塑性加工における被加工材表面微細凹部の 潤滑効果に及ぼす滑り条件の影響*

王 志 剛^{*1}, 堂 田 邦 明^{*1}
春 山 義 夫^{*2}, 横 井 信 安^{*2}

Effects of Sliding Conditions on Improvement of Lubrication with Micro Pits in Metal Forming

Zhrgang WANG^{*3}, Kuniaki DOHDA,
Yoshio HARUYAMA and Nobuyasu YOKOI

^{*3} Gifu University, Dept. of Mechanical Systems Engineering,
1-1 Yanagido, Gifu, Gifu, 501-1193 Japan

A series of experiments have been conducted using a rolling-type tribometer to investigate the mechanism and lubricating effects of the outflow behavior of lubricant trapped in a pit. Experiments using aluminum and mild steel sheets with regularly arranged pits showed that lubricant flows out along the friction stress direction and moves larger distance with increasing sliding ratio. The outflow trace becomes deeper with increasing the forming velocity or oil viscosity. Based on these facts, it was concluded that lubricant trapped in a pit flows out by MPHL (Micro Plasto-Hydrodynamic Lubrication) mechanism. With an increase of sliding ratio, the friction coefficient of both the pit region and blank region increases when the blank surface is smooth, but decreases when the blank surface is rough. The lubricating improvement effects of pits are largely dependent on the lubricating regime in the blank region and disappear rapidly with the shift of the lubricating regime in the blank region from the boundary lubrication to the hydrodynamic lubrication.

Key Words: Tribology, Plastic Forming, Friction Coefficient, Oil Pit, Sliding Ratio, Forming Speed, Oil Viscosity, Lubricating Regime

1. 緒 言

前報⁽¹⁾においては、被加工材表面に微細凹部を規則的に配置し、その凹部(オイルピット)内の潤滑油の流出挙動および減摩効果に及ぼすピットの密度、配置等のピット自体に関連する諸因子の影響について検討した。その結果、油は相対滑りによって引き出されて、油の粘度が大きいほど、被加工材が軟質であるほど、その流出量が多いことが認められた。ピットの存在による摩擦係数の低減効果は、ピットの面積比が大きいほど、ピットが小さいほど、ピット周辺表面が平滑であるほど大きく、ピットを並列配置するより千鳥配置したほうがその効果が一層大きくなることが認められた。

この結果から、工具・被加工材間の相対滑り条件を変えれば、油の流出状況およびその減摩効果が変わることが想定される。そこで本報では、加工速度、滑り率を変えて、油の流出状況および減摩効果の変化につ

いて調べる。

2. 実 験 条 件

2.1 試料 供試圧延板として、前報と同様に板厚 0.985 mm のアルミニウム硬質板(A 1085-H 26)と板厚 1.0 mm のダル仕上げ鋼板(SPCE)を用いた。鋼板の表面性状は、供試圧延板のままの粗面(板幅方向粗さ $4.5 \mu\text{m Ry}$)とエメリー紙で仕上げた平滑面(板幅方向粗さ $0.59 \mu\text{m Ry}$)との2種類とした。長手方向が圧延方向と一致するように幅 10 mm、長さ 600 mm の帯板を採取し、その表面に超硬製圧印金型⁽¹⁾を押し付けて圧印して、 $0.2 \times 0.2 \times 0.04 \text{ mm}$ (深さ)の四角すい台形大ピットと $0.05 \times 0.05 \times 0.01 \text{ mm}$ (深さ)の小ピットを作製し、その際ピットの周辺に生じた盛り上がりや圧下率 5% の圧延で平坦化したものを試料とした。図 1 に試料寸法およびピットの配置例を示す。

2.2 摩擦試験機 図 2 に本実験に用いた試験機の構造⁽²⁾を示す。駆動ロールの回転数は 1 500 rpm までの範囲内で任意に変えることができ、摩擦ロールはギャボックス内の歯車を交換することにより、駆動ロールの回転数の 1/1~1/15 の間で 6 種類に設定でき

