高速塑性加工における摩擦に及ぼす被加工材表面粗さの影響*

堂 田 邦 明^{*1}, 王 志 剛^{*2}
横 井 信 安^{*2}, 春 山 義 夫^{*2}Effects of Surface Roughness of Workpiece on Friction Behavior
in Metal FormingKuniaki DOHDA, Zhrgang WANG,
Nobuyasu YOKOI and Yoshio HARUYAMA

A series of experiments have been conducted using a rolling-type tribometer to investigate the effects on friction behavior of the average velocity of the lubricant at the inlet to the contact zone V and the relative sliding velocity ΔV during deformation. Experiments using mild steel strips with various kinds of surface texture for various lubricants showed that the variation in the friction coefficient with V and ΔV is largely dependent on the initial surface texture of the workpiece. With increasing V , the friction coefficient decreases for the smooth surface workpiece, but increases for the rough surface workpiece. With increasing ΔV , the friction coefficient remains constant under small V and decreases at large V for the smooth surface workpiece but decreases at all times for the rough surface workpiece. Observation of the rolled surface suggested that friction was determined by the performance of the lubricant film. With increasing V , the surface is roughened for the smooth surface workpiece and oilpits largely remained for the rough surface workpiece. With increasing ΔV , the rolled surface became smooth for the rough surface workpiece.

Key Words: Tribology, Plastic Forming, Surface Roughness, Friction Coefficient, Average Velocity, Sliding Velocity

1. 緒 言

前報⁽¹⁾では、相対滑り速度と潤滑油導入速度の摩擦現象に及ぼす影響を分離して検討できる塑性加工用摩擦試験機を試作し、ダル仕上げ冷延鋼板の摩擦試験を行い、摩擦現象に及ぼすこれらの速度因子の影響について検討した。その結果、相対滑り速度の増加あるいは潤滑油導入速度の減少に伴い、加工後の試料表面においてはオイルピット部と平坦部との粗さの差が縮まり、油膜が均一分布に近づくこと、それに伴って、摩擦係数は減少することが確認された。これらの結果から、摩擦係数は、接触界面における油膜の存在状態に支配されることを指摘した。

本報では、被加工材の表面粗さを種々に変更することにより、意図的に接触界面での潤滑モードを境界潤滑から流体潤滑まで広範に変化させ、おのおのの潤滑モードにおける潤滑油導入速度と相対滑り速度が摩擦現象に及ぼす影響について調べた。その結果、被加工材の表面粗さの大小によって、潤滑油導入速度と相対

滑り速度の摩擦現象に与える影響はまったく異なることが明らかとなったので以下に報告する。

2. 記 号

用いる記号は以下のとおりである。

V_0 : 素材の速度

V_1 : 加工後の試料の速度

V_f : 摩擦ロールの周速度

V_i : 加工速度(駆動ロールの周速度)

V : 試料と摩擦ロールとの接触界面の入口における油の導入速度, $V = (V_0 + V_f)/2$

ΔV : 試料と摩擦ロールとの相対滑り速度

$\Delta V = V_m - V_f$, ただし, $V_m = (V_0 + V_1)/2$

δ : 滑り率, $\delta = (V_m - V_f)/V_m$

N_D : 駆動ロールに作用する垂直力

F_D : 摩擦ロールに作用する摩擦力

μ : 試料と摩擦ロールとの接触面における平均摩擦係数, $\mu = F_D/N_D$

σ : 素材の降伏応力

ε : 塑性ひずみ

3. 実験装置および実験条件

3・1 試験機の原理および構造 図1に試験機の

* 原稿受付 1994年12月28日。

^{*1} 正員, 岐阜大学工学部 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)。

^{*2} 正員, 富山県立大学工学部 (〒939-03 富山県射水郡小杉町黒河5180)。

原理を示す。本試験機主要部は、直径の異なる二つのロールから構成されている。試料は、駆動ロールとの摩擦力によってロール間に引き込まれ、塑性変形を受ける。駆動ロール表面は放電加工を施し、粗さが約 $40\text{ }\mu\text{m}$ R_{max} の粗面とした。変形量は、駆動ロールを上下に微動調整し、ロール間隔を変化させることにより任意に設定できる。

図2に試験機の構造を示す。摩擦ロールの回転数は、ギヤ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 $1/1 \sim 1/15$ の間で6種類に設定できる。この設定によって、潤滑油の接触界面への導入速度 V とその界面での相対滑り速度 ΔV とを独立に変更することができる。

駆動ロールに作用する垂直力 N_d 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 F_d 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、摩擦状態の評価量とする。

