

しごき形摩擦試験機による潤滑性能評価*

(基礎的考察と評価尺度)

河合 望**, 中村 保***, 宮本重之****
Nozomu KAWAI, Tamotsu NAKAMURA, Shigeyuki MIYAMOTO

1. 緒 論

通常、塑性加工における工具・材料面間のすべりは高面圧下におかれ、境界潤滑状態を呈する 경우가多いが、素材の巨視的塑性変形による新生面の発生は潤滑状態の劣化をもたらす⁽¹⁾。このため、塑性加工の摩擦面は常に焼付き発生の危険にさらされることになるが、焼付きは工具と製品にとって致命傷となるため、その抑制は至上命令といって過言でない。

塑性加工の焼付き現象に関しては、H. Wiegandら⁽²⁾はステンレス鋼板の引抜きにおける工具材質の影響を検討し、福井ら⁽³⁾は、各種金属板の引抜きを行い、摩擦係数と引抜き後の板の表面性状に基づいて、引抜き速度、潤滑剤、工具と素材の表面あらさなどの影響を検討し、須藤ら⁽⁴⁾はU曲げしごき式型かじり試験機により正常部残存率なる耐焼付き能評価尺度を提案し、大矢根ら⁽⁵⁾は回転円筒素材の円筒面にくさび形工具を押込み、すべり距離、工具材質およびすべり速度などの焼付きに及ぼす影響について定性的考察を行っている。これらの研究により、焼付き現象に及ぼす各種影響因子の定性的影響程度は逐次明らかにされているが、焼付き発生条件の定量的解明、とくに素材塑性変形の量的影響についてはほとんど解明されていない。この観点からの耐焼付き能評価試験法と量的評価尺度の確立が待たれる現状にある。

著者らは、既報⁽⁶⁾⁽⁷⁾において、二次元引抜き形摩擦試験機を用い、この問題の究明を試み、境界潤滑状態における摩擦係数一定法則、巨視的塑性変形の焼付き助長作用および焼付き領域に作用する摩擦せん断応力は、材料のせん断降伏応力にほぼ等しいことを確認し、二、三の耐焼付き能評価尺度の提案を行った。しかし、引抜き率および引抜き距離に制限があり、検証範囲が十分でないという欠点が残された。

* 昭和54年5月17日 塑性加工春季講演会において講演、原稿受付 昭和55年1月17日。

** 正員、名古屋大学工学部(〒464 名古屋市千種区不老町)。

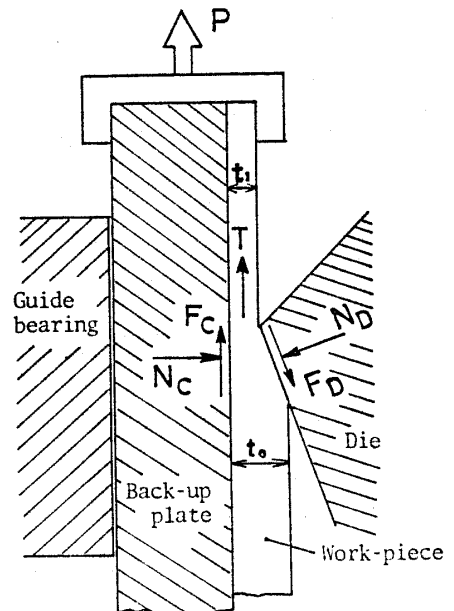
*** 正員、静岡大学工学部(〒432 浜松市城北3-5-1)。

**** 小松製作所(〒923 小松市八日市地方5)。

本研究では、上述欠点を改善しうる帯板しごき形摩擦試験機を新たに試作し、手始めとして、アルミニウム材料に鉱油を適用した場合の焼付き現象を詳細に検討してみた。その結果、材料の巨視的塑性変形に起因する素材表面積増加量およびすべり距離の2因子によって、塑性加工用潤滑剤の耐焼付き能の評価が可能となり、量的評価法に一つの試案を提示することができたので、ここに報告したい。

2. 実験装置、条件および方法

2.1 実験装置 図1に装置の原理を示す。試験片である帯板を裏板と一体にしてしごき、帯板と裏板間の摩擦力 F_c を高めておけば、しごき後の帯板に作用する張力 T は減殺され、材料破断が抑制される。これ



S_0 : Area of frictional surface before ironing
 S_1 : Area of frictional surface after ironing
 r : Reduction
 η : Increasing ratio of frictional surface area
 $r = (t_0 - t_1)/t_0$
 $\eta = (S_1 - S_0)/S_0 = (t_0 - t_1)/t_1$
 (in case of plane strain)

図1 しごき加工原理図

により限界しごき率を著しく高めることができる。本摩擦試験機では、この原理により高いしごき率を達成させ、素材表面積増加率を広く変更しうるようにするとともに、すべり距離もできる限り大きくとりうるよう工夫をこらした。

