

塑性加工におけるマイクロ潤滑機構に関する研究

富山県立大学 工学部 機械システム工学科

助手 王 志剛

(平成4年度奨励研究助成 AF-92037)

1. 研究の背景

近年、塑性加工の精密化が益々要求されてきており、それを実現するためには、加工中の摩擦と表面性状の管制が従来にまして厳しく要求される。一方、有限要素法解析が実用段階にあり、その解析精度を向上させるためには、入力データとしての摩擦特性に関する精細な理解が不可欠となってきている。

このような背景で、塑性加工におけるトライボロジーに関する研究は二つの課題を中心に活発に行われている。一つは、工具・被加工材の界面における潤滑油の挙動および接触状態の解明で、接触界面の直接観察⁽¹⁾、オイルピットから流出する潤滑油の量と摩擦との関係の定式化⁽²⁾および超音波による接触率の測定⁽³⁾等がその代表例と言えよう。もう一つは、複雑に絡み合う各種因子の摩擦・潤滑に及ぼす影響をできるだけ分離して検討できる塑性加工用摩擦試験機の開発である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

塑性加工における摩擦・潤滑機構を検討する際、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潤滑油の存在状態の分離検討が最も重要と思われる。このような考え方に基づいてなされた研究として、低速の据え込み加工におけるもの⁽⁶⁾が挙げられるが、通常の塑性加工で現れる高速度域での検討は見あたらない。高速度域では、接触状況や熱的条件などの変化から、低速域とは異なる挙動を示すと考えられる。そこで、高速域における潤滑油導入速度と相対すべり速度の2因子を分離して検討できる摩擦試験機の試作と試験法の開発が必要となる。本報では、試作した試験機の基本特性、特に種々の表面粗さを持つ冷延鋼板をモデル素材として用いた摩擦試験の結果について述べる。

2. 記号

本報で用いる記号及び略号は以下の通りである。

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_f : 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 : 相対すべり速度、 $\Delta V = V_m - V_f$

$$\text{ただし、} V_m = (V_1 + V_0) / 2$$

δ : すべり率、 $\delta = (V_m - V_f) / V_m$

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. 試験機の原理及び構造

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2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、放電加工を施し、粗さがRmaxで約40 μm 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、ロール間隔を变化させることにより任意に設定できる。図2に試験機の構造図を示す。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

