

高速塑性加工用摩擦試験機による潤滑機構に関する研究*

堂田邦明*¹, 柏谷 智*², 中村 保*³
王志剛*⁴, 横井信安*⁴, 春山義夫*⁴

Tribological Phenomena in Metal Forming at High Speed

Kuniaki DOHDA, Satoshi KASHIWAYA, Tamotsu NAKAMURA,
Zhrngang WANG, Nobuyasu YOKOI and Yoshio HARUYAMA

This paper describes the development of an original tribometer to study the effects of the average speed V , average of friction roll speed and workpiece speed at the entrance of a contact zone, and of the relative sliding speed δV during deformation on frictional behavior in metal forming. The configuration used two rollers and hence rolling may be simulated. Mild steel sheets with a dull surface were used as workpieces. It was revealed that the friction coefficient decreases with an increase of δV or with a decrease of V . It was also confirmed that the increase of δV and the decrease of V promote flattening of the workpiece surface and yield good performance of the lubrication film.

Key Words: Tribology, Plastic Forming, Tribometer, Friction Coefficient, Sliding Speed, Surface Roughness, Oil Film Thickness

1. 緒 言

塑性加工において、工具・被加工材間のトライボ現象が加工力、工具寿命などを大きく左右するため、古くから研究がなされ、それに関する知識もかなり蓄積されている。近年、塑性加工の精密化がますます要求されてきており、それを実現するためには、摩擦と表面性状の管制が従来に増して一段と厳しく要求され、工具・被加工材間のトライボ現象に対する理解をさらに深める必要がある。

塑性加工における摩擦・潤滑機構では、工具・材料間の接触界面に導入あるいは封入された潤滑油の量とその界面での油の挙動の2因子の把握が重要となる。接触界面への油の導入機構に関しては、吸着分子層⁽¹⁾、機械的捕捉⁽²⁾、流体力学的効果⁽³⁾⁽⁴⁾などの観点から検討され、定性的にはかなり明らかになっている。一方、接触界面における油の挙動に関しては、最近活発に研究がなされ、閉じ込められた潤滑油の静的な圧力負

担⁽⁵⁾⁽⁶⁾に加え、微視塑性流体潤滑機構^{(7)~(10)}やマイクロプールメカニズム⁽¹¹⁾⁽¹²⁾に見られるように、場合によっては、表面凹部にプールされた油が真実接触部へ進入し得ることが認識されつつある。このことは、接触界面へ導入された潤滑油量が同じであっても、その界面での油の挙動のいかんによって、摩擦力、製品表面の性状がかなり異なり、精密塑性加工を行う上では非常に重要な点と思われる。

実際の塑性加工プロセスにおいて、加工あるいは潤滑条件を変えると、上記した接触界面に導入される潤滑油の量とその界面での潤滑油の挙動の2因子がともに変化し、摩擦の変化に対するそれぞれの単独効果を抽出することは極めて困難である⁽¹³⁾。従来、いずれか一方の効果が小さいとみなして、定性的に論を進めてきたが、摩擦・潤滑機構をより厳密に解明するには、上記2因子の効果の分離検討が不可欠と考えられる。

そこで本研究では、この2因子の摩擦現象に及ぼす影響を分離して検討するため、潤滑油の導入速度と相対滑り速度を広範囲に独立に変更し得る摩擦試験機を試作し、冷延鋼板をモデル素材として摩擦試験を行った。その結果、潤滑油の導入速度と相対滑り速度の影響について、摩擦係数の変化から考察を行い、現象の把握を行ったのでここに報告する。

* 原稿受付 平成5年4月6日。

*¹ 正員、岐阜大学工学部 (〒501-11 岐阜市柳戸 1-1)。*² 岐阜大学大学院。*³ 正員、静岡大学工学部 (〒432 浜松市城北 3-5-1)。*⁴ 正員、富山県立大学工学部 (〒939-03 富山県小杉町黒河 5180)。

