油 S_1 ($5.119 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) を塗布して実験を行う。しごき速度は 2 mm/s で一定とした。

供試材として、熱間押出しのままの純アルミニウムパイプ (A 1100-O 材, 壁肉厚 1 mm , 外径 41.0 mm) を長さ 42 mm に切断したものを用いた。外表面性状を図 3 に示すが、深さ $1.2 \mu\text{m}$ 程度の無数のすり傷がパイプ長手方向に形成されている。後述のように、このパイプ外表面の一部に多列 V 状突起を形成して内面しごきを施し、すり傷と突起部の平滑化挙動を観察して比較・検討の対象とする。

3. 表面すり傷の平滑化挙動

図 4 に、加工を中断して取出したパイプ外表面における材料-コンテナ接触面の光学顕微鏡観察結果を示す。同図 (a) のしごき率 30% ($\alpha=8^\circ$) の場合、接触面入口から出口にかけてすり傷が順次平滑化・消滅していくとともに、深さ $0.5 \mu\text{m}$ 程度のマイクロオイルピットが多数発生して、しごき後パイプ表面に残留するこ

図 1 円筒内面しごき加工装置主要部

図 2 コンテナ内面の表面性状(レプリカ)

とが看取される。しかし、同図 (b) に示すように、しごき率が 50% と大きくなると、すり傷はより早期に消滅し、かつオイルピットはほとんど発生しなくなる。ここでは特にすり傷の平滑化挙動に着目して検討を加える。

しごき率が 50% と十分大きい場合、図 4 (b) に付記する接触面各位置における周方向粗さ曲線を見ると、パイプ表面の平滑化は次のような過程を経て進行することがわかる。しごき変形によってコンテナ内面とパイプ外表面間には高面圧下で微小の相對滑りが生じるが、この条件のもとで、パイプ初期表面に存在したすり傷は入口から順次つぶされて消滅し(入口からの位置 2~5)、その後表面は平滑化されていく(同 6~9)。接触面出口に近づくに従い相對滑り速度は減少していくが(図 10 にて後述)、そうなるに徐々に転写が始まり(入口からの位置 10~11)、最終的に高面圧・相對滑り速度零の条件下にある出口付近でほぼ完全な転写が行われる(同 12)。位置 10 近傍から出口にかけて面粗さがやや増加するのは、いったん $0.2 \mu\text{m } R_{\text{max}}$ 程度まで平滑化された材料表面にコンテナ面が転写されて、その面粗さ ($0.3 \sim 0.4 \mu\text{m } R_{\text{max}}$, 図 2 参照) に近くなるためである。

すり傷の消滅位置を光学顕微鏡下で観察測定した結果を図 5 に示す。すり傷は、しごき率 $10, 20\%$ の場合は出口に至っても消滅しないが、 30% では出口付近でほぼ消滅し、しごき率が $40, 50\%$ と大きくなるにつれ接触面入口により近い位置で消滅する。このようにパイプ表面すり傷の平滑化はしごき率の増加によって著しく促進される。

4. V 状突起の平滑化挙動

4-1 V 状突起の形成 素材パイプをマイクロビッカース硬度計のベッド上に置き、一定荷重付加のままダイヤモンド圧子をパイプ外表面上軸方向に送るこ

図 3 アルミニウム熱間押出パイプ素材の表面性状

(a) しごき率30%の場合

(b) しごき率50%の場合

図4 熱間押出パイプの内面しごき加工における材料-コンテナ接触面の性状

図5 パイプ表面すり傷の消滅位置

とにより、図6に示すような比較的規則正しい断面形状をもつ多列V状突起を形成することができる。圧子荷重を変更して突起の高さ(溝の深さ)を調整する。主として用いた突起は高さ $14\mu\text{m}$ [図6(a) I]であり、パイプ中央部付近の外表面に 0.1mm 間隔で10本(軸方向長さ 10mm)形成した。また、高さ $7\mu\text{m}$ で間隔 0.07mm (同図II), および高さ $4\mu\text{m}$ で間隔 0.05mm (同図III)の突起2種類も用いた。