* 原稿受付 1999 年 3 月 12 日。

^{*1} 正員、岐阜大学工学部(☎ 501-1193 岐阜市柳戸 1-1)。

^{*2} 正員、富山県立大学工学部(☎ 939-0398 富山県射水郡小杉町黒河 5180)。

E-mail: wang@mech.gifu-u.ac.jp

Fig.1 Description of workpiece

る。この設定によって、同一の加工速度で滑り率を変えることができる。

駆動ロールに作用する垂直力は、支柱に取付けられた2個のロードセルによって検出し、摩擦ロールに作用する摩擦力は、摩擦ロール軸に取付けたトルク検出器によって計測する。これらの値を用いて摩擦係数 μ を算出し、摩擦状態の評価尺度とする。

2.3 実験条件 表1に摩擦試験条件を示す。滑り率は0.33, 0.82, 0.95の3通り、加工速度は低速の0.058 m/sと高速の1.2 m/sの2通りとした。潤滑油はパラフィン系鉱油の高粘度油 P 460 (25°Cにおける動粘度 $1500 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)と低粘度油 P 10 (25°Cにおける動粘度 $48.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)の2種を用いた。鋼板の場合、圧下率40%では、平滑面試料の定常加工が得られないため、圧下率20%とした。

3. 実験結果

3.1 摩擦係数 前報同様、行程100 mm以降のブランク部の摩擦係数の平均値をブランク部摩擦係数、ピット部の摩擦係数の平均値をピット部摩擦係数の代表値として用いる。

図3にA 1085-H 26の大ピット試料で、低速における摩擦係数と滑り率の関係を示す。滑り率の増加に伴い、ブランク部、ピット転写部の摩擦係数がともに増加している。その増加量は低粘度油ほど大きい。ピットの存在による摩擦係数の変化は滑り率が大きいほど、油の粘度が低いほど大きくなっている。

Fig.2 Rolling-type tribometer

A 1085-H 26 の小ピット試料においても、同様な傾向が見られた。

図4にA 1085-H 26の大ピット試料の高速における摩擦係数と滑り率の関係を示す。低速の場合と同様、滑り率の増加に伴い、摩擦係数が増加し、その増加量は低粘度油ほど大きくなっている。ピットの存在による摩擦係数の変化をみると、低粘度油 P 10 では、低速の場合と同様摩擦係数が減少しているが、高粘度油 P 460 では、ピットの存在によって摩擦係数がかえって大きくなっている。これは、ピットの存在が常に摩擦係数の低減につながるとは限らないことを示している。ピットの存在による摩擦係数の変化は滑り率が大きいほど、油の粘度が低いほど、また、ピットを並列配置するより千鳥配置したほうが大きい。

図5にSPCE試料における摩擦係数と滑り率の関係を示す。滑り率の増加に伴い、ブランク部摩擦係数が平滑面試料では増加しているが、粗面試料では減少している。ピットの存在によって摩擦係数は平滑面試料では小さくなるが、粗面試料ではかえって大きくなっている。このピットの存在による摩擦係数の変化は、アルミニウム試料と同様、滑り率が大きいほど、ピットを並列配置するより千鳥配置のほうが大きい。

このように、滑り率、加工速度、ピット周辺の表面性状を変えて滑り条件を変化させると、ピットによる潤滑改善効果に大きな差がみられる。特に滑り率 $\delta = 0.33$ では、ピットの存在による摩擦係数の変化はいずれの条件においても認められなかった。これは、通常の圧延加工のような低滑り率の加工においてはピットの存在による摩擦係数の低減はあまり期待できないことを示唆している。また、高粘度油・高速あるいは粗面試料の場合にはピットの存在によって摩擦係数がかえって大きくなることから、ピットの存在が逆に潤滑状態の悪化を招く場合もあることを示している。

3.2 加工後の試料表面性状 図6に高粘度油、低速での加工後の試料表面性状を示す。滑り率の増加に伴い、ブランク部では擦過傷の割合が増加し、滑り

Table 1 Experimental conditions

Experiment code	Workpiece material	Pit			Velocity of traction roll, V_T , m/s	Sliding ratio, δ	Working reduction, r	Lubricant (viscosity at 25°C)	Tool material (surface roughness)	Room temperature
		Size	Array	Ratio of area						
A	A1085-H26	Small	Parallel Cross	1/8	0.058	0.33 0.82 0.95	40%	P460 ($1500 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$) P10 ($48.2 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)	Friction roll SKD11 ($0.2 \mu \text{mRy}$) Traction roll SKD11 ($30 \mu \text{mRy}$)	$20 \pm 1^\circ \text{C}$
B		Large			1.2					
C	A1085-O	Large			0.058					
S	SPCE									
R

