

しごき形摩擦試験機による耐焼付き能評価*

(標準条件の提案)

河合 望**, 中村 保***
Nozomu KAWAI, Tamotsu NAKAMURA
堂田 邦明**, 広瀬 圭介****
Kuniaki DOHDA, Keisuke HIROSE**Key Words:** Tribology, Forming, Frictional Testing Apparatus, Ironing, Frictional Coefficient, Galling, Mineral Oils, Mild Steel

1. 緒 論

塑性加工における工具・材料面間の焼付き現象は、所要加工力の増大、製品表面の損傷、激しい工具摩擦などをもたらす。塑性加工の成否を律する⁽¹⁾。そのため、塑性加工用潤滑剤には、減摩性能以外に耐焼付き能がぜひとも必要とされる。しかし、現在なお、耐焼付き能を的確に評価し得る試験方法が確立されていない⁽²⁾。

塑性加工の焼付きに影響を及ぼす因子は数多く⁽²⁾⁽⁶⁾⁽⁸⁾⁽¹¹⁾、それらのすべてを一台の試験機で評価することは不可能である⁽³⁾。そこで本研究では、冷間塑性加工の焼付きにとって最も重要と考えられる2因子すなわち新生面の出現とすべり距離の影響を量的に評価し得ることを主眼として、しごき形摩擦試験機を試作した。前報⁽¹²⁾では工業用純アルミニウム板材を用いて試験を行い、耐焼付き能評価の一試案を提案した。

本報では、さらに鋼板を用い、ダイス角、しごき率範囲を変え、各種鉱油系潤滑剤を適用して試験を行った結果、耐焼付き能を評価するための標準試験方法を明らかにすることができたので、ここに報告する。

2. 実験条件

2.1 実験装置 本実験に用いたしごき形摩擦試験機は前報⁽¹²⁾に詳述してあるので、ここではその要点を説明するにとどめる。図1に試験機の原理を示す。素板①は拘束板②と一体で上方に引き上げられ、ダイス③によってしごき加工を加えられる。拘束板と素板間の摩擦を高めることにより、限界しごき率を顕著に

増加させ得るが、そのため拘束板面にダイヤモンド電着による表面加工を施して、表面あらさ R_{max} を $40 \mu m$ 程度とする。これによりしごき率を数十%まで増すことができ、後述のように表面積増加比を2程度まで高めることができる。しごき率の変更にはガイド軸受④を左右に移動させる。しごき加工ダイスには垂直力 N_D および摩擦力 F_D が同時に作用するが、この2成分力は加工中行程に対して連続的に分離測定され、X-Y レコーダに同時記録されるようになっている。図2は試験機主要部の外観写真を示すものである。試験機は最大容量 98 kN のロングスライドシリンダを有する油圧駆動引張試験機のベッド⑥上に取付けられ、チャック⑤によってしごき行程が与えられるようになっている。

2.2 実験条件 主な加工条件を表1にまとめて示す。しごき距離は引張試験機の油圧シリンダ内ピストンの可動範囲で制限され、最大 350mm である。しごき速度は温度効果、動水力学的效果をできるだけ小さくするため、1mm/s の低速で一定とした。厚さ 0.8

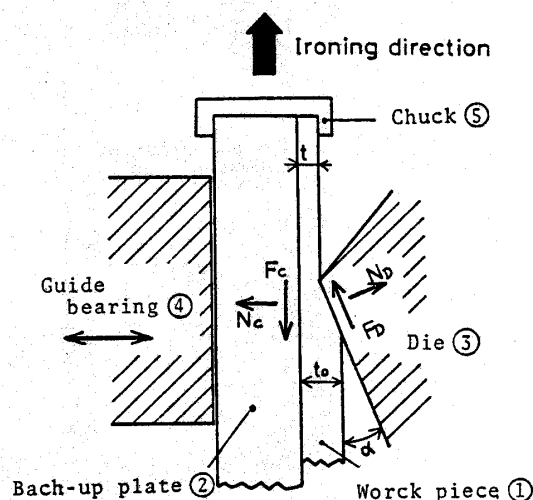


図1 しごき加工原理図

* 昭和55年11月14日 第31回塑性加工連合講演会において講演、原稿受付 昭和56年5月13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)。