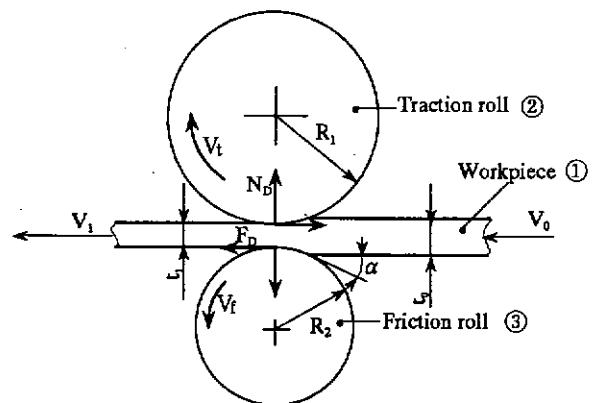


図1 試験機原理図

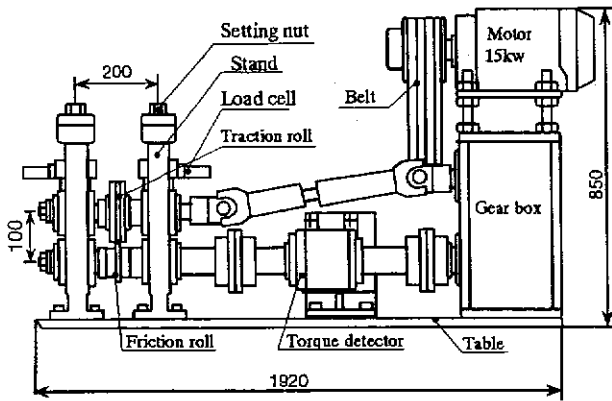


図2 試験機構造図

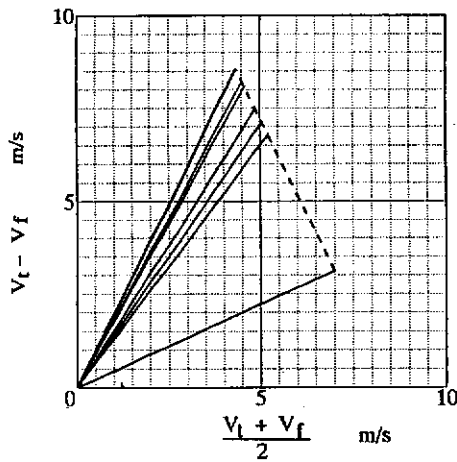


図3 加工速度の観点から見た試験機性能

よって検出する。

駆動ロールの回転数は0~1500rpm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。

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110mm、70mm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3に示す。近似的には、横軸は油の導入速度、縦軸は相対すべり速度となる。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 $t_0 = 1.0\text{mm}$ の軟鋼板を用いた。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

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, 0/100
δ	0.29, 0.82, 0.95, 1.00
Room temperature	$20 \pm 1^\circ\text{C}$

9.8mm、長さ1.0mの帯板試料を採取し、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4に示すような3種類とした。摩擦ロールには合金工具鋼SKD11 ($\text{HRC} \approx 60$)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 $R_{\text{max}} 0.15\mu\text{m}$ 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。表2にその他の加工条件をまとめて示す。

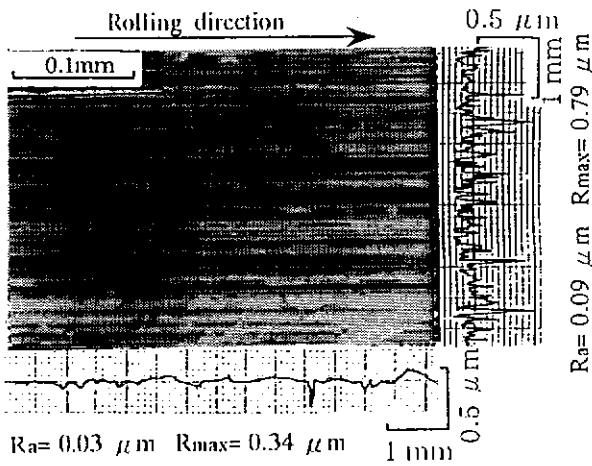
試験は次の手順で行う。試験片、ロール表面をアセトンで十分脱脂し、冷風乾燥後、試験片に潤滑油を塗布し、挿入ガイドを通して試験片を回転ロール間に挿入し加工を行う。実験は同一条件で複数回繰り返す、そのすべての結果を検討の対象とした。なお、実験室温度は $23 \pm 1^\circ\text{C}$ で一定とした。

5. 摩擦係数の変化

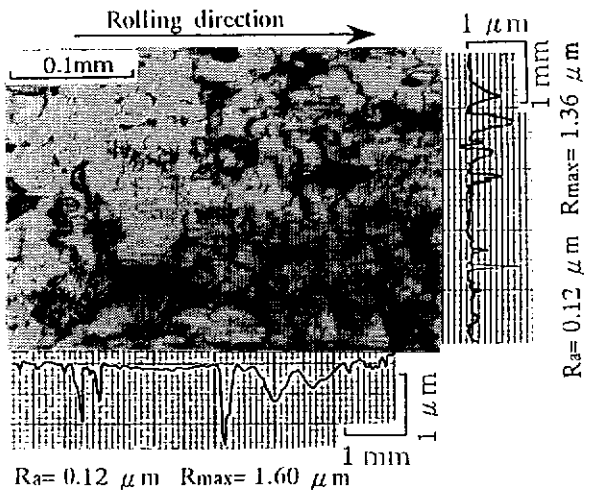
本実験において、摩擦ロールも回転させる場合には、加工初期と末期を除いて、加工行程中、 F_D と N_D は時間的にほとんど変化しなかった。摩擦ロールを回転させない場合は常に摩擦ロールの同一箇所が被加工材と接触するため、行程が進むに従って、 F_D の漸増する場合が現れやすい。ここでは、いずれの場合も、全行程の2/3にあたる行程700mm付近の摩擦係数の値を代表値として用いる。なお、本実験範囲において、接触面圧は410MPaでほぼ一定となったので、摩擦応力を用いて評価しても同様な結果が得られる。