(a) P 460

(b) P 10

Fig. 3 Variations in friction coefficient with sliding ratio at low rolling speed (A 1085-H 26, Large pit)

(a) P 460

(b) P 10

Fig. 4 Variations in friction coefficient with sliding ratio at high rolling speed (A 1085-H 26, Large pit)

率 $\delta=0.95$ では全面が擦過傷面となっている。ピット転写部では、ピット内の油はピット後方へ流出し、流出痕の深さは滑り率の増加に伴い小さくなっている。図 7 に高粘度油、高速での加工後の試料表面性状を示す。滑り率の増加に伴い、ブランク部では全面に滑り帯(加工方向にほぼ垂直な波模様)が現れる性状から滑り帯と若干の擦過傷が入り混じった性状に変化していく。ピット転写部では、高滑り率でピット後方にピット内の油の流出痕が見られるほか、ブランク部表面性状と比較して油膜の薄い部分がピット後方の遠いところ

ろに見られる。接触入口部では、ピット直後の油膜もブランク部の油膜よりかなり薄くなっていると考えられる。図 8 に低粘度油、高速での加工後の試料表面性状を示す。滑り率の増加に伴い、ブランク部では擦過傷の割合が増加し、滑り率 $\delta=0.95$ ではマイクロ凝着を含む全面擦過傷面となっている。ピット転写部では、高滑り率の場合ピット後方にピット内の油の流出痕が見られる。前報に示したように、低速ではピット後方において擦過傷の著しい軽減が見られるが、油の流出痕が認められないことから、加工速度の増大はピット

Fig. 5 Variations in friction coefficient with sliding ratio for SPCE

Fig. 6 Rolled surface appearances at low rolling speed (A 1085-H 26, Small pit, P 460)

内の油の流出を促進すると考えられる。

図 9 に高粘度油における流出痕の長さを示す。流出痕の長さはピット転写部の最後のピット列についてピット後端から流出痕の先端までの距離として光学顕微鏡によって測定した。加工速度の大小によらず、滑り率の増加に伴い、流出痕の長さは直線的に増加している。工具・被加工材間の相対滑り距離が滑り率と比例関係にあることから、流出痕の長さは工具・被加工材間の相対滑り距離の増加に伴い線形に増加するといえる。図 10 に高粘度油における流出痕の深さの変化を

示す。ピットから遠ざかるにつれて、滑り率の小さい場合には、流出痕が急激に浅くなるが、滑り率の大きい場合には、流出痕の深さはほぼ一定に保った後徐々に減少していく。ピット直後の流出痕深さはおおむね滑り率が小さいほど、また、加工速度が大きいほど大きくなっている。

4. 考 察

4.1 摩擦係数 最初に、プランク部摩擦係数について考察する。滑り率の増加に伴う摩擦係数の増加

Fig. 7 Rolled surface appearances at high rolling speed (A 1085-H 26, Large pit, P 460)

は、加工後表面性状から推定できるように導入油量の減少およびロール・被加工材間の相対滑り距離の増加によるものと考えられる。加工速度あるいは潤滑油粘度の増加に伴う摩擦係数の大幅の低減も導入油量の増加に起因していると考えられる。SPCE 粗面試料における滑り率の増加に伴う摩擦係数の減少は、既報⁽³⁾に述べたとおり、滑り率の増加に伴う油膜の均一化による潤滑改善の現れである。

次にピットの減摩効果について考察する。3章に述べた加工後の試料表面の観察結果に基づいて、各実験条件におけるブランク部加工中のロール・被加工材間の潤滑状態を推測した結果を表2に示す。本実験において、ブランク部加工中の潤滑状態は固体摩擦を含む境界潤滑状態から流体潤滑状態までの広範囲に及んで