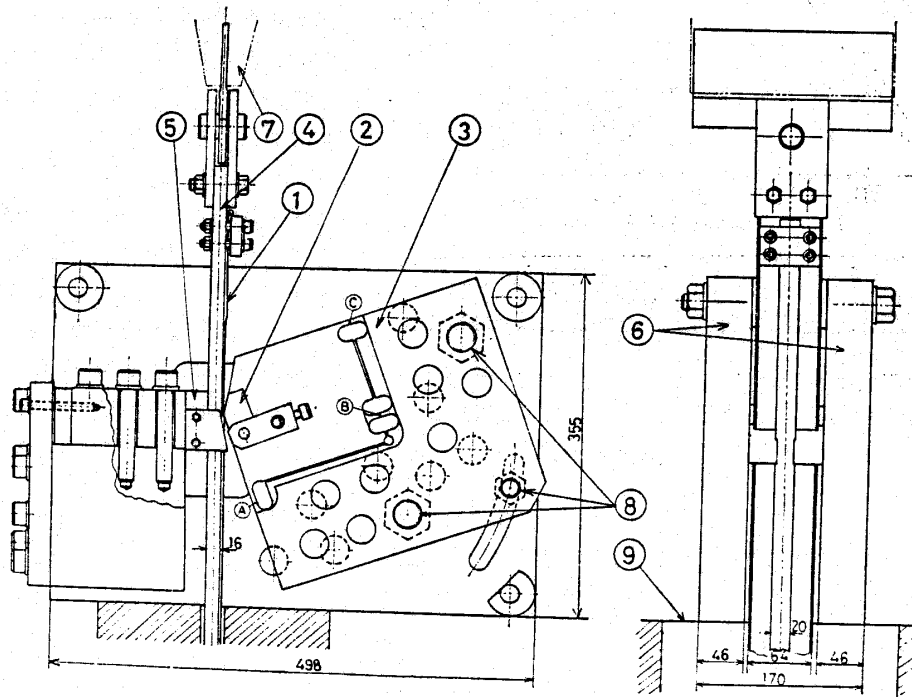
図2は本試験機主要部の組立図を示すものである。本体は最大容量 10 t の引張試験機のベッド⑨上へすえ付けられる。試験片①と裏板④は一体としてチャック⑦にはさまれて上方に引き抜かれる。ダイス②面上に作用する摩擦力および垂直力は、それぞれ測定体③の弾性部④および⑤、⑥にはりつけられたひずみゲージによって検出され、しごき行程とともにXYレコーダに同時記録される。すなわち、摩擦力は④の引張り

ひずみとして、垂直力は⑤、⑥の圧縮ひずみとして検出される。垂直力による④の曲げひずみおよび摩擦力による⑤、⑥の曲げひずみは検出部の表裏両面はりつけのひずみゲージの出力和をとることによって測定値から除去され、いわゆる相互干渉が無いように工夫されている。本測定体の荷重検定を行った結果、それぞれ最大ひょう(秤)量(摩擦力 2.5 t, 垂直力 5 t)の範囲内で負荷・除荷ともに良好な直線関係を示し、相互干渉量はフルスケールに対し±1.5%以内であり、ほぼ無視しうる事が確認された。

2.2 実験条件および方法 主な加工条件を表1に示す。しごき率の変更は裏板案内しゅう動受⑤をダイス②に対し相対移動することにより行われる。ダイス

表1 加工条件

	材質および寸法	機械的性質	表面仕上げ
ダイス	SKD 11 (焼入れ)	硬さ $HRC \approx 60$	ラッピング仕上げ表面あらさ $R_{max} \approx 0.1 \mu m$
試験片	A1050 (焼なまし) 厚さ 2 mm 幅 20 mm 長さ 450 mm	引張強さ 8.06(kg/mm ²) 加工硬化係数 0.25	冷間圧延仕上げ表面あらさ $R_{max} \approx 1 \mu m$
しごき率 %	5, 20, 30	ダイス角度	10°
しごき距離 mm	350	実験温度 °C	20±3
しごき速度 mm/s	1	実験湿度 %	45±5



- ① Work-piece
- ② Die
- ③ Measuring device
- ④ Back-up plate
- ⑤ Guide bearing for back-up plate
- ⑥ Rigid side plate
- ⑦ Chuck
- ⑧ Pin for fixing a measuring device
- ⑨ Bed of tensile testing machine

図2 試験機主要部組立図

角度の調節は、ダイスを組込んだ測定体③と側板⑥間の固定ピン⑧の位置を変更して行われ、5°、10°、15°、20°、25°の5段階に設定されるようになっているが、本実験では10°を標準として用いた。しごき距離をできる限り大きくするため、特製の長大ストロークの引張試験機を用い、チャック⑦の可動範囲を最大450mmとした。これにより標準の最大しごき距離350mmをうることができた。しごき速度は0~16mm/sの範囲内で連続的に変更可能となっているが、本実験では動水的効果をなるべく消去するため1mm/s一定の低速を用いることとした。裏板として、素材との接触面をやすり目加工 ($R_{max} \approx 150 \mu m$) してできる限り高摩擦としたものを標準として用い、比較のため研削加工 ($R_{max} \approx 2 \sim 3 \mu m$) のものも準備した。本実験では、

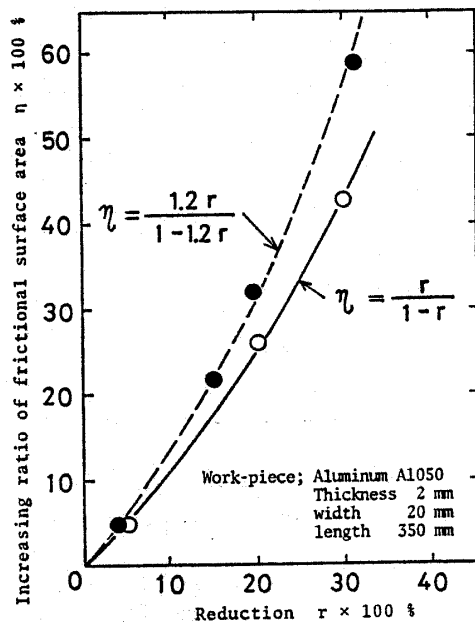
手始めとして工業用純アルミニウムA1050冷間圧延板(厚さ2mm)から幅20mm、長さ450mmの試験片を圧延方向に採取して用いた。

しごき加工による素材表面積の増加率 η を知るため、素材表面のしごき方向に5mm間隔のけがき線を入れ、焼付き発生のないストックオイル潤滑剤を用いて加工したのち線間隔を測定する。焼付きが発生する場合には、けがき線が消滅して測定困難であるが、本試験片の寸法(幅対板厚比10)では、素材の幅広がり量はダイス面上の摩擦の大小によらずほぼ同程度でほとんど無視しうる量であるため(平面ひずみ)、表面積増加率 η もダイス面上の摩擦の影響をあまりうけず、しごき率 r のみによって定まると考えられる。すなわち、

$$\eta = (S_1 - S_0) / S_0 = (t_0 / t_1) - 1 = r / (1 - r) \dots (1)$$

である。ここに、摩擦面の初期表面積 S_0 、しごき後表面積 S_1 、初期板厚 t_0 、しごき後板厚 t_1 、しごき率 $r = (t_0 - t_1) / t_0$ である。 η の実測結果を図3に示すが、研削面の裏板にダイス側と同一潤滑剤(ストックオイル)を適用し、試験片裏面の摩擦拘束を小さくした場合には、平面ひずみ変形を仮定して得られる上式(1)の関係がほぼ満たされている。一方、やすり面の裏板を無潤滑条件で用い、素材裏面の相対すべりを拘束した場合には、表面積増加率 η は大きくなり、 $\eta = 1.2r / (1 - 1.2r)$ の実験式により近似される。本実験では、裏板側の接触状況を常に一定に保持するため、やすり面の裏板を無潤滑で用い、しごき率を5、20、30%と変更する。これにより、 η は6.4、31.5、56.3%と変化することになる。