5.1 従来のデータとの比較

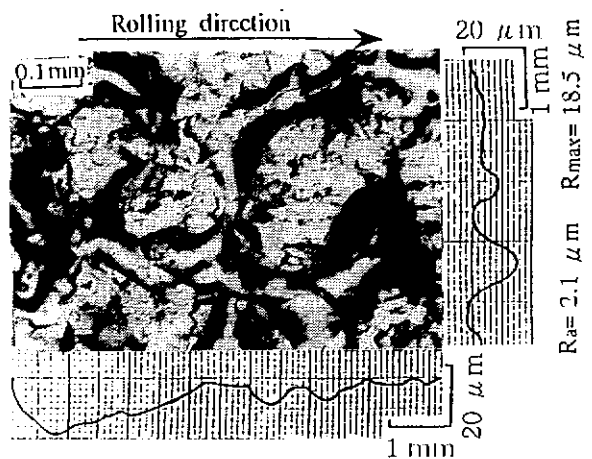
塑性加工における摩擦・潤滑現象に及ぼす加工速度、潤滑油粘度および材料加工度の影響は古くから数多くの研究者によって検討がなされ、かなりのデータが蓄積されている。本試験機で得られるデータと従来のデータとの比較を図5



(a) Workpiece No.1



(b) Workpiece No.2



(c) Workpiece No.3

図4 試料表面性状

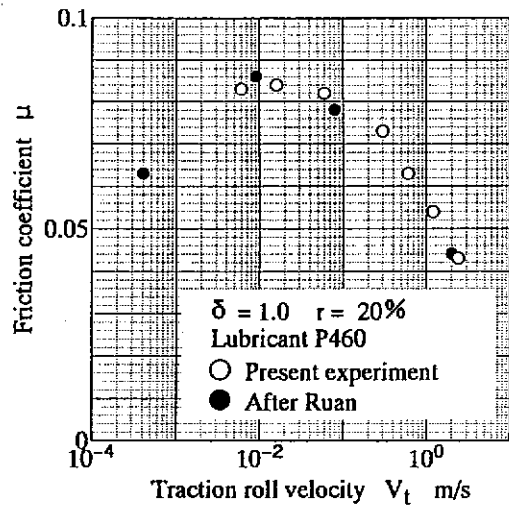


図5 摩擦係数 μ に及ぼす加工速度の影響

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、素材表面粗さ及び工具表面性状）下での従来の引抜き加工におけるデータ⁽⁷⁾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 V_t の影響

図6 (a) にすべり率 $\delta = 0.95$ で高粘度油P460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1.0m/s以下では、 μ が小さくなっているが、 V_t が1.0m/s以上では、 μ はほとんど変わらないことがわかる。

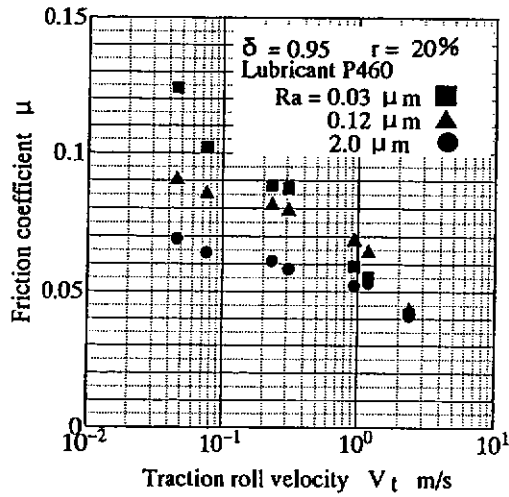
図6 (b) に低粘度油P26を用いた場合、 V_t の増加に伴う μ の変化を示す。