いることがわかる。このブランク部潤滑状態別にみたブランク部とピット転写部における摩擦係数の大小関係を表3に示す。表中の記号はブランク部とピット転写部における摩擦係数の大小関係を示しており、その開きの大きさは摩擦係数の差の大きさを示す。これより、滑り率0.33と小さい場合、いずれの潤滑状態においてもピットによる摩擦係数の低減が見られないが、滑り率0.82以上の場合では、境界潤滑状態においてはピットによる潤滑改善が大幅にみられるが、混合潤滑あるいは流体潤滑状態においてはピットの存在が逆に潤滑状態の悪化を招くことがわかる。すなわち、ピットの潤滑改善効果はピットを有しないブランク部の潤滑状態が悪いほど顕著に現れる。混合潤滑状態あるいは流体潤滑状態におけるピットによる摩擦係数の増

Fig. 8 Rolled surface appearances at high rolling speed (A 1085-H 26, Large pit, P 10)

Fig. 9 Length of outflow trace (A 1085-H 26, Large pit, P 460)

加は、図7にみられるように、ピットの存在によってピット後方の平坦部では接触入口部での導入油量が減少し、ピット内の油の流出がそれを補いきれないために、油膜のかなり薄い部分が現れるためと考えられる。

4.2 ピット内の油の流出機構 ピット内の油の流出挙動はピット周辺のシール状況によって異なると思われる。本実験において、SPCE 粗面試料を用いた場合、また、アルミニウム試料を高粘度油・高速度・低滑り率で加工した場合、ブランク部の加工後表面[図7(a.1)]には滑り帯模様が発達しており、加工中の接触界面ではその表面粗さと同程度の油膜が存在したと思われる。ピット転写部でも、ピット前後を除けば表面はブランク部表面とほぼ同様な性状を示してい

(a) $V_r = 0.058 \text{ m/s}$ (b) $V_r = 1.2 \text{ m/s}$

Fig. 10 Depth of outflow trace (A 1085-H 26, Large pit, P 460)

る [図7(a・2), (a・3)]. ピット内の潤滑油は加工中このピット周辺部の $0.5 \mu\text{m}$ 程度のマイクロオーダーの凹凸を通して流出すると思われる。そのため、加工後表面には顕著な流出痕が見られなく、実験結果でも示したようにピットによる摩擦の低減が期待できない。しかし、実加工においてはオイルピットの周辺に $0.5 \mu\text{m}$ 程度以上のマイクロオーダーの流出通路(シール欠陥)を有する場合はごくまれで、ほとんどの場合ピットの周辺は境界潤滑に近い状態にあると思われる。以下、ピット周辺は境界潤滑に近い状態にあると想定して議論を進める。この場合、3・2節と前報で述べた観察結果をまとめると

- (1) ピットに油が閉じ込められる場合、ピットは周囲の表面層材料と同一に伸ばされる。
- (2) 油の流出方向は摩擦せん断応力方向である。
- (3) 油の流出痕は滑り率の増加に伴い、浅く長くなる。
- (4) 油の流出痕の長さは相対滑り距離の増加に伴

Table 2 Lubricating regime in blank region

Material	Aluminum						SPCE			
Lubricant	P460			P10			P460		P10	
δ Code	A	B	C	A	B	C	S	R	S	R
0.33	ML	HL	HL	BL	ML	BL	ML	HL	ML	HL
0.82	BL	HL	BL	BL	BL	BL	BL	HL	SF	HL
0.95	BL	ML	BL	BL	BL	BL	BL	ML		HL
	+ SF		+ SF	+ SF	+ SF	+ SF				+ ML

The codes correspond to the experiment code in table 1.

SF means Solid friction. BL means Boundary lubrication. ML means Mixed lubrication. HL means (micro) Hydrodynamic lubrication.