2. 記号

本報で用いる記号および略号は以下のとおりである。

- t_0 : 素材の板厚
- t_1 : 加工後の材料(製品)の板厚
- r : 圧下率, $r = (t_0 - t_1) / t_0$
- V_0 : 素材の速度
- V_1 : 製品の速度
- V_F : 摩擦ロールの周速度
- V_T : 加工速度(駆動ロールの周速度)
- V : 被加工材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 : 相対滑り速度, $\delta V = V_m - V_F$,
ただし, $V_m = (V_1 + V_0) / 2$
- δ : 滑り率, $\delta = (V_m - V_F) / V_m$
- η : 潤滑油粘度
- 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 : 被加工材と摩擦ロールとの接触面における平均摩擦係数, $\mu = F_D / N_D$

3. 試験機の原理および構造

3.1 原理および構造 図1に試験機の原理を示す。本試験機は直径の異なる二つのロール(上側: 駆動ロール②, 下側: 摩擦工具ロール③)から構成されている。試験片①は、駆動ロールの摩擦によって、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、被加工材との摩擦を大きくするため、ダイヤモンド電着加工を施し、粗さが R_{max} で約 $40 \mu m$ の粗い面とした。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。試験機の構造図、加工部の概観写真をそれぞれ図2、3に示す。駆動ロールに作用する垂直力 N_D は支柱に取り付けられた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 は摩擦ロール軸上に取

り付けたトルク検出器によって検出する。

駆動ロールの回転数は $0 \sim 1500 \text{ rpm}$ の範囲内で任意に変えることができ、摩擦ロール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 $1/1, 1/3, 1/4, 1/5, 1/12, 1/15, 0/1$ に設定できる。したがって、本試験機は、上下ロールとも回転する場合は異径異周速圧延、摩擦ロールが固定される場合はしごき加工のモデル試験機となり得る。また、試験機の駆動原理から明らかなように、試験片長さは任意に設定可能であり、長距離試験、工具の摩耗試験もできる。なお、木原らは類似な異周速圧延潤滑試験機を用いて、