V_t の増加に伴い、試料の表面粗さが0.03 μ mRa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 μ mRa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。

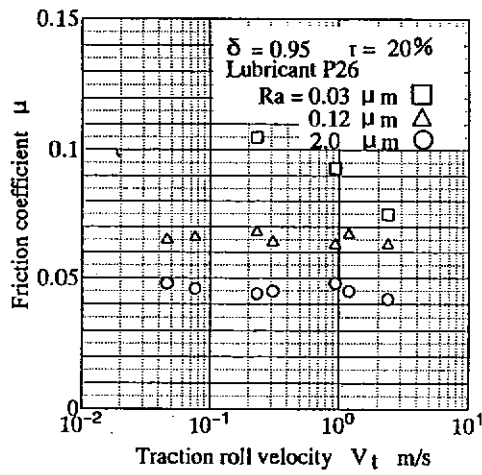
また、図6 (a) と図6 (b) を比較して、潤滑油の粘度の相違による μ の差をみると、 V_t の小さい領域では、高粘度P460を使用した場合、 μ が大きくなっているが、 V_t の大きい領域では逆に低粘度油P26の μ は大きくなっている。

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。



(a) High-viscous lubricant P460



(b) Low-viscous lubricant P26

図6 加工速度 V_t が摩擦係数 μ に及ぼす影響

5.3 潤滑油の導入速度 V の影響

図7~9に試料No.1~3における V と μ 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P460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P26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、低粘度油の方が大きい。

表面粗さが $0.12 \mu\text{mRa}$ と大きくなるNo.2試料では、 V の増加に伴い、高粘度油P460を使用した場合 μ はほとんど変化しないが、低粘度P26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 $2.0 \mu\text{mRa}$ とさらに大きいNo.3試料では、潤滑油粘度の大小に関わらず、 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

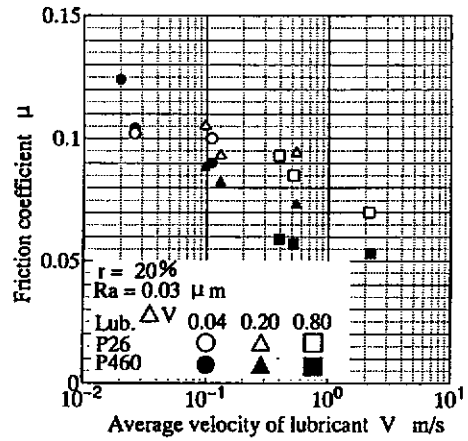


図7 No.1 試料における潤滑油導入速度 V が摩擦係数 μ に及ぼす影響

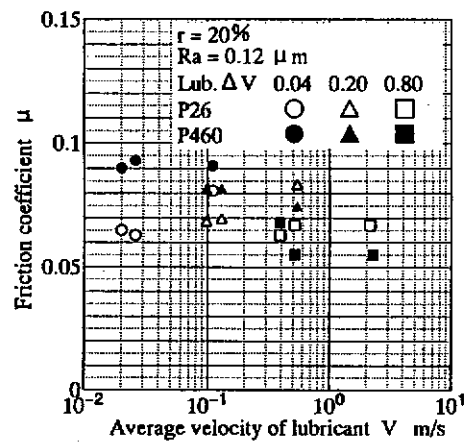


図8 No.2 試料における潤滑油導入速度 V が摩擦係数 μ に及ぼす影響

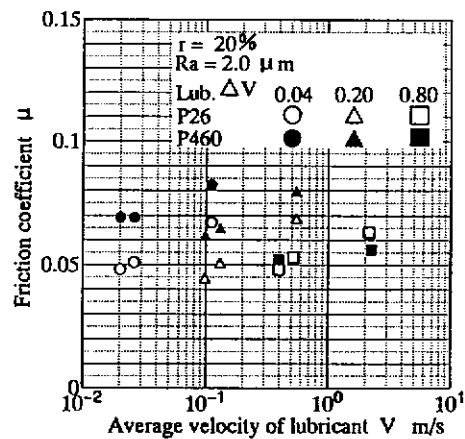


図9 No.3 試料における潤滑油導入速度 V が摩擦係数 μ に及ぼす影響

んど変わらないことがわかる。

このように、試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 $\mu - V$ 関係⁽⁸⁾ は $0.1 \mu\text{mRa}$ 以上の表面粗さの場合成立しないと考えられる。