3.2 実験条件 供試圧延板として板厚 1.0 mm の軟鋼板を用いた。その塑性曲線は、 $\sigma = 540\varepsilon^{0.224}$ によって近似される。加工方向(長手方向)が圧延方向と一致するように幅 9.8 mm 、長さ 1.0 mm の帯板を採取し、試験片とした。試料表面粗さは、本試験機で異なる潤滑条件で8%の圧下率を加え、図3に示すような3

種類とした。

潤滑油としては、パラフィン系鉱油2種を用いる。表1にその粘度を示す。

表2にその他の加工条件をまとめて示す。

3.3 実験方法 実験は、次の手順で行う。試料、ロール表面をアセトンを用いて十分脱脂する。冷風乾燥後、試料に潤滑油を塗布し、挿入ガイドを通して回転ロール間に挿入し、加工を行う。実験は、同一条件

(a) No.1 試料

(b) No.2 試料

(c) No.3 試料

図3 試料表面性状

図1 試験機原理

図2 試験機構造

表 1 潤滑油の粘度

Paraffinic mineral oil	Viscosity $\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$		
	at 25°C	40°C	95°C
P26	48.2	26.0	5.35
P460	1500	460	30.0

表 2 加工条件

Working reduction, r	20%
Tool material (surface roughness)	Friction roll SKD11($R_{\text{max}}=0.2 \mu\text{m}$)
	Traction roll SKD11($R_{\text{max}}=40 \mu\text{m}$)
V_f/V_t	63/100, 15/100, 4/100
δ	0.29, 0.82, 0.95
Room temperature	$20 \pm 1^\circ\text{C}$

(a) 高粘度油 P 460

(b) 低粘度油 P 26

図 4 加工速度 V_t が摩擦係数 μ に及ぼす影響

で3回繰返し、再現性を見るときにすべての結果を検討の対象とする。

4. 実験結果および考察

4.1 摩擦係数 μ の変化 本実験において、加工初期と末期を除いて、加工行程中、 F_D と N_D は時間的にほとんど変化しなかった。ここでは、行程 700 mm における摩擦係数 μ の定常値を評価尺度として用いる。

4.1.1 加工速度 V_t の影響 図 4 (a) に滑り率 $\delta=0.95$ で高粘度油 P 460 を用いた場合、 V_t の増加に

伴う μ の変化を示す。

V_t が増すと、 μ が減少している。その減少率は、試料の表面粗さが大きいほど小さい。また、試料の表面粗さの増大に伴って、 V_t が 1.0 m/s 以下では、 μ が小さくなっているが、 V_t が 1.0 m/s 以上では、 μ はほとんど変わらないことがわかる。

図 4 (b) に低粘度油 P 26 を用いた場合、 V_t の増加に伴う μ の変化を示す。

V_t の増加に伴い、試料の表面粗さが $0.03 \mu\text{m } Ra$ と小さい場合では、 μ は減少するが、試料の表面粗さが $0.12 \mu\text{m } Ra$ 以上では、 μ はほとんど一定となっている。試料の表面粗さの相違による μ の差に着目すると、試料の表面粗さが大きいほど μ は小さいが、 V_t の増加に伴いその差は小さくなっていることがわかる。

また、図 4 (a) と (b) を比較して、潤滑油の粘度の相違による μ の差をみると、 V_t の小さい領域では、高粘度油 P 460 を使用した場合、 μ は大きくなっているが、 V_t の大きい領域では逆に低粘度油 P 26 の μ は大きくなっている。

他の滑り率 δ においても同様な傾向が見られた。

このように、試料表面粗さの大小によって、摩擦係数に及ぼす加工速度、潤滑油粘度の影響の程度がかなり異なり、接触界面での接触状態はかなり変化するものと思われる。

4.1.2 潤滑油の導入速度 V の影響 図 5~7 に試料 No. 1~3 における V と μ との関係を示す。

表面粗さの小さい No. 1 試料では、 V の増加に伴い、 μ は減少している。その減少率は、高粘度油 P 460 を使用した場合、 V の増加に伴い小さくなっているが、低粘度油 P 26 の場合 V の大小によらずほぼ一定となっている。また、 μ は、低粘度油のほうが大きい。

表面粗さが $0.12 \mu\text{m } Ra$ と大きくなる No. 2 試料では、 V の増加に伴い、高粘度油 P 460 を使用した場合、 μ はほとんど変化しないが、低粘度油 P 26 の場合、 μ は大きくなっている。その増加率は、 V の増加に伴い小さくなっている。

表面粗さが $2.0 \mu\text{m } Ra$ とさらに大きい No. 3 試料では、潤滑油粘度の大小にかかわらず、 V の増加に伴い、 μ は大きくなっている。その増加率は、 V の増加に伴い小さくなっている。また、潤滑油の粘度の増加に伴って、 V が小さい場合には μ が大きくなっているが、 V が大きい場合には μ はほとんど変わらないことがわかる。