ダイス面圧は、ダイス角度、しごき率、素材材質、素材と裏板およびダイスとの摩擦状態によって影響を受けるため、面圧の独立管制は困難である。図2に示されるダイス②の取り替えは容易な構造になっており、工具材質などの影響をみることも可能であるが、本実験では合金工具鋼SKD11焼入れ材を用いることとした。摩擦面となるダイス表面は1回の実験ごとにラッピングされ、常に表面あらさ $R_{max} \approx 0.1 \mu m$ 程



Sign	Back-up plate		Lubricant	
	Surface finishing	Surface roughness	Back-up plate surface	Die surface
○	Grinding	$R_{max} \approx 2 \sim 3 \mu m$	Stock-oil	Stock-oil
●	File setting	$R_{max} \approx 150 \mu m$	Dry	Stock-oil

図3 しごき率と表面積増加率の関係

表2 パラフィン系鉱油

項目	記号	P01				P2				P3				P4				ストックオイル St			
		20°C		37.8		19.6		10.4		83.0		326		4600							
動粘度 cSt	-20°C	1.63		19.6		83.0		326		4600		1.63		19.6		83.0		326		4600	
		1.24		10.4		33.7		111.2		1085		1.24		10.4		33.7		111.2		1085	
		0.65		2.64		5.34		11.5		50.2		0.65		2.64		5.34		11.5		50.2	
硫黄分 wt%	-98.9	0.02		0.01		0.10		0.13		0.18		0.02		0.01		0.10		0.13		0.18	
		7.1		3.2		0.0		1.5		14.1		7.1		3.2		0.0		1.5		14.1	
		32.3		27.7		36.8		31.3		20.3		32.3		27.7		36.8		31.3		20.3	
環分析 (n-d-M法)	-CA	60.6		69.1		63.2		67.2		65.6		60.6		69.1		63.2		67.2		65.6	
		175		298		399		529		787		175		298		399		529		787	
平均分子量		175		298		399		529		787		175		298		399		529		787	

度に保たれる。

潤滑剤としては表2に示すようなパラフィン系鉱油5種類を用いる。温度 20°C, 湿度 45% の恒温室で実験を行い、同一条件で必ず5回程度摩擦試験を繰返し、そのすべての結果を検討の対象とした。

3. しごき行程の進みに伴う摩擦係数と材料表面性状の変化

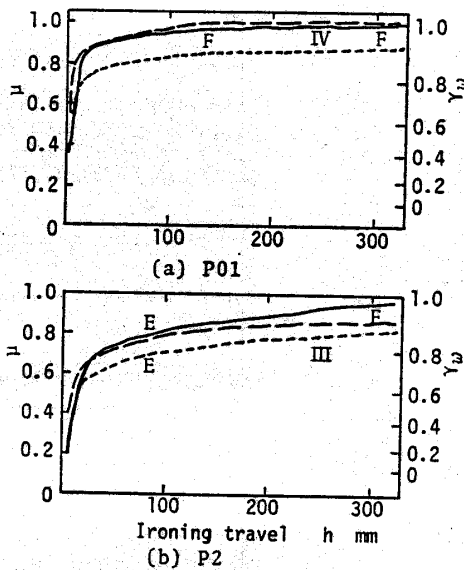
潤滑剤およびしごき率を各種変更して、しごき加工を行った結果、摩擦係数 μ の行程中変化は、本実験範囲内では、図4および表3に示すように4種の形式を呈することがわかった。すなわち、I：低摩擦一定形、II：低摩擦一定後漸増形、III：漸増形およびIV：高摩擦一定形である。

概して、高粘度鉱油 (St, P4) はIおよびIIのタイプ、中粘度油 (P3, P2) はIIIのタイプ、低粘度油 (P01) はIVのタイプで、しごき率が増すほど μ は大となっている。このような摩擦係数 μ の変化に対応して、素材のしごき後の表面性状も変化するが、肉眼お

表3 摩擦係数の行程中変化形式の分類

分類形式	潤滑油	しごき率%	摩擦係数 μ_{30}	摩擦係数 μ_{300}
I	St, P4	5	0.08~0.12	0.09~0.15
		20	0.11~0.13	0.14~0.17
II	St	20	0.10~0.11	0.15~0.17
		30	0.10~0.12	0.14~0.18
	P4	20	0.08~0.14	0.2~0.35
		30	0.12~0.2	0.25~0.50
III	P3	5	0.16~0.31	0.23~0.48
		20	0.34~0.44	0.45~0.64
		30	0.40~0.46	0.67~0.78
	P2	5	0.54~0.62	0.81~0.83
		20	0.60~0.71	0.82~0.89
		30	0.64~0.70	0.91~0.95
IV	P01	5	0.68~0.84	0.81~0.94
		20	0.88~1.08	1.00~1.06
		30	0.83~0.94	0.93~1.04