5. 4 相対すべり速度 ΔV の影響

図10~12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試料では、 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 の増加に伴い小さくなっている。

6. 加工後の試料表面観察および考察

6. 1 加工後の試料表面

前章に述べ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13に高粘度油P460を用いた場合、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、初期表面上の条痕が蛇行したように歪んで残存し、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ーの表面あれが見られる。

図14に低粘度油P26を用いた場合、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15に高粘度油P460を用いた場合、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、 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、初期表面上の条痕が顕著に残存し、表面あれが幾分抑制されていることがわかる。

図16に低粘度油P26を用いた場合、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。

なお、No.1試料において、低粘度油を使用した場合でも同様な傾向がみられた。No.3試料において、高粘度油を用いた場合、 V および ΔV が加工後の試料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、低粘度油の場合と同様な傾向がみられた。 V の大きい領域では、擦過傷が全く見られず、初期表面上のオイルピットがほぼ完全に消滅し、自由表面あれに近い状態になっていることが認められた。

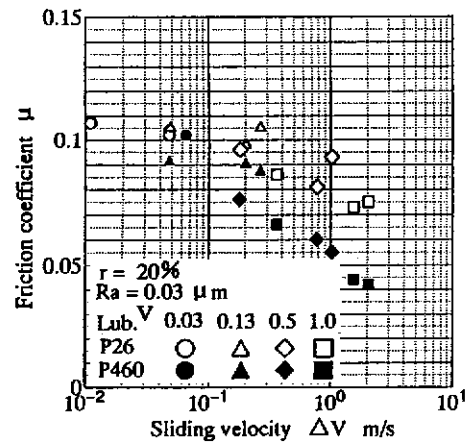


図10 No.1試料における潤滑油導入速度 ΔV が摩擦係数 μ に及ぼす影響

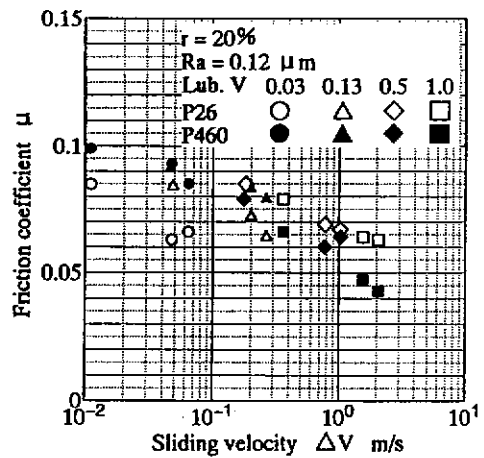


図11 No.2試料における潤滑油導入速度 ΔV が摩擦係数 μ に及ぼす影響

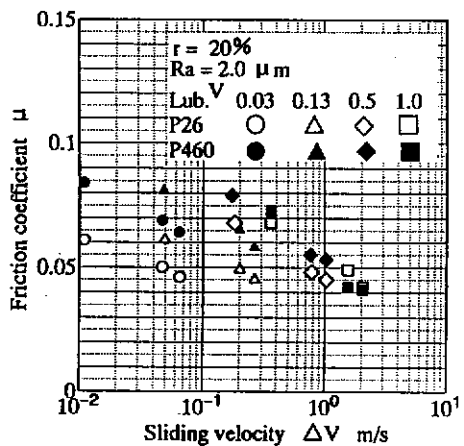
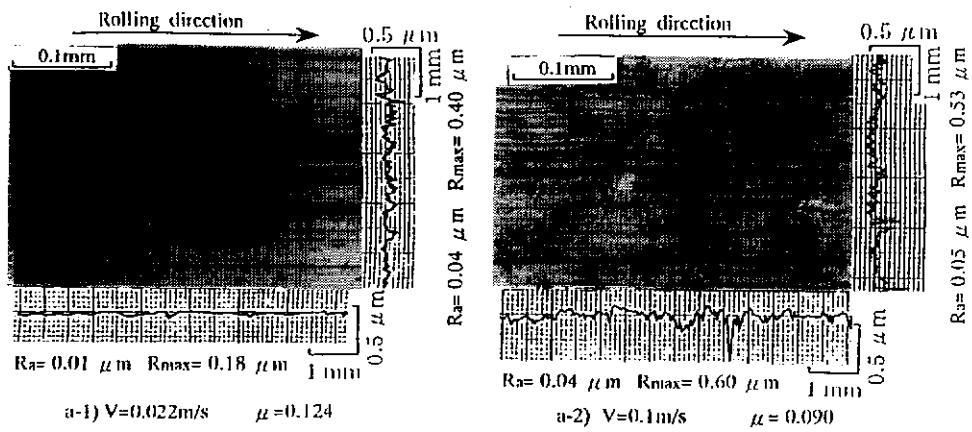


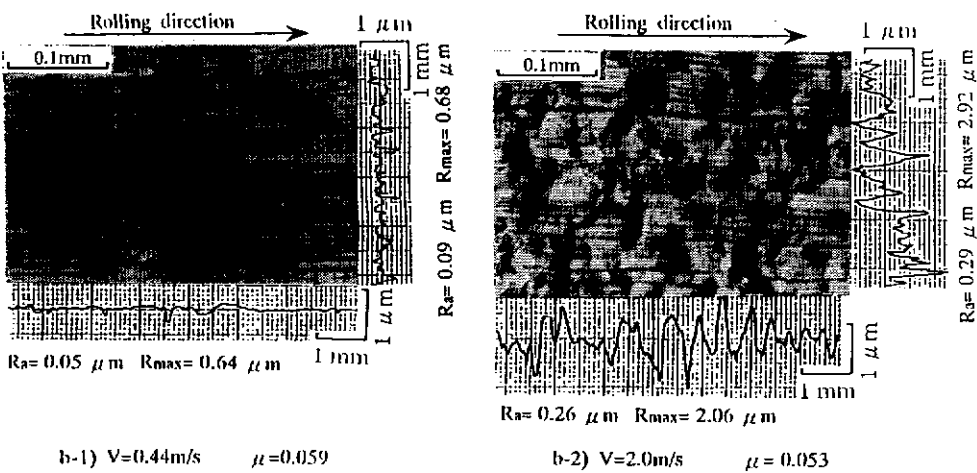
図12 No.3試料における潤滑油導入速度 ΔV が摩擦係数 μ に及ぼす影響

6. 2 考察

試料表面粗さの小さい場合、油の導入速度 V の小さい領域では、図13(a)、15(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



(a) $\Delta V=0.04\text{m/s}$



(b) $\Delta V=0.80\text{m/s}$

図 13 加工後の試料表面性状に及ぼす潤滑油導入速度 V の影響 (No.1 試料、P460 潤滑)

