冷間押出工具表面に設けた微細溝列および潤滑油粘度が アルミニウム製品表面粗さに及ぼす影響

上谷 俊平*・中西 賢二*・鷗野 大樹**・尾崎 正敏***

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 59, No. 7 (2009), pp. 339-343

Effects of the micro groove arrays formed on the tool surface and viscosity of lubricant on surface roughness of aluminum product in cold extrusion

Shunpei KAMITANI*, Kenji NAKANISHI*, Taiki HIBARINO** and Masatoshi OZAKI***

The effects of the micro groove arrays formed on the tool surface, and the viscosity of lubricant, on surface quality of aluminum products were investigated, by carrying out plane strain extrusion experiments. Eight different plane plate tools were prepared for the experiments. One, a flat plane tool without the groove arrays. The other seven were tools with surfaces having micro groove arrays. Those seven tools include, two with the vertical cross sectional profiles of the grooves, two with the depth distributions of the groove arrays and three with locations of the groove arrays on the tool surface. The workpieces (billets) are annealed aluminum, A1050 (JIS), and four paraffinic mineral oils of different viscosity were used as lubricants in the experiments. It was found that the vertical cross sectional profiles and depth distribution of the groove arrays affect the initial extrusion process, and that application of a tool with groove arrays is useful in the extrusion process for obtaining a good surface finished product using a wide viscosity range of lubricants.

(Received November 6, 2008 Accepted April 1, 2009)

Keywords: aluminum, extrusion, groove array, viscosity, surface roughness

1. 緒 言

製品表面性状品質は、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。塑性加工においても、しごき加工などの二次加工において製品表面の鏡面加工が行われており¹⁾、表面仕上げに関して鏡面創成の潤滑機構²⁾や表面平滑化条件³⁾についての検討が行われている。バルク変形を伴う押出加工などの加工工程で表面平滑加工が可能となれば、工程削減、潤滑剤の使用量削減に伴う環境負荷の低減にもつながる。

本論文では、冷間押出加工でのアルミニウム製品表面の平滑化を目的として、平面工具表面に微細溝列を設けた溝列平面工具による平面ひずみ押出加工実験を行い、製品表面性状への微細溝断面形状と潤滑油粘度の影響について検討した。既報⁴⁾では、溝列の配置場所と製品表面性状についての関係を検討し、塑性変形領域に設置した溝列により、製品表面の平滑加工が可能となることを実験的に明らかにした。本報では、U字溝とV字溝の2種類の溝断面形状、および溝列深さ分布の異なる2種類の溝列平面工具を使用して、製品表面性状について溝のない平面工具での実験結果と比較した。また、粘度の異なる4種類のパラフィン系無添加鉱油を使用して、

製品表面粗さと粘度の関係を調べた。溝断面形状と溝列深さ分布が押出初期行程に影響を与えることと、溝列を設けた平面工具による加工法が広い粘度範囲で均一な表面粗さの製品表面仕上げに有用であることを明らかにしたので報告する。

2. 実験装置と実験条件

2.1 実験装置

Fig. 1 は本実験で使用した平面ひずみ押出加工タイプの試験装置を示す。ここで、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45°のテーパダイは分割構造になっている。金型開口部は押出比2に設定した。工具材質はSKD11で、焼入れ、焼戻しを施した。平面工具試験面のビッカース硬さは、760HVであり、表面粗さは、算術平均粗さ R_a で約0.05 μm 、最大高さ R_z で0.4~0.5 μm （溝列をのぞく）に仕上げた。

ピレットには1050アルミニウム（JIS）の焼なまし材（350℃30分保持後炉冷）を使用した。ピレットの実験前のビッカース硬さは約23HVにそろえた。試験面表面粗さは、算術平均粗さ R_a で約0.3 μm に仕上げた。ピレットは、80mm×15mm×5mmの寸法のを2枚合せて使用した。分割面（合せ面）の一方には1mm間隔で幅0.1mm、深さ

* 鹿児島大学大学院理工学研究科機械工学専攻（〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元1-21-40）。Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University (1-21-40 Korimoto, Kagoshima-shi, Kagoshima 890-0065).
E-mail: kamitani@mech.kagoshima-u.ac.jp

** 鹿児島大学大学院理工学研究科大学院生（鹿児島市）〔現在：トヨタ自動車九州（株）〕。Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University (Kagoshima-shi, Kagoshima) (Present: Toyota Motor Kyushu, Inc.).

*** 鹿児島大学大学院理工学研究科大学院生（鹿児島市）。Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University (Kagoshima-shi, Kagoshima).

Fig. 1 Plane strain experimental apparatus, extrusion type.