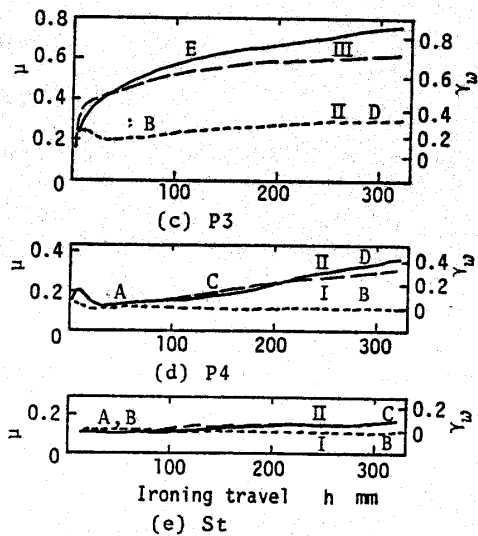
I：低摩擦一定形、II：低摩擦一定後漸増形
 III：漸増形、IV：高摩擦一定形
 μ_{30} , μ_{300} ：しごき行程 30mm および 300mm における摩擦係数の値



μ : Frictional coefficient
 γ_w : Ratio of welding area to total contact area

Variation types of frictional coefficient during ironing travel

- I : Type of constant low friction
- II : Type of increasing after constant low friction
- III : Type of increasing friction
- IV : Type of constant high friction



	$r \times 100 \%$	$n \times 100 \%$
—	30	56.3
- - -	20	31.6
· · ·	5	6.4

Frictional surface appearance of work-piece after ironing

- A: Rippling surface
- B: Rubbing surface
- C: Grooving surface
- D: Tearing surface
- E: Micro crack surface
- F: Peeling surface

図4 パラフィン系鉱油の摩擦係数-行程線図

よび顕微鏡観察によると, A: さざ波面, B: 擦過傷面, C: 線条こん面, D: むしれ面, E: 微小き裂面, F: 表層はく離面の6種類に分類できる. それぞれ, しごき後およびしごき中の材料表面性状, 表面あらさ曲線を図5~10に, 各表面性状が生成される行程を図4中に, また各表面性状の生成行程時における摩擦

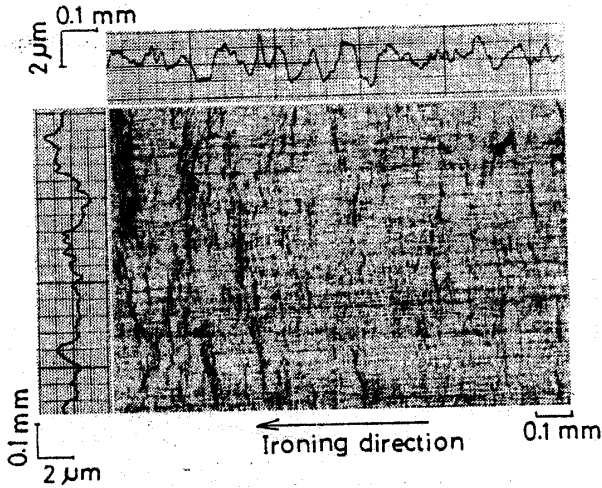
表4 しごき後の表面性状とその生成行程時における摩擦係数および平均摩擦せん断応力

表面性状	摩擦係数 μ	平均摩擦せん断応力 τ_m kg/mm ²
A. さざ波面	0.08~0.10	1.6~2.0
B. 擦過傷面	0.10~0.15	2.0~3.0
C. 線条こん面	0.13~0.32	2.5~5.2
D. むしれ面	0.22~0.64	3.8~8.0
E. 微小き裂面	0.51~0.98	7.0~9.8
F. 表層はく離面	0.81~1.10	9.0~10.5

係数 μ および平均摩擦せん断応力 τ_m の値を表4に示す. これらの図および表からつぎのことがわかる.

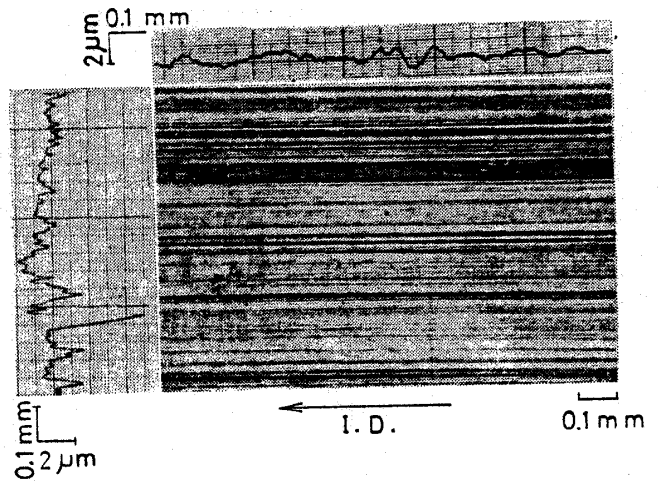
3.1 低摩擦一定形 (I) (I)では, 全行程を通して $\mu \approx 0.08 \sim 0.15$ 一定で, 摩擦面性状はおおむね擦過傷面(図6)となるが, しごき率が30%とある程度大きくなるとさざ波面(図5)が現れる. 擦過傷面は $R_{max} \approx 0.5 \mu m$ 程度のしごき方向に微細なすり傷を有する面である. しごき中の材料摩擦面は焼付き部もマイクロプール部(流体潤滑領域)もない擦過面($R_{max} \approx 0.3 \sim 0.4 \mu m$)であることが確認されており, いわゆる境界潤滑状態に全面がおかれているようである. さざ波面(図5)は, 表面あらさ $R_{max} \approx 2 \sim 2.5 \mu m$, 波長 $\lambda \approx 0.2 \sim 0.3 mm$ 程度のしごき方向に進むさざ波状模様を呈するもので, ある程度の厚膜潤滑下での素材塑性変形に伴う粗面化現象が現れたものとみられる.