い、線形に増加する。

(5) 油の流出痕から推定して油の流出量は、油の粘度が高いほど、加工速度が大きいほど、ひずみが大きいほど、被加工材が軟質であるほど、多くなる。

このような結果は既報⁽⁴⁾で述べた相対滑りによる引出しという油の流出機構を裏付けるものである。油の流出機構に関しては、ピット内の油圧が比較的小さな被加工材変形量でピット周辺の接触圧と同一になること、ピットエッジ部の油圧が周辺の接触圧と同一になればピット内の油は流出するという考え方が報告されている⁽⁵⁾。これらを踏まえて、油の流出過程を模式的に示すと図11のようである。油の流出過程は以下のように想定される。ピット内の潤滑油は被加工材の塑性変形によって加圧され、ピット周辺の接触部の面圧と同一な油圧になるまでピットが加工方向に伸ばされながらその底部が盛り上がる。油圧が周囲の接触面圧と同程度になると、油は相対滑りによって引出される。圧力分布の推定においては、ピット内でのくさび作用は無視し、流出痕内での油膜厚さは先端部を除いて一定とし、流出痕の後方は境界潤滑あるいは混合潤滑状態にあると仮定した。油膜圧力は流出痕の先端部ではくさび作用により急激に上昇し、さらに後方では流体潤滑状態になるには潤滑油が不足しているため急激にピット内の油圧までに下がっていく。流出痕先端部での高い油膜圧力が被加工材表面層を局部的に変形させて、相対滑り距離に比例して流出痕が長くなっていくと考えられる。このプロセスにおいて、油の粘度が高いほど、加工速度が大きいほどくさび先端に発生する圧力が高く、被加工材が軟質であるほど変形しやすいため、流出痕が深くなる。また、ひずみ量、滑り率が大きいほど、相対滑り距離が大きく流出痕が長くなる。

以上の結果および考察を総合すると、通常の加工にみられる潤滑条件下においては、ピット内の潤滑油は

Table 3 Variations in lubricating effects of pits with lubricating regime in blank region

Lubricating regime		Boundary lubrication		Mixed lubrication		Hydrodynamic lubrication	
		$\delta = 0.33$	$\delta = 0.82, 0.95$	$\delta = 0.33$	$\delta = 0.82, 0.95$	$\delta = 0.33$	$\delta = 0.82, 0.95$
μ	Blank region		∨		Λ		Λ
	Pit region		∨		Λ		Λ

Fig. 11 Schematic illustration of outflow process

相対滑りによってピット周辺部に引き出され、流体潤滑的に拡がっていき、いわゆる MPHL (Micro Plasto-Hydrodynamic Lubrication) 機構によって流出すると結論づけることができる。

5. 結 言

被加工材表面にオイルピットを規則的に配置し、ピット内の油の流出挙動およびその減摩効果に及ぼす滑り条件の影響について検討した。その結果をまとめると以下ようになる。

(1) ピットに閉じ込められた油は相対滑りによる引出しによって流出し、流出現象に関して新たに以下のことが認められた。

(a) 油の流出痕は滑り率の増加に伴い浅く長くなる。

(b) 油の流出痕の長さは相対滑り距離の増加に伴い線形に増加する。

(c) 油の流出量は加工速度が大きいほど多くなる。

これらの事実に基づいて、通常の加工に見られる潤滑条件下ではピット内の油の流出は MPHL 機構によると結論することができる。

(2) ピットを有しないブランク部の表面が平滑な場合、滑り率の増加に伴い、ブランク部、ピット転写部とも摩擦係数が増加する。一方、ピットを有しないブランク部の表面が粗い場合、滑り率の増加に伴い、ブランク部、ピット転写部とも摩擦係数が減少する。

(3) ピットによる潤滑改善効果はピットを有しないブランク部の潤滑状態が悪いほど顕著となる。すなわち、ブランク部の潤滑状態が境界潤滑状態から流体潤滑状態への移行に伴い、ピットによる潤滑改善効果が急激に小さくなっていく。

本研究で用いた圧印金型の製作にあたり、ご助力いただいた富山県立大学植松哲太郎教授に深甚の謝意を表す。

文 献

- (1) 王志刚・堂田邦明・春山義夫・横井信安, 機論, **65**-636, C (1999), 3408-3415.
- (2) 堂田邦明・柏谷智・中村保・王志刚・横井信安・春山義夫, 機論, **60**-572, C (1994), 1364-1370.
- (3) 堂田邦明・王志刚・横井信安・春山義夫, 機論, **61**-591, C (1995), 4476-4483.
- (4) 王志刚・近藤一義・森敏彦, 機論, **59**-561, C (1993), 1560-1566.
- (5) 小豆島明・坪内昌生・工藤英明・古田憲明・峯村憲, 塑性と加工, **30**-347 (1989), 1631-1638.
- (6) Mizuno, T. and Okamoto, M., *Trans ASME J. Lub. Tech.*, **104**-1 (1982), 53-59.
- (7) 池浩, 塑性と加工, **34**-393 (1993), 1075-1081.