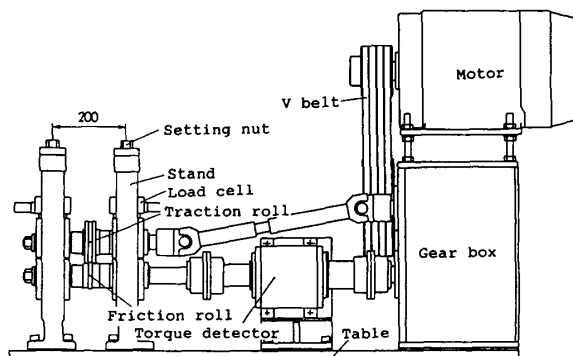


図2 試験機構造

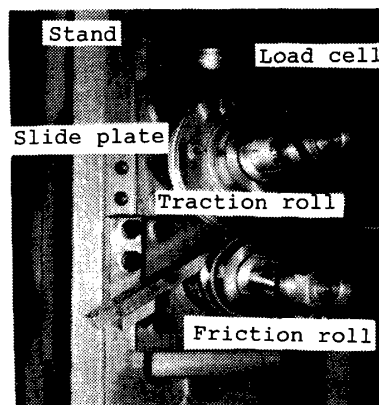


図3 試験機主要部の概観

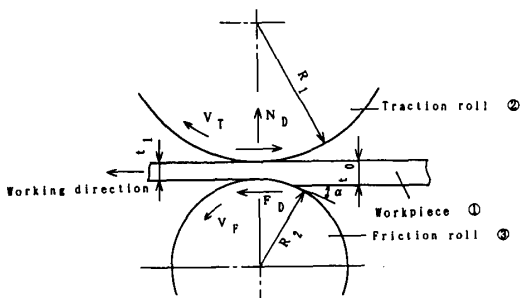


図1 試験機原理図

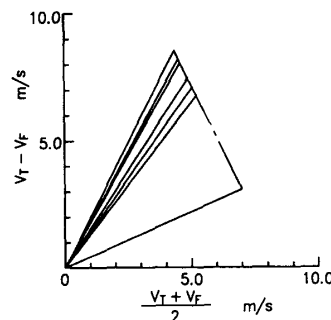


図4 加工速度の観点から見た試験機性能

潤滑油の性能試験を行っている⁽¹⁴⁾。

3.2 速度性能 本実験では、駆動ロール、摩擦ロールの直径をそれぞれ 110 mm, 70 mm とした。ロールの回転数を周速に換算し、本試験機で実現可能な速度範囲を図 4 に示す。近似的には、横軸は油の導入速度、縦軸は相対滑り速度となる。本試験機で実現可能な速度条件は図中の 7 本の実線で示される。

4. 実験条件

供試材として、板厚 $t_0=0.9$ mm の軟鋼板を用いた。その表面性状を図 5 に示す。加工方向(長手方向)が素材の圧延方向と一致するように幅 10 mm, 長さ 1 m の帯板試料を採取した。摩擦ロールには合金工具鋼 SKD 11 ($H_{rc} \approx 60$) を用いた。その表面は、円周方向にエメリーペーパーで乾式研磨後ポリシング加工を施し、粗さが $R_{max} 0.15 \mu\text{m}$ 程度に仕上げた。潤滑油としては、表 1 に示すパラフィン系鉱油 2 種を用いた。

試験は次の手順で行う。試験片、ロール表面をアセトンで十分脱脂し、冷風乾燥後、試験片に潤滑油を塗布し、挿入ガイドを通して試験片を回転ロール間に挿入し加工を行う。実験は同一条件で複数回繰返し、そのすべての結果を検討の対象とした。なお、実験室温度は $23 \pm 1^\circ\text{C}$ で一定とした。

5. 摩擦係数の変化

本実験において、摩擦ロールも回転させる場合には、

表 1 潤滑油粘度

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

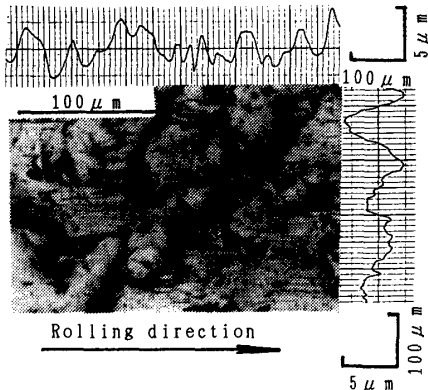


図 5 素材表面性状

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。摩擦ロールを回転させない場合は常に摩擦ロールの同一箇所が被加工材と接触するため、行程が進むに従って、 F_D の漸増する場が現れやすい。ここでは、いずれの場合も、全行程の 2/3 にあたる行程 700 mm 付近の摩擦係数 μ の値を代表値として用いる。

5.1 従来のデータとの比較

塑性加工における摩擦・潤滑現象に及ぼす加工速度、潤滑油粘度および材料加工度の影響は古くから数多くの研究者によって検討がなされ、かなりのデータが蓄積されている。本試験機で得られるデータと従来のデータとの比較を図 6 に示す。本実験とほぼ同様な実験条件(潤滑油粘度、素材材質、素材表面粗さおよび工具表面性状)下での既らの引抜き加工におけるデータ⁽⁸⁾を記号●で示している。摩擦係数 μ は本実験における値とかなりよく一致している。