3.2 低摩擦一定後漸増形 (II) (II)において, $\mu \approx 0.1$ 一定の低摩擦行程時ではIと同様に摩擦面全体がほぼ境界潤滑状態におかれ, しごき後擦過傷面を

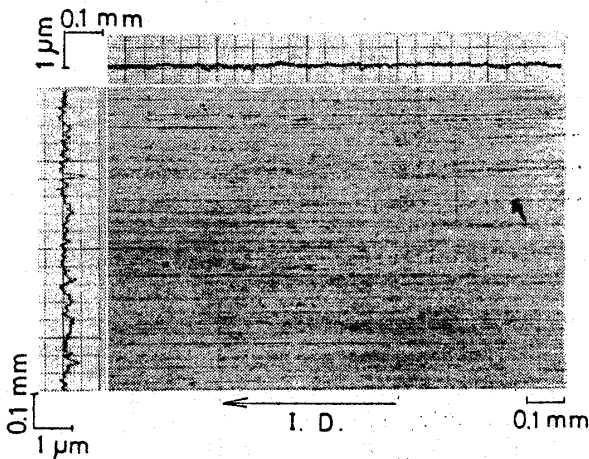


しごき後の材料表面性状
潤滑剤: St, しごき率: 30%, しごき行程: 50 mm

図5 さざ波面 (A)

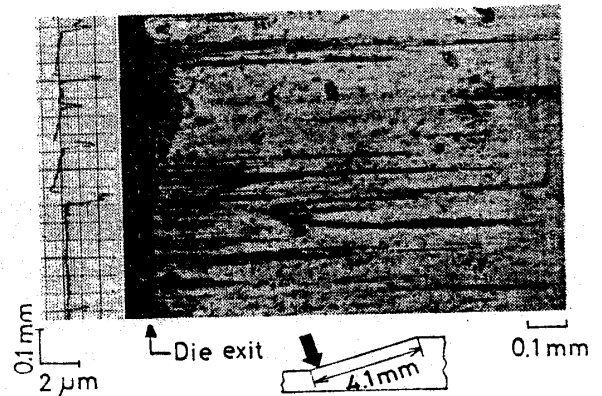


(a) しごき後の材料表面性状



しごき後の材料表面性状
潤滑剤: St, しごき率: 5%, しごき行程: 100 mm

図6 擦過傷面 (B)



(b) しごき中の材料表面性状
潤滑剤: St, しごき率: 30%, しごき行程: 300 mm

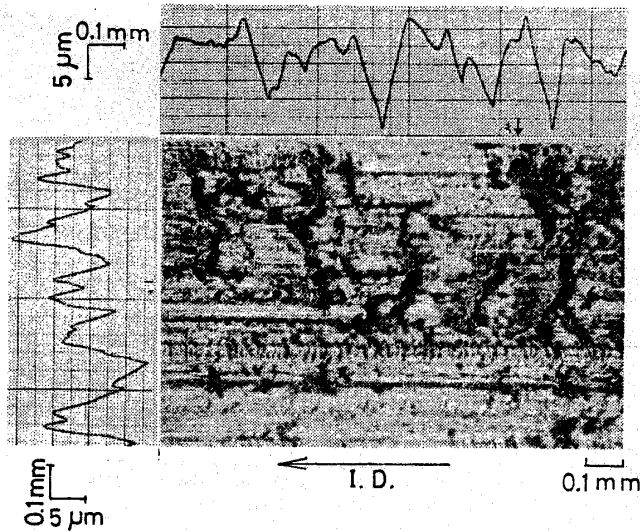
図7 線条こん面 (C)

形成することが確認された。μの増加に伴い線条こん面〔図7(a)〕が形成され、条件によっては、むしろ面〔図8(a)〕が出現する。「線条こん面」は既報の引抜きの場合⁽⁶⁾⁽⁷⁾と同様にダイス出口部に発生する出口側焼付き〔図7(b)の黒色条こん〕により素材表面が掘り起こされるために生ずるものである。むしろ面〔図8(a)〕は、しごき方向に直角で、深さ約15 μm程度のき裂を伴う面である。しごき中ダイス出口近傍の材料摩擦面〔図8(b)〕には、焼付き層が形成されているが、行程中断続的に脱落・生成を繰返すため、むしろ面を形成することが確認された。

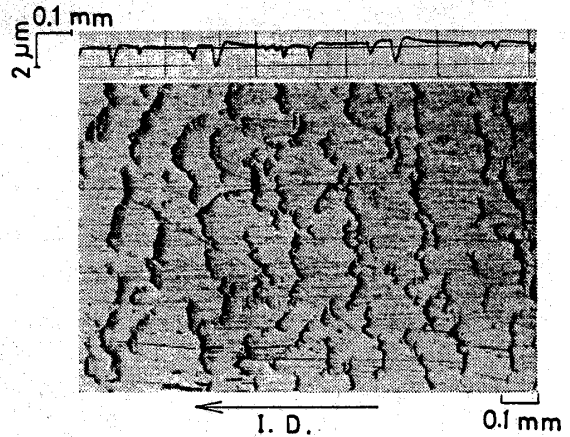
3.3 漸増形(Ⅲ) (Ⅲ)では、行程中初期より「微小き裂面」〔図9(a)〕が現れ、μの増大に伴い微小き裂の数が増加する。微小き裂はしごき方向にほぼ直角で、長さ0.1~0.2 mm、深さ5~10 μm程度のものであり、肉眼での識別は困難である。行程初期の摩擦係数μがやや小さい行程時期には、ダイス入口側の一部に擦過面が現れるが、その他の大部分は微小は

ん点状〔図9(b)〕を呈する。その表面あらさ R_{max} はおよそ0.3 μm程度でダイス面とほぼ同じであり、しごき後の表面に見られるような微小き裂は認められない。しかし、表4 E欄に示すように、この摩擦面には、材料のせん断降伏応力に近い7.0~9.8 kg/mm²程度のきわめて大きな平均摩擦せん断応力 τ_m が作用し、準焼付き状態が現れたものとみられる。これにより、表面層の付着、皮下層材料の先進が生じ、ダイス出口近傍の素材表面ではダイス出口部の摩擦による二次的引張応力の作用下で静水圧力が消滅するため、微小き裂が発生するものと考えられる。