4.2 平滑化過程の観察 まず深さ $14\mu\text{m}$ の多列V突起を有する素材パイプに内面しごきを施し加工を中断してパイプを取出す。その後、コンテナ接触面

(a) 突起の断面形状と寸法

(b) 突起形成位置

図6 パイプ表面における微小V突起の形成

の入口から出口に至る区間内の各位置で、表面粗さ計により突起部の円周方向断面形状を測定した。図7に接触面入口からの突起形状の変化を例示する。しごきの進行とともに突起は順次平坦化されていくが、しごき変形部はほぼ平面ひずみ状態(周方向ひずみ $\epsilon_\theta=0$)であるため突起の間隔はほとんど変化しない。突起部

の全幅 L に対する平坦部長さの総和 $\sum L_i$ の割合 $\sum L_i/L \times 100(\%)$ を平滑化率 β と定義する。

図 8 に、コンテナ接触面の入口(しごき変形開始部)から出口(同終了部)に至るまでの間の平滑化率 β の推移を示す。同図(a), (b)はそれぞれパンチヘッド半角 $\alpha=8^\circ$ と 12° の場合である。図のように横軸に入口からの距離 z をとれば、ばらつきは多少あるものの、各しごき率ごとのデータはほぼ 1 本の $z-\beta$ 曲線(二点鎖線)に整理できる。つまり、しごき率が変化しても突起は入口からほぼ同じ過程を経て平坦化される。図中に、各しごき率に対応する接触面出口の位置を記入したが、そこにおける β の値がそのしごき率における最終平滑化率である。 $\alpha=8^\circ, 12^\circ$ いずれの場合も β は入口から約 1.2~1.5 mm までは急増して 90~92% にまで達するが、それ以降の β 増は著しく鈍化する。またしごき率が約 40% に達すると、いずれの α の場合も同様にほぼ 100% の平滑化率が得られる。なお、詳細は省略するが、高さ 7 および 4 μm の突起の平滑化特性も上述とほとんど変わらないことが確かめられた。

4.3 面圧, 母材塑性変形量, 相対滑り量 図 9 に、パンチヘッド半角 $\alpha=8^\circ$ の場合のしごき変形部内の面圧分布 q/S_T , 母材塑性変形量(相当ひずみ $\bar{\epsilon}$ で表示)および平滑化曲線を合わせて示す。面圧 q/S_T の算出に際しては、変形部内は平面ひずみ状態($\epsilon_y=0$)であり、 q はコンテナ側およびパンチヘッド側とも等しいと仮定し、また入口と出口での付加的せん断変形を考慮した⁽¹⁰⁾。工具面摩擦条件は、前報⁽¹⁾を参考にして、 $\mu_c-\mu_p=0.2$ として計算した。 S_T はパイプ材料の引張り強さ(本供試材の場合、 $S_T=110\text{ MPa}$)、 μ_c と μ_p はそれぞれコンテナ内面およびパンチヘッド面の摩擦係

数である。また、相当ひずみ $\bar{\epsilon}$ は、 $\tan \alpha/(2\sqrt{3}) + (2/\sqrt{3})\ln|t/t_0|$ と求められる⁽¹⁰⁾。図から、 q/S_T と $\bar{\epsilon}$ はともにしごき率によらず 1 本の曲線となることがわかる。また平滑化率 β もしごき率によらず 1 本の曲線で表される。

$\mu_c-\mu_p$ が 0.2 程度と大きい場合には、図 9 のように、面圧 q はしごき変形部入口から出口にかけて顕著に増大する。 $z=1.5\text{ mm}$ に至るまでの平滑化率 β の急増は、面圧 q と母材塑性変形量の増大に対応するものと思われるが、それ以降は β の増加率は極端に低下する。V 突起が押しつぶされて偏平な台形状になってい