さらに図 5~7 を総じて、 $V=2 \text{ m/s}$ 以上では、表面粗さの相違による μ の差が小さく、 V の変化による μ の変動もかなり小さくなっている。このように、試

図 5 No. 1 試料における潤滑油の導入速度 V が摩擦係数 μ に及ぼす影響

図 8 No. 1 試料における相対滑り速度 ΔV が摩擦係数 μ に及ぼす影響

図 6 No. 2 試料における潤滑油の導入速度 V が摩擦係数 μ に及ぼす影響

図 9 No. 2 試料における相対滑り速度 ΔV が摩擦係数 μ に及ぼす影響

図 7 No. 3 試料における潤滑油の導入速度 V が摩擦係数 μ に及ぼす影響

図 10 No. 3 試料における相対滑り速度 ΔV が摩擦係数 μ に及ぼす影響

料表面粗さの増加に伴い、潤滑油の導入速度の増加による摩擦係数の変化は、減少から増加に転じ、従来認識された μ - V 関係⁽²⁾ は $0.1 \mu\text{m}$ Ra 以上の表面粗さの場合成立しないと考えられる。

4.1.3 相対滑り速度 ΔV の影響 図 8~10 に試料 No. 1~3 における ΔV と μ との関係を示す。

表面粗さの小さい No. 1 試料の場合、 ΔV の増加に伴い、 ΔV の小さい領域では、 μ はほとんど変化しないが、 ΔV の大きい領域では、 μ は減少している。

表面粗さの大きい No. 2 と No. 3 試料では、 ΔV の増加に伴い、 μ は小さくなっている。その減少率は、 V の増加に伴い小さい。

4.2 加工後の試料表面観察 上述した摩擦現象の機構解明の手がかりを得るために加工後の試料表面を光学顕微鏡および触針式粗さ計を用いて観察・測定した。

図 11 に高粘度油 P 460 を使用した場合、No. 1 試料における潤滑油の導入速度 V が表面性状に及ぼす影

図 11 加工後の試料表面性状に及ぼす潤滑油の導入速度 V の影響
(No. 1 試料, P 460 潤滑)

響を示す。 V の増大に伴い、加工方向に平行な擦過傷がほとんど見られなく、初期表面上の条こんが蛇行したようにひずんで残存し、滑り帯(加工方向にほぼ垂直な波模様)が全面に現れる。特に V の大きい場合結晶粒オーダの表面あれが見られる。

図 12 に高粘度油 P 460 を使用した場合、No. 1 試料における相対滑り速度 ΔV が表面性状に及ぼす影響を示す。 ΔV の増大に伴い、油の導入速度 V の小さい領域では、軽い擦過傷が見られるが、 V の大きい領域では、初期表面上の条こんが顕著に残存し、表面あれがいくぶん抑制されていることがわかる。

なお、No. 1 試料において、低粘度油を用いた場合でも同様な傾向が見られた。

図 13 に低粘度油 P 26 を使用した場合、No. 3 試料における潤滑油の導入速度 V が表面性状に及ぼす影響を示す。いずれの場合も、軽い擦過傷と大きなオイ

ルピットが混在している面となっているが、 V の増大に伴い、初期表面上のオイルピットが大きく残存している。また、オイルピット周辺の平坦部の粗さ曲線から、 V の増大に伴って、オイルピット周辺が平滑になっていることがわかる。

図 14 に低粘度油 P 26 を使用した場合、No. 3 試料における相対滑り速度 ΔV が表面性状に及ぼす影響を示す。 ΔV の増大に伴い、初期表面上のオイルピットが小さくなり、擦過傷が消え、滑り帯が顕著に現れることがわかる。

高粘度油を用いた場合、 V および ΔV が加工後の試料の表面性状に与える影響については、油の導入速度の小さい領域では、同様な傾向が見られた。 V の大きい領域では、図 15 に示しているように、 ΔV の大小にかかわらず、擦過傷がまったく見られず、初期表面上のオイルピットがほぼ完全に消滅し、自由表面あれ

図 12 加工後の試料表面性状に及ぼす相対滑り速度 ΔV の影響
(No. 1 試料, P 460 潤滑)

図 13 加工後の試料表面性状に及ぼす潤滑油の導入速度 V の影響
(No. 3 試料, P 460 潤滑, $\Delta V = 0.04 \text{ m/s}$)

図 14 加工後の試料表面性状に及ぼす相対滑り速度 ΔV の影響 (No. 3 試料, P 46 潤滑, $V = 0.03 \text{ m/s}$)