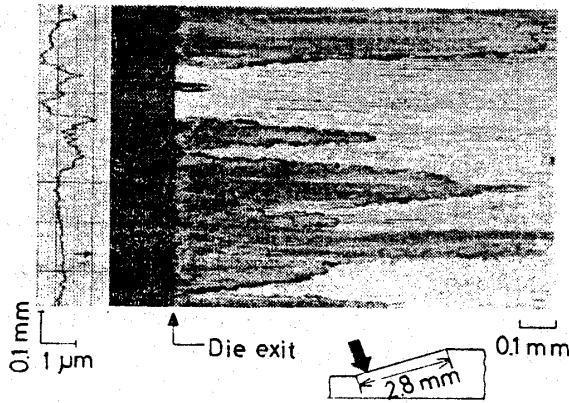
3.4 急増後高摩擦一定形(Ⅳ) (Ⅳ)では、行程初期より表層はく離面〔図10(a)〕が現れ、行程の進みに伴いそのはく離現象は大規模になる。この場合にはしごき中の素材摩擦面〔図10(b)〕にも、既にめいりょうな表面き裂が発生している。表4 F欄に示すように、摩擦せん断応力 τ_m は9.0~10.5 kg/mm²となり素材のせん断降伏応力にほぼ等しく、摩擦面の全域にわたって焼付き状態となっている。材料縦断面組織の写真〔図10(b)〕に示すように、ダイ



(a) しごき後の材料表面性状



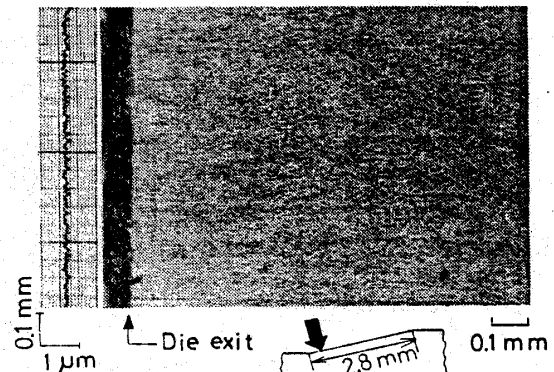
(a) しごき後の材料表面性状



(b) しごき中の材料表面性状

潤滑剤：P4, しごき率：20%, しごき行程：300 mm

図8 むしろ面(D)



(b) しごき中の材料表面性状

潤滑剤：P2, しごき率：20%, しごき行程：300 mm

図9 微小き裂面(E)

ス入口部には顕著なバルジ変形が生じ、材料はその皮下層を流れて内部き裂を形成する。行程の進みに伴い内部き裂の成長と材料の引き込みが繰返され、表面に間隔 $50 \mu\text{m}$ 程度の層状構造が形成される。ダイス出口近傍の素材表面層には二次的引張り応力の作用と静水圧力の消滅が生じるため、き裂の成長、貫通が生じ、層状構造の一部で表層はく離を生ずるものと考えられる。

さて、上述のように、しごき後の表面性状は比較的多彩で6種の性状に区分されたが、しごき中の摩擦面

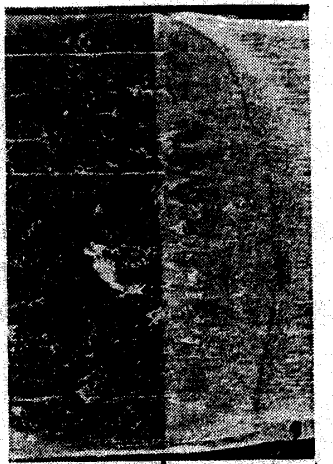
は、ほぼ境界潤滑状態とみなされる擦過面とさざ波面、および、摩擦せん断応力が材料のせん断降伏応力にはほぼ等しくなっている焼付き面と微小はん点面（準焼付き面）の2種類に大別されることがわかる。後者の発生割合が増すにしたがって、しごき後の表面は劣化してゆくわけである。

4. 耐焼付き能評価尺度に関する考察

既報⁽⁹⁾⁽⁷⁾において、摩擦面が境界潤滑状態と焼付き状態の2領域から成る場合の平均摩擦せん断応力 τ_m は

$$\tau_m = \mu_b p_b (1 - \gamma_w) + \gamma_w \tau_w \dots \dots \dots (2)$$

と表されることを示した。ここに、 μ_b は境界摩擦係数、 p_b は境界潤滑面に作用する面圧、 γ_w は全接触面積に対する焼付き面積の割合、すなわち焼付き面積率、 τ_w は焼付き部に生ずる摩擦せん断応力を表す。前章図5~10の場合について、焼付き面積率 γ_w を万能投影機によって実測し、平均摩擦せん断応力 τ_m との関



(a) 材料の表面性状



(b) 材料縦断面組織

潤滑剤: P01, しごき率: 30%, しごき行程: 300mm

図10 表層はく離面 (F)