0.07 mm の V 字溝による正方格子模様をけがき加工してあり、格子線解析⁵⁾により金型内の材料変形機構を調べることが可能である^{4)~6)}。

2.2 実験条件

実験では、製品表面平滑化に及ぼす溝断面形状（溝断面形状は U 字と V 字の 2 種類）と潤滑油の粘度（VG7~VG1000）の影響、および溝列様式（溝列深さ分布 A タイプと B タイプ）について検討を行った。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 Fig. 2 に示す。溝列は押出方向長さ 2 mm 幅に、押出方向に直交する方向へ溝を 1 mm 間隔で 3 本配置した。比較のために溝なし平面工具（工具 P）での実験も行った。溝部は、U 字溝については放電ワイヤカットにより、V 字溝については V 字バイトでフライス加工により加工した。溝角部への面取りや R 加工、溝内部表面仕上げ加工等は行っていない。溝内部の表面粗さは算術平均粗さ R_a で U 字溝が $1.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 、V 字溝が約 $1.5 \sim 3.0 \mu\text{m}$ である。

溝断面形状と溝列設定位置が製品表面に及ぼす影響については、溝列本数が 3 本で溝列設定位置（F, C, R）の異なる溝列平面工具（溝列様式：溝列深さ分布 A タイプ）を準備した。溝列の設定位置は、金型内部の被加工材変形領域内 1 か所（C）と未変形領域で変形領域入口部近傍（R）と出口部近傍（F）の各 1 か所、計 3 か所である。

製品表面粗さと粘度の関係については、溝列深さ分布 B タイプの溝列平面工具を用いて実験を行った。B タイプの溝列の設定位置は、上述の設定位置 3 か所の中で最も平滑な製品表面が加工できる金型内部の被加工材変形領域内（C）の 1 か所のみである。溝列工具を用いた実験では、押出初期において溝部にアルミニウムが流入するが、押出荷重が定常状態になると溝形状が安定するため流入は生じなくなる。溝列深さ分布 B タイプの溝深さの設定は、既報⁴⁾で示した押出初期の溝へのアルミニウム流入で形成される溝深さ分布を参考にした。すなわち、あらかじめアルミニウムの詰まりやすい押出前方出口部側の溝を最も浅くし、後方入口側の溝が最も深くなるように設計・加工を行った。

金型内潤滑条件（試験面）は、質量 0.1 mg まで読取り可能な分析用電子天秤により、試験油の初期塗布油量を塗布質量で 5 mg (0.48 mg/cm^2) とした。試験油には、粘度の異なる

Fig. 2 Micro grooves location and configuration on plane plate tool.

(a) A type tool (U shape grooves and V shape grooves), (b) B type tool (U shape grooves and V shape grooves).

パラフィン系無添加鉱油 P1 (VG7), P2 (VG32), P3 (VG460), P4 (VG1000) を使用した。溝断面形状と溝列設定位置（F, C, R）が製品表面に及ぼす影響を調べる実験では、溝列深さ分布 A タイプの溝列平面工具と P2 (VG32) を使用した。すべての実験において、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 P3 (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。Table 1 に、各実験時の潤滑油粘度を示す。実験温度における動粘度の算出は Walther-ASTM D 341-77 の式⁷⁾により算出した。

図中での各実験条件は、溝断面形状（溝断面形状は U 字と V 字の 2 種類で、溝のない平面を P とした）、溝列様式（溝列深さ分布 A タイプと B タイプ）、溝列設定位置（F, C, R）および潤滑油種類（P1, P2, P3, P4）により、たとえば UAF-P2（溝断面形状 U 字、溝列深さ分布 A タイプ、溝列設定位置 F-出口部近傍、潤滑油 P2）の表記を行った。

2.3 実験・解析方法

30 トン複動油圧プレスを使用して、平面ひずみ冷間押出加工実験を行った。押出速度が一定となり材料の変形が定常状態となったとき（押出変位 $32 \sim 33 \text{ mm}$ ）、加工を停止してビレットを取出した。押出加工実験中の押出荷重、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で記録した。実験終了後にビレットをコンテナから取出して、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 3 回実験を行ったが、毎回、押出実験後に工具面をアセトンで軽く拭取る程度で再研磨は行わず、次の押出加工実験を実施した。なお、溝列深さ分布 B タイプで潤滑油に高粘度油 P4 を使用した実験では、潤滑油 P3 で 2 回押出実験を行った工具を用いた。

Table 1 Viscosity of paraffinic mineral oils

Lubricant		P1	P2	P3	P4	Experimental condition
Viscosity grade (ISO)		VG7	VG32	VG460	VG1000	
Specific gravity/g·cm ⁻³ (15/4°C)		0.884	0.8698	0.9019	0.9131	
Kinematic viscosity/mm ² s ⁻¹	(15°C)	—	—	—	8041	P-P4
	(22°C)	9.689	72.24	1798	4137	UAF, UAC, UAR, VAF, VAC, VAR
	(30°C)	7.929	47.98	957.7	2090	UBC, VBC, P-P1, P-P2, P-P3
	(40°C)	6.328	30.72	479.4	985.3	
	(100°C)	—	5.355	31.54	50.42

Fig. 3 Comparison of surface roughness on the product surface (A type tool).