に近い状態になっている。粗さ曲線に見られるように、 ΔV の増加によって、その表面あれはいくぶん抑制されている。

4・3 考察 試料表面粗さが小さい場合、油の導入速度 V の小さい領域では、図 11(a)、図 12(a) に見られるように、接触界面が境界潤滑状態に置かれていると思われる。この場合、摩擦係数 μ が相対滑り速度 ΔV によらず、油の導入速度 V の増加による導入油量の増加に伴い減少するという本実験の結果(図 5, 8)は、従来の認識と一致する⁽³⁾⁽⁴⁾。この場合、潤滑油粘度が大きいほど、油の導入速度の増加による摩擦係数

図 15 加工後の試料表面性状に及ぼす相対滑り速度 ΔV の影響 (No. 3 試料, P 460 潤滑, $V = 1.0 \text{ m/s}$)

の減少は大きくなっている。これは、潤滑油粘度の増加によって、油の導入量の増加が大きく、潤滑状態の改善は著しいためと思われる⁽⁴⁾。一方、油の導入速度 V の大きい領域では、図 11(b)、図 12(b) に見られるように、接触界面が混合潤滑状態に置かれていると思われる。この場合、摩擦係数 μ が油の導入速度 V の増加による油の導入量の増大に伴って、わずかではあるが依然減少している。また、相対滑り速度の増加に伴って、摩擦係数 μ がかなり減少する(図 5, 8)。これは、相対滑り速度の増加によって、表面あれが抑制され[図 12(b)]、油膜の均一化による摩擦抵抗の低減⁽⁵⁾と、 ΔV の増加に伴う温度上昇⁽⁴⁾による粘性抵抗の低減によるものと考えられる。

試料表面粗さが大きくなるに伴って、表面粗さによる油の持込み量が増加し、油の導入速度 V による油の導入量の摩擦への影響は相対的に小さくなる。特に、表面粗さによる油の持込み量が油の導入速度 V による油の導入量に比較して、多くて支配的になる場合、 V の増大に伴う油の導入量の増加による摩擦の低減効果よりも V の増大による接触界面での油の存在状

況の変化が摩擦に大きな影響を与えることもあり得ると思われる。図 6, 7 に見られるように、試料表面粗さの増大に伴って、 V の増加による μ の変化は増加に転じている。これは、 V の増加に伴って、表面粗さによって持込まれた油の周辺への流出量が少なく、潤滑効果は小さいためと思われる(図 13)。また、図 9, 10 に示した相対滑り速度 ΔV の増加に伴う摩擦係数 μ の減少は、油膜の均一化による摩擦抵抗の低減と、 ΔV の増加に伴う温度上昇による粘性抵抗の低減によるものと考えられる。

5. 結 言

軟鋼板を対象として、高速塑性加工における摩擦に及ぼす被加工材表面粗さの影響、特に被加工材表面粗さによって摩擦に与える潤滑油の導入速度と工具・被加工材間の相対滑り速度の影響の変化について検討を加えた。その結果をまとめると以下ようになる。

(1) 加工速度の増加に伴い、摩擦係数 μ が減少し、その変化の度合いは、潤滑油の粘度が高いほど、試料表面粗さが小さいほど大きい。また、試料表面粗さの増大による摩擦係数の減少は加工速度の増加に伴って小さくなる。

(2) 潤滑油の導入速度の増加に伴い、試料表面粗さの小さい場合では、擦過傷が消え、滑り帯が現れ、

表面あれが発達し、摩擦係数 μ が減少する。一方、試料表面粗さの大きい場合では、潤滑油の導入速度の増加に従い、潤滑油の局所化が目立ち、摩擦係数 μ が増加する。その変化の度合いは、油の導入速度が大きいほど小さくなる。

(3) 相対滑り速度の増加に伴い、試料表面粗さの小さい場合、油の導入速度の小さい領域では、摩擦係数 μ が変化しないが、油の導入速度の大きい領域では、摩擦係数 μ が減少する。さらに、試料表面粗さの大きい場合では、摩擦係数 μ が減少し、その減少率は、潤滑油の導入速度が小さいほど大きくなる。これは、観察結果に基づいて、相対滑り速度の増加による潤滑油の均一化のためと考えられた。

終わりに、軟鋼板を提供していただいたマルヤス工業(株)および潤滑油を提供していただいた三菱石油(株)に謝意を表す。

文 献

- (1) 堂田・柏谷・中村・王・横井・春山, 機論, **60**-572, C (1994), 1364.
- (2) 水野・松原・木村, 機誌, **71**-595 (1968), 1042.
- (3) 水野, 塑性と加工, **7**-66 (1966), 383.
- (4) 阮・工藤・坪内・堀, 塑性と加工, **30**-347 (1989), 1631.
- (5) 王・近藤・森, 機論, **59**-561, C (1993), 1560.