(a) パンチヘッド半角 $\alpha=8^\circ$ の場合

(b) パンチヘッド半角 $\alpha=12^\circ$ の場合

図 8 材料-コンテナ接触面における V 状突起の平滑化過程

(a) 突起形状の変化過程

(b) 平滑化率の定義

図 7 突起形状の変化過程と平滑化の定量化

図 9 しごき変形部における面圧分布, 母材塑性変形量および平滑化曲線

くと、母材の変形が進み、かつ面圧が増加しても平滑化はかなり進行しにくくなるものと判断される。中村らは、V 突起の押しつぶしにおける接触率と面圧の関係を調べるため工業用純アルミニウム円柱の圧縮試験を行い、ある面圧以上になると接触率はほとんど増加しないと報告している⁽⁶⁾。本実験でもそれと類似の現象が現れていると考えられるが、それでもなお、しごきの進行とともに平滑化率 β は徐々に増加していき、ついには $z=2.8$ mm 付近(しごき率約 40%に相当)でほぼ完全な平滑化($\beta=100\%$)が達成される。この領域では、主に(高面圧下における)母材塑性変形量の増大に起因して平滑化が促進されるものと考えられる。

図 10 は、しごき変形部における材料の流入と流出に関する体積一定の条件からコンテナ内面と材料間の相対滑り量および相対滑り速度 V_s/V を求めた結果である。左縦軸の δ は、位置 z にある材料がしごき変形を受け始めてからの全滑り量を表す。また、右縦軸 V_s/V は位置 z における相対滑り速度である。 $(V_s: \text{滑り速度}, V: \text{パンチヘッド移動速度}, V_s \text{の向きは } V \text{ と同じ})$ 。 δ や V_s/V はしごき率が大きいほど増大するが、図 8(a), (b) および図 9 に示したように、 z に対する β の変化過程はしごき率によらず一定であるから、 β は相対滑り量ないしは滑り速度の影響をほとんど受けないものと考えられる。池らおよび中村らは、突起の平滑化挙動に及ぼす相対滑りの影響についても詳細に調べ、滑り量の増加は平滑化を促進することを明らかにしている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。しかしそれらの実験では、滑り方向は突起の長さ方向に直角であり、本実験の条件とは異なる。滑り方向が突起の長さ方向と一致するという本実験のような場合、平滑化に及ぼす相対滑りの影響は小さいとも判断されるが、この点に関してはさらに詳

細な検証が必要である。

5. 表面すり傷の平滑化機構に関する考察

すり傷と V 突起の違いは、主に深さ(高さ)と形状にあると考えられる。図 11 は両者の初期形状と接触面入口からの平滑化過程を比較したものである。同図 (a) は V 突起に対するもの、(b) は図 4(b) に示すすり傷に対するものである。図 11 中の位置番号 1~5 は、図 4(b) 中の各位置番号に対応する。それぞれ接触面入口から約 0.6 mm までの変化を示すが、図中付記の条件下では $z=0.6$ mm 近傍ですり傷はほぼ消滅する。しかし、V 突起の場合、 $z=0.6$ mm 付近(位置 5)ではまだ初期平滑化過程にあり、平滑化率は 60%程度に達しているにすぎない。

同図(b)1の粗さ曲線を見ると、すり傷は実験で近似するような低周波三角形列(最大高さ 1.2 μm)と、それに沿って不規則に変化する高周波成分から成っているとみなしてもよいと思われる。低周波三角形列を突起の一種と考えれば、その頂角は 177~178°であり、すり傷が存在するとはいってもほとんど平らな面に近い。このような面がしごき変形部に入ると、入口直後の $z=0.1$ mm 付近(位置 2)で、低周波三角形列はほぼ平坦化されて比較的深い高周波成分だけが残留する。この時点ですでに、すり傷は深さ 0.4~0.5 μm の微小溝と、0.2 μm R_{max} 程度の粗さをもつ平坦部から成るほぼ偏平な台形状となり、その後 3~5 の過程を経て消滅していく。このような平滑化過程は、V 状突起の平滑化過程の終期に近く(図 7 参照)、また平坦部の粗さと溝の深さがほぼ同じオーダとなっていく過程である。それゆえ、この場合の平滑化機構は、図 11(a) に示すような V 突起の初期平滑化過程の場合とはかな