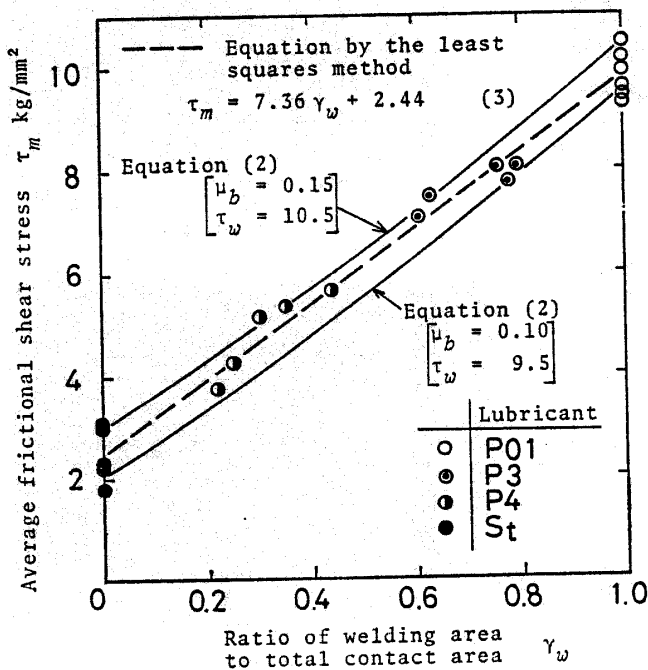


図11 ダイス面平均摩擦せん断応力と焼付き面積率の関係

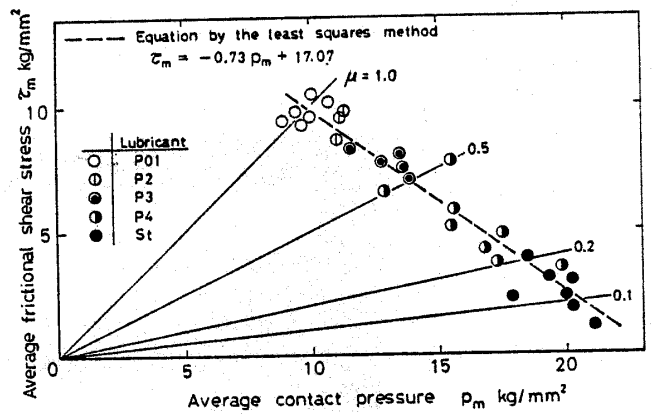


図12 ダイス面平均摩擦せん断応力と平均面圧の関係

係を示したのが図 11 である。実験点はほぼ直線上にのっており、最小二乗法を用いて式表示すれば、

$$\tau_m = 7.36\gamma_w + 2.44 \dots\dots\dots(3)$$

となる。式 (2) と (3) を等置すれば、 $\tau_w = 10\text{kg/mm}^2$, $\mu_b p_b = 2.44\text{kg/mm}^2$ が得られる。前述してきたように、 τ_w の値は焼付き摩擦面下における微小ビッカース硬さ $H_V = 45 \sim 52$ から推定されるせん断降伏応力 $9.6 \sim 11.1\text{kg/mm}^2$ にほぼ等しい。本実験では p_b の分離測定は不可能であるが、ダイス面平均面圧 p_m の実測値と τ_m の関係をプロットすると図 12 に示すようになる。しごき加工では、裏板側の摩擦係数 μ_b とダイス面側の摩擦係数 μ_D の差が大きいほどダイス面圧 p_m は大きくなることが知られている⁽⁹⁾。この実験では、裏板側の摩擦状態はほぼ付着状態で常に一定であるから、ダイス面側の摩擦が小さくなるほど平均面圧 p_m は増すことになる。図 12 の逆相関関係はこのことを表しており、

$$\tau_m = -0.73p_m + 17.07 \dots\dots\dots(4)$$

という直線式で近似される。上式と式 (3) を用いれば、ダイス面の平均摩擦係数 $\mu = \tau_m / p_m$ は、焼付き面積率 γ_w によって次式のように表される。

$$\mu = (7.36\gamma_w + 2.44) / (-10\gamma_w + 19.96) \dots\dots(5)$$

境界摩擦係数 μ_b は $\gamma_w = 0$ において得られ、0.122 となるが、これはほぼ妥当な大きさと思われる。図 13 は、 μ と γ_w の実測値をプロットしたものである。破線は式 (5) の計算値を示すもので、実験点ときわめて良い一致を示している。また、図 11 および 13 中

の実線は式 (2) に $\mu_b = 0.10$, $\tau_w = 9.5\text{kg/mm}^2$, および $\mu_b = 0.15$, $\tau_w = 10.5\text{kg/mm}^2$, $p_b = p_m$ を代入して計算したものであり、実験点のすべてはこの線の範囲内におさまることがわかる。

さて、焼付き面積率 γ_w は、まさに焼付きの定量的評価尺度そのものであるが、本実験では、式 (3) および (5) によって γ_w は τ_m もしくは μ と一義的に結びつけられる。したがって、摩擦係数 μ そのものを精度の良い焼付き評価の量的尺度とみなしてよいことが結論される。

本摩擦試験によれば、潤滑剤としごき率を変更して得られた $\mu-h$ 線図 (図 4) から、許容の焼付き面積率 γ_w (したがって許容の摩擦係数 μ) をパラメータとし、素材の表面積増加率 η とすべり距離 h の 2 因子表示による限界曲線を描くことができる。図 14 は、線条こん面を許容の表面性状 ($\mu = 0.2$) とした場合の一例を示すもので、潤滑剤の耐焼付き能の明確な評価を下すことができる。すなわち、低粘度油 P01 および P2 は表面積増加に対しても、あるいはすべり距離に対してもほとんど耐焼付き能を示さない。P4 の場合、 η が低い時 $\mu = 0.2$ となる行程が比較的大きいことから、しごき距離に耐える能力はストックオイル (St) に匹敵するが、 η が増すと、 $\mu = 0.2$ となる h が急減することから、表面積増加に耐える能力は St に比較して低いことがわかる。このような性能がどのような機構によってもたらされるかの検討から、耐焼付き能の良好な潤滑剤を開発することが今後の課題として残される。

5. 結 論

塑性加工用潤滑剤の耐焼付き能を的確に評価する方法を検討するため、焼付き現象に重大な影響を及ぼす素材表面積増加率 η およびすべり距離 h の 2 因子を比較的広範囲に変化させるしごき形