5.2 加工速度の影響

本節では摩擦係数 μ に及ぼす加工速度 V_T の影響を調べる。摩擦ロールを回転させない場合における実験結果を図 7 に示す。 V_T が

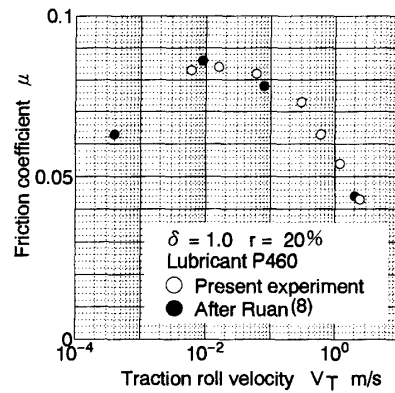


図 6 摩擦係数に及ぼす加工速度の影響

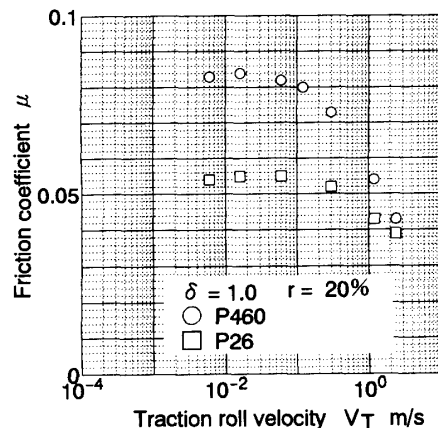


図 7 摩擦係数に及ぼす加工速度の影響

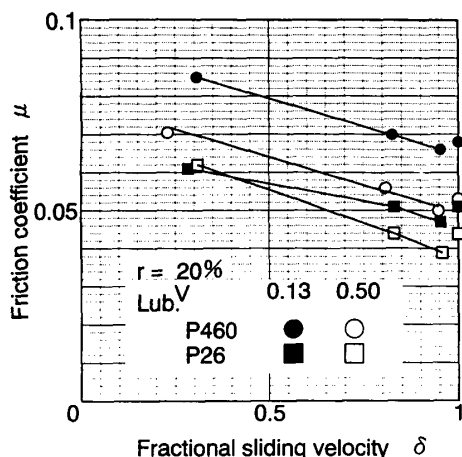


図 8 摩擦係数に及ぼす相対滑り率の影響

0.1 m/s 以下の低中速域では μ はほぼ一定の値を示し、 V_T がさらに増加すると、 μ は減少する傾向がある。図 7 に見られるように、 V_T が 0.1 m/s 以上の高速度域における μ の減少の度合いは高粘度油 P460 を用いる場合のほうが低粘度油 P26 を用いる場合に比べてかなり大きい。このことより、潤滑油粘度が低いほうが μ の加工速度依存性が小さいことがわかる。また、潤滑油の粘度の増加に伴って、 V_T が小さい場合には μ が大きくなっているが、 V_T 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。

なお、摩擦ロールを回転させた場合も同様な傾向が見られた。

5・3 相対滑り速度と油の導入速度の影響

5・2 節に述べた摩擦係数 μ の加工速度および潤滑油粘度の依存性を理解するには、接触界面入口で油の導入速度 V と μ の関係および接触界面での相対滑り速度 δV と μ の関係をそれぞれ独立に明らかにする必要がある。なぜならば、加工速度 V_T を変化させると、 V と δV が同時に変化するためである。

まず、滑り率 δ と μ の関係を調べる。 δ を求めるに当たって必要な製品速度 V_1 は、駆動ロール表面につけたけがき線の製品表面に転写された痕跡の間隔を測定することにより求めた。得られた δ と μ の関係を図 8 に示す。いずれの条件においても、 δ が増加すると μ が減少することがわかる。ただし、 $\delta=1.0$ (摩擦ロール静止) の条件では、 μ はわずかに増加する。この $\delta=1.0$ 以外のデータを相対滑り速度 δV に対して整理したのが図 9 である。本実験の範囲内では、 μ は δV の増加とともにほぼ直線的に減少している。そのこう配は、潤滑油粘度にはほとんど依存しないが、油の導入速度 V が大きいほうが小さいことがわかる。また、 μ 軸との切片は、低粘度油のほうが小さい。