図 10 材料-コンテナ接触面における相対滑り量 δ および相対滑り速度 V_s/V

図 11 V 状突起およびすり傷の平滑化過程の比較

り異なるものと考えられる。つまり平滑化に及ぼす面圧の影響は小さくなり、母材塑性変形量および相對滑り量の影響が相對的に強まることが予想される。

以上のように、すり傷の平滑化については、粗さの低周波成分と高周波成分に区分して追跡する必要があることがわかった。低周波三角形列の平滑化は、本研究で試みたV状突起の平滑化に対応するものと考えられるが、両者の差は主に突起頂角の大きさにあるといえる。平滑化に及ぼす突起形状の影響についてはすでに詳細な検討がなされているが⁽⁴⁾⁽⁹⁾、ここではかなり大きな頂角(177~178°)をもつ突起をも含めた解析が必要と考えられる。また、低周波突起部の圧下に続く高周波成分の平滑化についても、溝の深さや分布形態、面圧、母材塑性変形量および相對滑り量などの影響をさらに検討することが必要である。これらについては今後の課題としたい。

6. 結 論

内面しごき法によるアルミニウム押出パイプ表面の平滑化機構について、表面すり傷およびV状突起の平滑化の両面から検討を加え、以下の結論を得た。

(1) パイプ母線に平行に形成した高さ14 μm の突起の押しつぶし実験では、しごき率が変化しても突起はほぼ同じ過程を経て平滑化されることがわかった。すなわち、平滑化はしごき率25%程度までは急激に進展して平滑化率 β は約90%にまで達するが、それ以上のしごき率における β 増は著しく鈍化する。しかし、平滑化は徐々に進展して、しごき率40%でほぼ100%の平滑化率が得られる。平滑化は、 $\beta=0\sim90\%$ の工程では主に面圧の増大に、 $\beta=90\sim100\%$ の工程では

母材塑性変形量の増加に支配されるものと考えられた。また、しごき率が大きくなるとコンテナ内面-材料間の相對滑り量が増大するが、パイプ母線に平行なV状突起に関するかぎり、平滑化に及ぼす相對滑りの影響はあまり認められない。

(2) 熱間押し出し時に形成されたパイプ表面のすり傷(深さ約1 μm)は、しごき率が大きいほど接触面入口より近い位置で消滅する。すなわち、しごき率の増加によって平滑化は著しく促進されるが、これがV突起との大きな相違点である。すり傷の粗さ曲線と消滅過程を詳細に調べた結果、平滑化は粗さの低周波成分と高周波成分に区分して検討すべきことがわかった。すなわち、すり傷の平滑化は、低周波突起部の圧下とそれに続く微小溝の消滅との二つのプロセスから成り、上述のV状突起との相違はこれに起因するものと考えられる。

終りに、アルミニウムパイプを提供していただいた住友軽金属工業(株)に謝意を表する。

文 献

- (1) 齊藤・堂田・河合, 機論, 56-532, C(1990), 278.
- (2) 齊藤・堂田・河合, 平2 塑加春講論, (1990-5), 413.
- (3) Fogg, B., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 182-Pt3K (1967), 152.
- (4) Devenpeck, M. L. and Weinstein, A. S., *J. Mech. Phys. Solids*, 18(1970), 213.
- (5) 河合・近藤・中村, 機論, 39-326(1973), 3181.
- (6) Bay, N., Wanheim, T. and Peterson, A. S., *Wear*, 34(1975), 77.
- (7) 池・井上, 塑性と加工, 30-336(1989), 97.
- (8) 中村・近藤・西ヶ谷, 機論, 56-530, C(1990), 268.
- (9) 池・牧野内, 塑性と加工, 32-366(1991), 848.
- (10) 齊藤・済木・河合, 機論, 52-477, C(1986), 1670.