3. 実験結果と考察

3.1 製品表面性状に及ぼす溝断面形状と溝位置の影響

Fig. 3 は、3本の溝深さが同じである A タイプ工具について、U 字溝 (UA) と V 字溝 (VA)、およびパラフィン系鉱油 P2 (VG32) を使用した実験でのビレット試験面製品部の表面粗さ (最大高さ) R_z を比較したものである。溝なし工具による製品表面粗さも示している。先に述べたように、溝列工具を用いた実験では、押出初期に溝部にアルミニウムの流入が生じ、定常変形状態になると溝形状が安定する。今回の実験では、既報⁴⁾ よりも溝を深く設定しているため、実験条件 UAC, UAR および VAR については、1 回目 (押出変位 32~33mm) で十分な定常変形状態に達しなかった。これらの条件では、2 回目の実験からアルミニウムの流入のない安定した溝形状での押出実験が可能であった。したがって、これらの条件における 1 回目の実験では、2 回目以降と比べて製品表面粗さが大きい傾向にある。2 回目以降は溝形状も安定し、塑性変形領域内位置 C に溝を設けた工具 (UAC, VAC) において溝形状にかかわらず最も平滑な表面が得られた。これは、既報⁴⁾ とは溝列深さ寸法等が異なるが、同様の傾向であった。未変形領域で変形領域出口部近傍 (F) に U 字形溝を設けた UAF の条件では、3 回の実験とも、二次元切削における構成刃先の生成に類似した現象と考えられる溝端部へのアルミニウム凝着とこれにより製品表面に発生した “きず”

Fig. 4 Comparison of product surfaces of the billets, using tools with A type groove arrays. **Fig. 5** Comparison of surface roughness on the product surface (B type tool).

が認められた。一方、V 字形溝の場合、前記現象は認められず、3 回の実験のいずれも安定した製品表面性状が得られた。**Fig. 4** に 3 回目の実験で得た製品表面写真を示す。

3.2 製品表面性状に及ぼす潤滑剤粘度の影響

Fig. 5 は、溝深さが押出出口方向に行くほど浅くなる B タイプの溝列工具 (UB, VB) で、低粘度油 P1~高粘度 P4 まで粘度を変えて得られた製品表面粗さを比較したものである。溝列設定位置は塑性変形領域内位置 C とした。溝なし工具による製品表面粗さも示した。同一工具で 3 回押出実験を実施したが、潤滑油 P3 で V 字溝 (VBC-P3) の場合に最も平滑な表面が得られた。低粘度油 P1 については P2 や P3 と比べて、

表面粗さが少し大きくなっているが、これは粘度が低いために油膜が薄くなり、工具面とこすれて直接接触する部分が生じたためと推測される。同様に高粘度油 P4 についても表面粗さが大きく増加しているが、これは高粘度であるために厚い油膜が形成されて、溝列部が通過油量を制御できなかったためである。

Fig. 6 は、押出回数 3 回目の製品表面粗さを、横軸に実験時の粘度で整理した。溝なしの平面工具による製品表面粗さも比較するために示した。工具表面の実験前の最大高さ R_z は $0.4 \sim 0.5 \mu\text{m}$ である。溝なし工具では比較的低粘度の限られた領域で平滑な面が得られるのに対して、溝列工具を使用すると、広い粘度範囲で工具表面とほぼ同じ平滑さの製品表面を得られることがわかる。

Fig. 7 に押出回数 3 回目の実験で得られた製品表面写真を示す。溝なしの平面工具による製品表面写真も示している。Fig. 6 において潤滑油 P2 を使用した場合の表面粗さ R_z の測定値はほぼ同じ値を示しているにもかかわらず、写真観察では溝付き工具を使用した場合の方がより均一な表面性状となっていることが確認できる。

3.3 溝形状と溝列様式が押出過程と製品表面性状に及ぼす影響

3.3.1 押出過程への影響

Fig. 8 と **Fig. 9** に、溝列分布が A タイプと B タイプの溝列工具を用いた際の、それぞれ 1 回目と 2 回目の押出荷重を示す。どちらのタイプも、1 回目に、溝へのアルミニウム流

Fig. 6 Relation between the surface roughness of the product surface and the viscosity of lubricant.