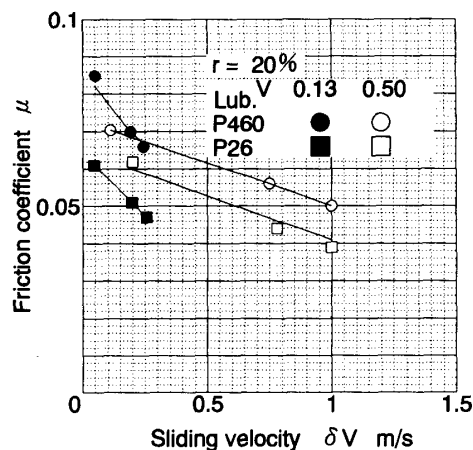


図 9 摩擦係数に及ぼす相対滑り速度の影響

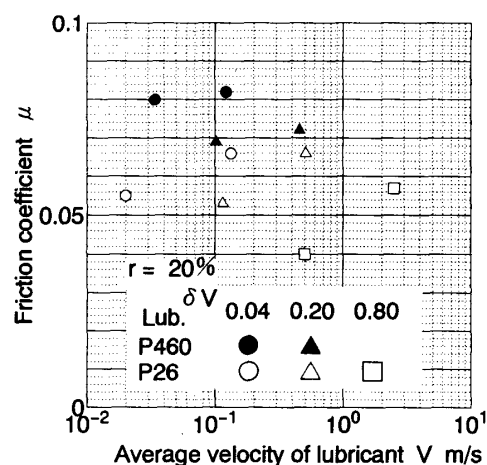


図 10 摩擦係数に及ぼす油の導入速度の影響

図 10 に μ に及ぼす油の導入速度 V の影響を見たものである。図 10 に見られるように、高粘度油の場合には V が変化しても μ はほとんど変わらないが、低粘度油では V の増加に伴ってかなり増加していることが認められる。

これらの結果により、図 7 に見られるような、高速度域において摩擦係数 μ が加工速度 V_T の増加に伴って減少する現象は、油の導入速度 V の増加によるものではなく、相対滑り速度 δV の増加に起因するものと考えられる。

6. 製品表面観察および考察

6・1 製品表面観察 5 章に述べた摩擦現象の機構解明の手がかりを得るため製品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。高粘度油を用いた場合の光顕写真を図 11 に示し、粗さ曲線を図 12 に示す。いずれの場合も、多少の擦過傷があるものの、滑り帯が顕著に現れる面となっていることがわ

かる。図 11 に見られるように、 δV が増すと、擦過傷が短く断続的になり、滑り帯(相対滑り方向にほぼ垂直な波模様)がより顕著に現れる。粗さ曲線に注目してみると、図 12 により、 δV が増加すると、 R_{max} が小さくなり、オイルピット部と平坦部との差が縮まることがわかる。また、 V が増加すると、表面粗さはやや大きくなることわかる。

一方、低粘度油を用いた場合でも、 δV が製品表面性状に与える影響については、上述した高粘度油の場合に比較して面性状の相違は小さいものの、同様の傾向が見られた。さらに、図 13 に見られるように、 δV を一定にして V が増すと、オイルピット部がはっきりと現れてくる。

6・2 考察 加工速度の増加に伴う摩擦係数 μ の減少は V の増加によるものではなく、 δV の増加に起

因するものであることは 5・3 節ですでに述べた。以下では、上述した製品表面の観察結果をもとに考察を行う。

図 12, 13 に見られるように、高粘度油を用いる場合には V の増加に伴って製品表面粗さが増大し、低粘度油を用いる場合には製品表面粗さが V にあまり影響されない。このことは、流体力学的効果により導入される油量が、素材の表面粗さによる油の持込み量に比較して、高粘度油を用いる場合には無視できないこと、低粘度油を用いる場合にはかなり小さな値となることを示すものである。この油の導入量の増加と V の増加による温度上昇⁽⁶⁾ は油の粘性低抗を小さくする。また、図 11, 13 の光顕写真によれば、 V が増加しても、擦過傷の軽減が見られず、逆に潤滑油の局所化が著しくなる。このことは、真実接触部の油膜厚さを減