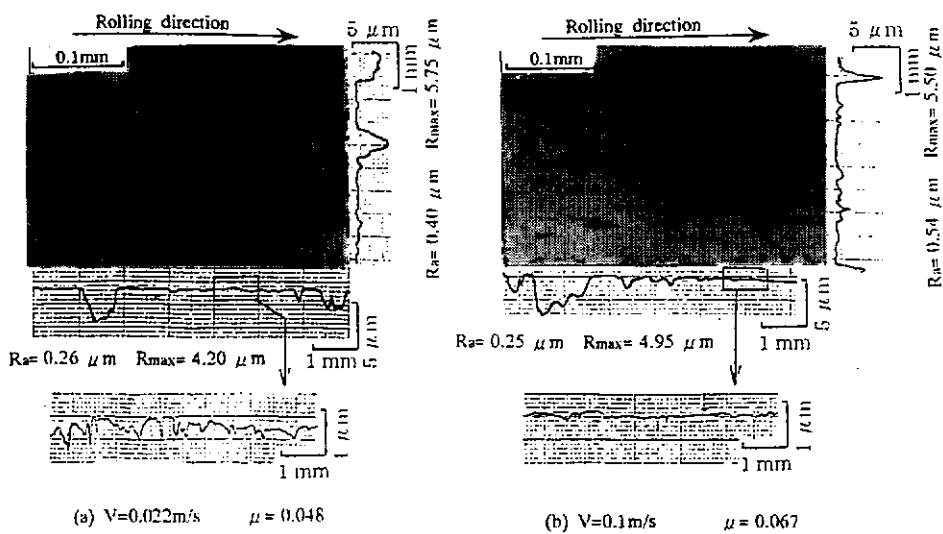


図 14 加工後の試料表面性状に及ぼす潤滑油導入速度 V の影響 (No.3 試料、P26 潤滑)

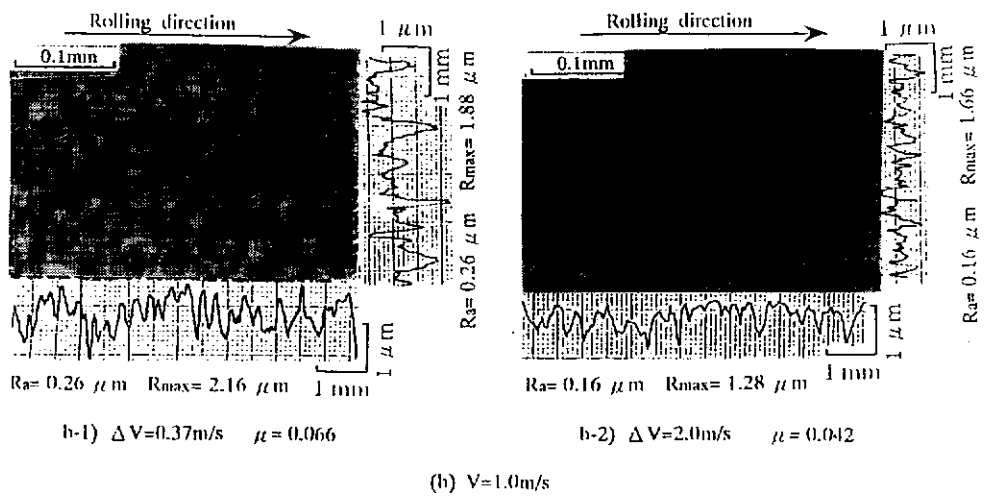
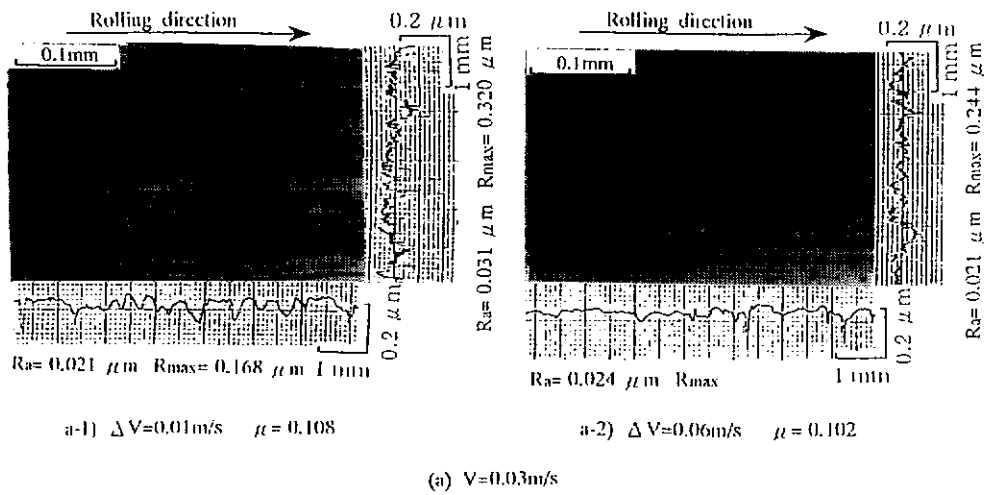