Fig. 7 Comparison of product surfaces of the billets, using tools with B type groove arrays.

入の影響で、押出過程初期に荷重が増加しているのがわかる。溝列深さ分布 A タイプの場合、それぞれの条件における被加工材であるアルミニウムの流入量にあまり差はないが、溝列が金型内部にある場合は、荷重増加が著しい。溝への流入を

Fig. 8 Comparison of extrusion load—press ram stroke curves, using tools with A type groove arrays. (a) Results of the first extrusion test, (b) Results of the second extrusion test.

Fig. 9 Comparison of extrusion load—press ram stroke curves, using tools with B type groove arrays. (a) Results of the first extrusion test, (b) Results of the second extrusion test.

Fig. 10 Comparison of the micro grooves cross section before any experiment run and after three runs of the experiment.

Fig. 11 Comparison of surface roughness on the product surface (Groove arrays location C, lubricant P2).

あらかじめ考慮した溝列深さ分布を持つ B タイプは、押出実験 1 回目から押出荷重の増加割合も比較的小さく、比較的早い押出段階で溝へのアルミニウム流入が収まり溝形状は安定する。また、溝列深さ分布 V タイプのほうが U タイプよりも押出 1 回目の荷重変動が小さく、アルミニウムの流入による溝部形成時の金型への負荷も小さいことがわかった。

Fig. 10 に、実験前と 3 回目の押出加工実験終了後の溝列形状の一例 (UAC-P2, UBC-P2, VAC-P2, VBC-P2) を、押出方向への工具面断面曲線で示す。すべての溝列において、アルミニウムが流入して溝形状に変化が見られる。しかし、溝列深さ分布 A タイプと B タイプを比較すると、押出荷重の増加割合の比較的小さな、押出方向に深さ分布の異なる B タイプの溝列では、A タイプの溝列よりも溝形状が保持されているのがわかる。

3.3.2 製品表面性状への影響

2 種類の断面形状と 2 種類の溝列分布に対して、設置位置 C での製品表面粗さを比較したのが Fig. 11 である。工具表面粗さと押出回数について比較すると、溝列深さ分布 A タイプで U 字溝を使用した押出 1 回目の実験で工具よりも粗い表面となっているが、それ以外の条件では工具とほとんど同じ表面粗さに仕上がっている。このことから U 字溝よりは V 字溝のほうが押出 1 回目から安定した製品表面粗さとなってい

Fig. 12 Comparison of surface roughness R_a of the billets along the plane plate tool in the third extrusion test (B type tool, lubricant P3).

ることがわかる。また、溝列深さ分布は B タイプのほうが、A タイプよりも 1 回目から安定した仕上げ表面となることもわかる。

Fig. 12 は工具試験面に沿ったビレット表面粗さの分布を示す。潤滑油に P3 を使用した場合、溝なし工具と溝列工具で比較した。溝列工具では、溝列を設置した $y=6\sim9$ mm 付近において油量が著しく制限され、かつ、ほぼ一定量の少量の油量になっているのが、表面粗さの分布からわかる。これにより、溝なし工具と比べて、溝列工具が平滑面を形成するのに必要な最小油膜を形成させる役割を果たしていることがわかる。U 字溝と V 字溝での溝形状の違いは表面粗さ分布に影響していない。

4. 結 言

平面工具表面に微細溝列を設けて平面ひずみ押出加工実験を行い、溝断面形状と溝列様式 (溝列深さ分布)、潤滑油の粘度の違いが製品表面性状に及ぼす影響を検討し、次の結果を得た。

- (1) 溝列を塑性変形領域内工具面上に設けると、製品の表面仕上げが向上する。
- (2) V 字溝のほうが、U 字溝の場合よりも安定した製品表面性状を得ることができる。
- (3) 溝列工具を使用すると、広い粘度範囲で工具表面とほぼ同じ平滑さの製品表面を得ることができた。

参 考 文 献

- 1) H. Kudo and A. Azushima: Proc. 2nd ICTP, (1987), 373-384.
- 2) 河合 望, 堂田邦明, 斉藤正美, 林 伸和, 王 志剛: 日本機械学会論文集 C 編, **55** (1989), 2885-2891.
- 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** (1990), 2794-2801.
- 4) 上谷俊平, 中西賢二, シャルライル サミオン: 軽金属, **58** (2008), 111-116.
- 5) 中西賢二, 岡村俊一, 中村正久: 塑性と加工, **18** (1977), 990-998.
- 6) 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** (2005), 877-885.
- 7) 日本潤滑学会編: 改訂版潤滑ハンドブック, 養賢堂, (1987), 210.