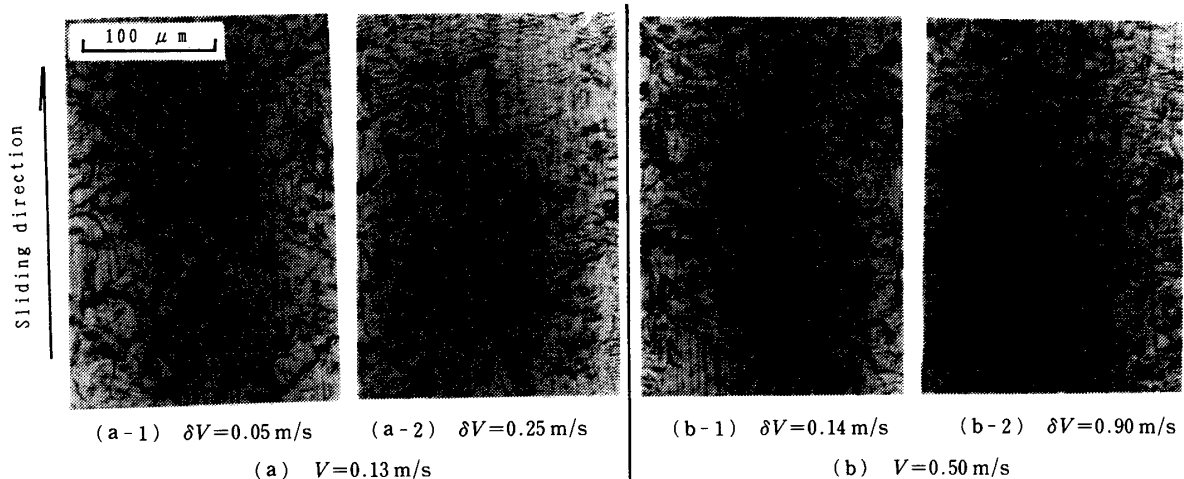


図 11 製品表面性状に及ぼす相対滑り速度の影響 (P 460 潤滑)