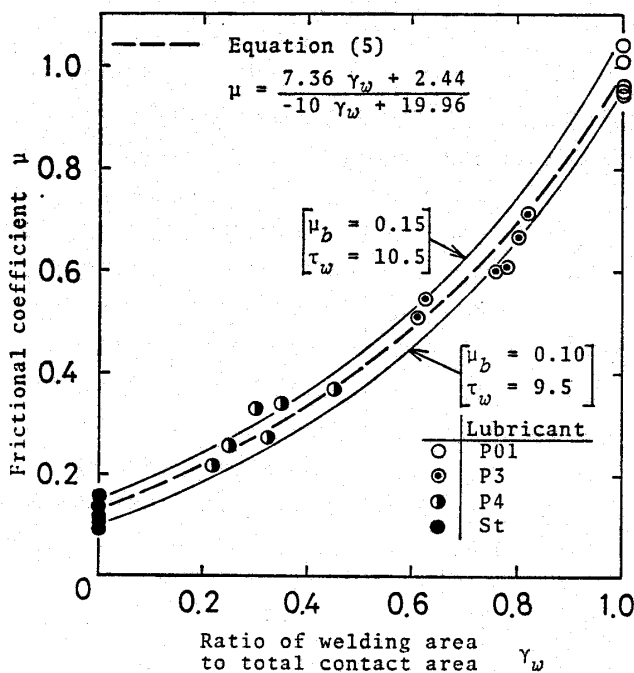


図 13 摩擦係数と焼付き面積率の関係

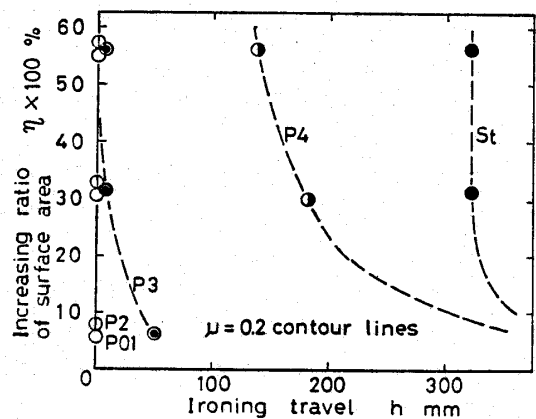


図 14 耐焼付き能評価限界線図

摩擦試験機を試作した。測定体の荷重検定および予備実験の結果、摩擦力および垂直力ともに相互干渉なく精度良く測定でき、 η は60%程度まで、 h は350mm程度までの摩擦試験が可能となることが確認された。本試験機を用いて、工業用純アルミニウム材料(A1050)にパラフィン系鉱油を適用して、しごき行程に伴う摩擦係数 μ および材料摩擦面性状の変化に詳細な検討を加えた。その結果、塑性加工用潤滑剤の耐焼付き能評価の尺度と方法について、つぎの結論が得られた。

(1) しごき行程に伴う μ の変化は、I：低摩擦一定形、II：低摩擦一定後漸増形、III：漸増形、IV：高摩擦一定形という4形成に分類される。 μ の増加すなわち潤滑状態の劣化の程度に応じて、しごき後の材料表面性状は、A：さざ波面、B：擦過傷面、C：線条こん面、D：むしれ面、E：微小き裂面、F：表層はく離面の6形態が出現し、焼付き発生、成長過程と μ の増加過程の対応関係が明らかにされた。

(2) 本実験において、しごき中にダイス面と接触している摩擦面は、境界摩擦領域と焼付き領域の二つに大別されることがわかった。焼付き面積率 γ_w の大きさによって、しごき後の表面性状は(1)項のように比較的多彩に変化するわけである。本実験範囲内の境界潤滑領域では摩擦係数 μ_b は0.10~0.15の範囲でほぼ一定、焼付き領域では摩擦せん断応力 τ_m は

9.5~10.5 kg/mm²の範囲で材料のせん断降伏応力にほぼ等しい定値となることが確認された。そのため平均摩擦係数 μ もしくは平均摩擦せん断応力 τ_m は、焼付き面積率 γ_w によって一義的に定められることになる。

(3) 摩擦特性値 μ 、 τ_m および γ_w の間に一義的関係が成り立つため、正確かつ容易に測定しうる μ を耐焼付き能評価尺度として用いることができる。したがって、許容の表面性状を μ の指定によって表現し、素材の表面積増加率 η とすべり距離 h の2因子表示による μ 一定の限界曲線から、耐焼付き能の評価を試みることができた。その結果、高粘度油のストックオイルは表面積増加に耐えうる能力に優れ、P4はその能力は比較的低いやすべり距離に耐える能力はストックオイルに匹敵すること、これに比べ、低粘度油P01、P2はいずれの能力にも格段に劣ることがわかった。

文 献

- (1) 河合・中村, 機論, 39-328 (昭48), 3811.
- (2) Wiegand, H., ほか2名, *Stahl u. Eisen*, 81-41 (1961), 924.
- (3) Fukui, S., ほか4名, *Int. J. Mech. Sci.*, 4 (1962), 297.
- (4) 須藤・ほか2名, 塑性と加工, 17-190 (昭51), 867.
- (5) 大木根・ほか4名, 塑性と加工, 20-222 (昭53), 644.
- (6) 河合・ほか2名, 機論, 43-369 (昭52), 1947.
- (7) 河合・ほか2名, 機論, 45-389, C (昭54), 139.
- (8) 福井, 塑性と加工, 12-128 (昭46), 701.

討 論

〔質問〕 工藤英明(横浜国立大学工学部)

ていねいな実験によって塑性加工におけるトライボロジカルな現象に一步立ち入られたことに敬意を表する。しかし本研究において用いられた条件は、実際の塑性加工(冷間加工に限っても)と次の点で重要な違いがある。

(i) 加工速度が本研究では1 mm/sと低く、潤滑剤の動水圧的効果や発熱効果はほとんど見られないはずである。

(ii) 圧縮加工では表面積増大と接触圧力は本実験条件よりもずっと大きい。

潤滑性能の試験法を確立されることが本研究の目的ならば、上記の重大な障壁を今後いかに乗越えられるおつもりか、示唆を賜りたい。

〔回答〕 ご指摘のように、塑性加工においては表面積増加、すべり距離、接触長さ、速度、温度、面圧、工具および被加工材の材質などの摩擦条件がきわ

めて広範囲に変化するため、これらの条件の全範囲をカバーしようとするような摩擦試験法を確立することは至難の技と考えられる。本実験では、焼付きに重大な影響を及ぼすと考えられる表面積増加とすべり距離の量的影響の分離抽出に焦点を絞ったため、導入効果および発熱効果がほとんど現れない低速条件を選んでいる。面圧範囲は主に試料の板厚としごき率によって自動的に定まり、本実験条件では中程度の面圧であるが、試料板厚を減らして面圧を高めることは可能である。また、本実験における表面積増加率は量的測定が比較的容易という長所を持つが、おおせのようにその絶対値が比較的小さいという欠点をもっている。本試験機の特徴を知って、耐焼付き能の評価範囲を明らかにすることが今後必要だが、塑性加工に現れる摩擦条件の全範囲をカバーするためには、複数の試験機による結果の総合が不可欠と考えている。