図 15 加工後の試料表面性状に及ぼす相対滑り速度 ΔV の影響 (No.1 試料、P460 潤滑)

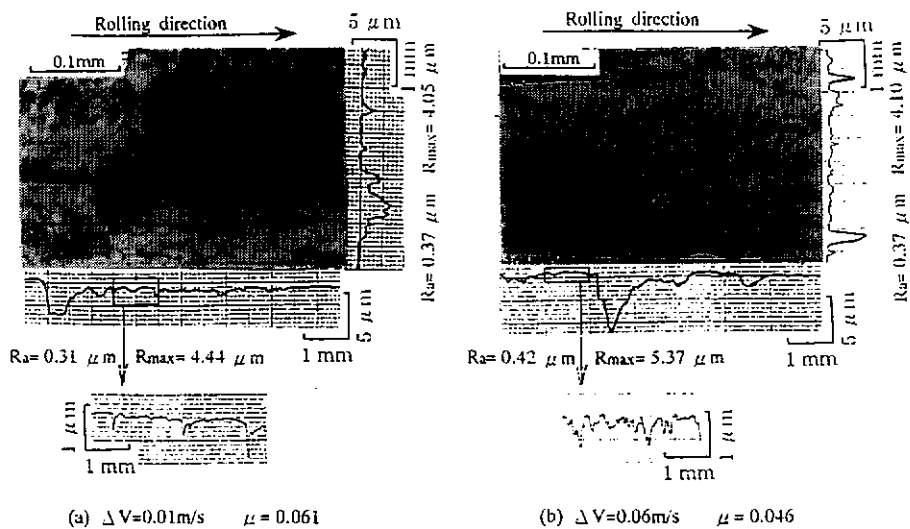


図 14 加工後の試料表面性状に及ぼす相対滑り速度 ΔV の影響 (No.3 試料、P26 潤滑)

結果は、従来の認識と一致する⁽⁸⁾。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。一方、油の導入速度 V の大きい領域では、図13(b)、15(b)にみられるように、接触界面が混合潤滑状態あるいは流体潤滑状態にあると思われる。この場合、摩擦係数が油の導入速度 V の増加に伴って、わずかではあるが依然減少している。また、相対滑り速度 ΔV の増加に伴って、摩擦係数がかなり減少する(図10)。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、油膜の均一化による摩擦抵抗の低減⁽²⁾と、 ΔV の増加に伴う温度上昇⁽⁷⁾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ち込み量が増加し、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ち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 の増加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考えられる。図8、9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ち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14)。また、図11、12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。

7. 結 論

新たな塑性加工用摩擦試験機を作成し、種々の表面粗さを持つ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、潤滑油の導入速度と被加工材と工具との相対すべり速度の摩擦に及ぼす影響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、潤滑油の粘度が高いほど、試料表面粗さが小さいほど大きい。

(3) 潤滑油の導入速度 V の増加に従い、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。

(4) 相対すべり速度 ΔV 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 が減少する。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膜の均一化のためと考えられた。

終わりに、本試験機の開発費用の一部として、天田金属加工機械技術振興財団の援助を受けたことを記すとともに、同財団に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 小豆島・坪内・工藤・古田・峯村：塑性と加工、30-347 (1989), 1631.
- (2) 王・近藤・森：機論C, 59-561 (1993).
- (3) 済木・坂田・里中・丸茂：機論C, 59-562 (1993), 934.
- (4) Wilson, W. R. D., Malkani, H. G. and Saha, P. K.: Proc. NAMRC XIX (1991), 37.
- (5) Wagoner, R. H., Wang, W. and Sriram, S.: J. Mater. Process Technol. 45 (1994), 13.
- (6) Mizuno, T. and Hasegawa, K., Trans. ASME, J. Lub. Tech., 104-1 (1982), 23.
- (7) 阮・工藤・坪内・堀：塑性と加工、28-312 (1987), 41.
- (8) 水野：塑性と加工、7-66 (1966), 383.