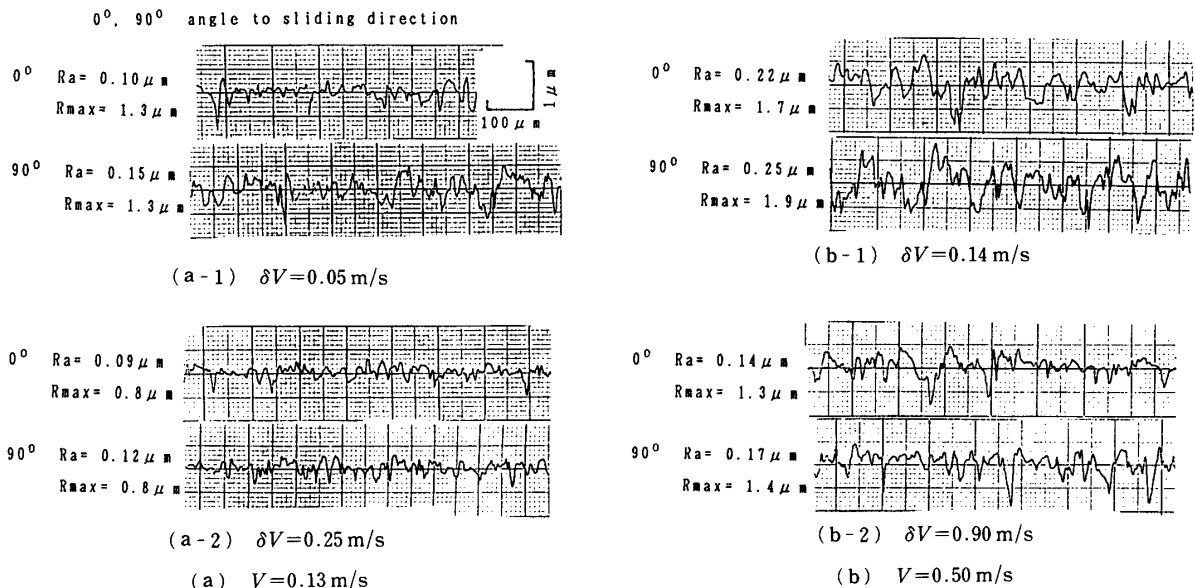


図 12 製品表面粗さに及ぼす相対滑り速度の影響 (P 460 潤滑)

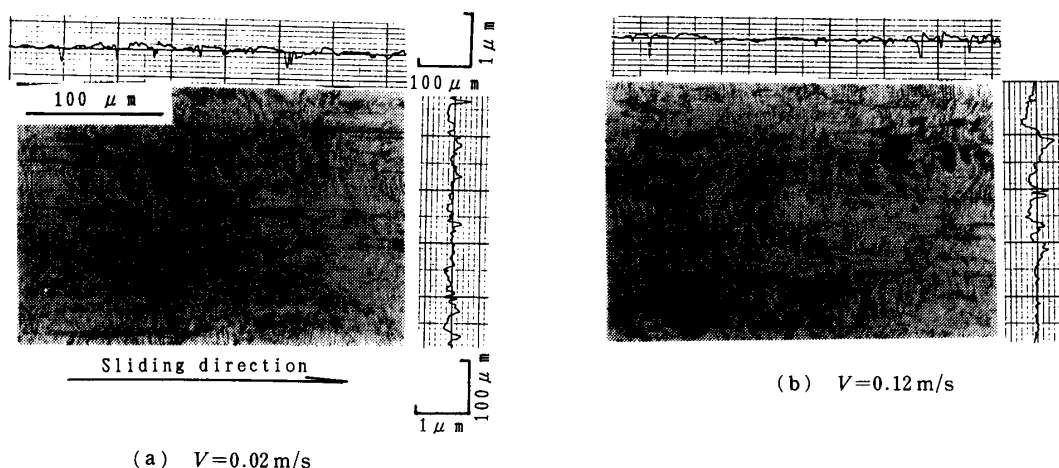


図 13 製品表面性状に及ぼす油の導入速度の影響(P 26 潤滑)

少させ、摩擦係数 μ を増大させる⁽¹⁰⁾。この油の局所化による μ の増加は、油の導入量の増加と温度上昇による粘性抵抗の低減により緩和される。その緩和効果は高粘度油を用いた場合大きく、油の局所化による μ の増加と相殺し、 V が変わっても摩擦係数 μ が変わらないという結果になったものと思われる。

一方、 μ に及ぼす δV の影響に関しては、すでに水野ら⁽⁷⁾ によって研究がなされ、 $\delta V=0\sim 0.019$ m/s の低速域で、 $\eta\delta V$ の増加に伴い、 μ が増加するという実験事実が認められ、これは油膜の粘性抵抗の増大によるものとされている。また、弾性流体潤滑 (EHL) の分野では、 V と δV の効果の分離検討がいち早く行われ、 δV の影響については、ある速度 δV_m で τ は最大値をもつことが認められている⁽¹⁵⁾。その原因は、 δV の増加に伴い、 $\delta V \leq \delta V_m$ では粘性抵抗の増加、 $\delta V \geq \delta V_m$ では温度上昇と粘性抵抗の非ニュートン性の効果によるものとしている。また、塑性加工下の潤滑と EHL との類似性を提唱する研究もある⁽¹⁶⁾。

通常の塑性加工でよく見られる本実験の速度範囲内では、 δV が増すと、擦過傷が短く断続的になり、滑り帯が顕著に現れている。さらに、オイルピットの深さが減り、潤滑油膜の分布はより均一になる。また、 δV の増加に伴い、接触界面の温度が上昇し、油の粘性抵抗は小さくなる。この二つはともに μ を減少させる。

すなわち、

(1) δV の増加あるいは V の減少による油膜の均一分布

(2) δV または V の増加による接触界面の温度上昇

(3) ηV の増加による油の導入量の増加によって、上述した μ の変化は定性的に理解できる。

しかし、機構解明には、さらに広範な実験結果の蓄積とともに、摩擦面温度などの詳細な情報が必要である。これらは今後の課題としたい。

7. 結 論

新たな塑性加工用摩擦試験機を作成し、軟鋼板を用いて摩擦試験を行った。得られた結論をまとめると以下ようになる。

(1) 塑性加工をシミュレートし、実際の加工速度範囲を実現し、さらに、加工速度の影響を潤滑油の導入速度と被加工材と工具との相対滑り速度を分離して検討し得る摩擦試験機を作製できた。

(2) 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、潤滑油の粘度が高くなるに伴い大きくなる。摩擦係数 μ に及ぼす相対滑り速度 δV と潤滑油の導入速度 V の影響を分離検討した結果、次のことが認められた。

(a) 潤滑油の導入速度 V の増加に従い、高粘度油の場合、摩擦係数 μ がほとんど変化しないが、低粘度油を用いると、摩擦係数 μ が増加する。

(b) 相対滑り速度 δV の増加に伴い、摩擦係数 μ が直線的に単調減少し、その減少の度合いは油の粘度によらず、潤滑油の導入速度 V の増加によって小さくなる。

これらにより、加工速度の増加による摩擦係数 μ の減少は、それに伴う相対滑り速度 δV の増加によるものと考えられる。

(3) 製品表面性状を観察した結果、いずれの場合も多少の擦過傷があるものの、滑り帯が顕著に現れる表面となっている。また、相対滑り速度 δV の増加あるいは潤滑油の導入速度 V の減少により、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が認められた。

終わりに、試験機の製作にあたって、協力していただいた富沢康治、鈴木健司[マルヤス工業(株)]の両氏に対して感謝する。

文 献

- (1) Thorp, J. M., *Proc. Instn. Engrs.*, 175-11(1961), 593.
- (2) Whetzel, J. C. and Rodman, S., *Iron & Steel Engr.*, 36(1959), 123.
- (3) 水野, 塑性と加工, 7-66(1966), 383.
- (4) Wilson, W. R. D. and Walowit, J. A., *Trans. ASME, J. Lub. Tech.*, 93(1971), 69.
- (5) 春日・山口, 機論(第3部), 33-252(1967), 1300.
- (6) Kudo, H., *Int. J. Mech. Sci.*, 7(1965), 383.
- (7) Mizuno, T. and Okamoto, M., *Trans. ASME, J. Lub. Tech.*, 104-1(1982), 53.
- (8) 阮・工藤・坪内・堀, 塑性と加工, 28-312(1987), 41.
- (9) 小豆島・坪内・工藤・古田・峯村, 塑性と加工, 30-347(1989), 1631.
- (10) 王・近藤・森, 機論, 59-561, C(1993), 1560.
- (11) 片岡・菅野・木原, 塑性と加工, 29-325(1988), 172.
- (12) 片岡・菅野・木原, 塑性と加工, 29-327(1988), 368.
- (13) Kawai, N. and Dohda, K., *JSME Int. J.*, 30-265(1987), 1018.
- (14) 木原・永森・中川・吉田, 塑性加工春季講演会論文集, (1982), 129.
- (15) Crook, A. W., *I. Phil. Trans. A*, 250(1958), 387.
- (16) 安富・萩原・野上・八木, 塑性と加工, 26(1985), 291.