**** 三菱重工業(株) (〒100 東京都千代田区丸の内 2-5-1)。

mm, 幅 10mm, 長さ 450mm の帯板を冷延鋼板から圧延方向に採取し, 長手方向に 2000 番エメリーパーでポリッシュ処理を施して試験片とする. この程度の幅/厚さ比によれば, しごき中ほぼ幅ひずみ零の平面ひずみ状態が出現できる. ダイスマテリアルには, 合金工具鋼 SKD 11 焼入れ材を用い, 1 実験ごとにホワイト

アランダム 8000 番でラッピング加工を施し, 摩擦面を常に $R_{max} \approx 0.1 \mu m$ に保った.

潤滑剤としては表 2 に示す性状のパラフィン系鉱油 4 種 (P1, P2, P3, St; ストックオイル), ナフテン系鉱油 4 種 (N1, N2, N3, N4) と流動パラフィン 1 種 (L2) を用いた. ここに, それぞれの種別記号に付記の番号は粘度の大小を示すものである. また, 表 3 に示す油性向上剤 1 種, 極圧添加剤 3 種を流動パラフィン L2 に 1wt% 添加して用いた. 実験は恒温室内 ($20 \pm 1^\circ C$) で行い, 同一条件で 3 回以上繰返し, そのすべての結果を検討の対象とした. しごき率 R_c と素板の表面積増加比 η^* の関係をみるため, しごき前後の素板表面積の測定を行った. ここに, $r = (t_0 - t) / t_0$, $R_c = r \times 100\%$ で t_0, t はしごき前後の素板板厚, $\eta^* = S / S_0$ で, S_0, S はしごき前後の素板表面積である. ダイスマ角 $\alpha = 10^\circ$, ストックオイル潤滑の場合を一例として図 3 に示す. 図中には平面ひずみ, 一様変形仮定の計算結果 $\eta^* = 1 / (1 - r)$ が付記されているが, 実

表 1 実験条件

	材質および寸法	機械的性質	表面仕上げ
ダイス	合金工具鋼 SKD11(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	軟鋼板 (SPCE) 厚さ 0.8mm 幅 10mm 長さ 450mm	引張り強さ 308.9MPa 加工硬化係数 0.224	しごき方向にエメリー紙 (#2000) で研磨 表面あらさ $R_{max} \approx 0.5 \mu m$
しごき率	5, 10, 20, 25, 30, 35, 40%	ダイスマ角	5, 10, 20°
しごき距離	300mm	実験温度	$20 \pm 1^\circ C$
しごき速度	1mm/s	実験湿度	$45 \pm 5\%$

表 2 供試潤滑剤の性状

項目	記号	P1	P2	P3	St	N1	N2	N3	N4	L2
動粘度 m^2/s	-20°C	6.45×10^{-2}	19.6	83.0	4600	6.40	23.5	80.0	318	23.5
	-37.8	3.98	10.4	33.7	1085	3.88	10.8	28.3	84.0	12.0
	-98.9	1.42	2.64	5.34	50.2	1.39	2.41	4.06	6.80	2.86
硫黄分	wt%	0.02	0.01	0.10	0.18	0.06	0.33	0.46	0.52	0.01
炭分析 (n-d-M 法)	-C _A %	10.3	3.2	0.0	14.1	24.1	17.3	20.0	22.1	0.0
	-C _N	31.5	27.7	36.8	20.3	31.5	43.2	38.8	40.6	38.8
	-C _P	57.8	69.1	63.2	65.6	44.5	39.5	41.2	37.3	61.2
平均分子量		203	298	399	787	210	263	311	340	308

P: パラフィン系鉱油, N: ナフテン系鉱油, L: 流動パラフィン, St: ストックオイル

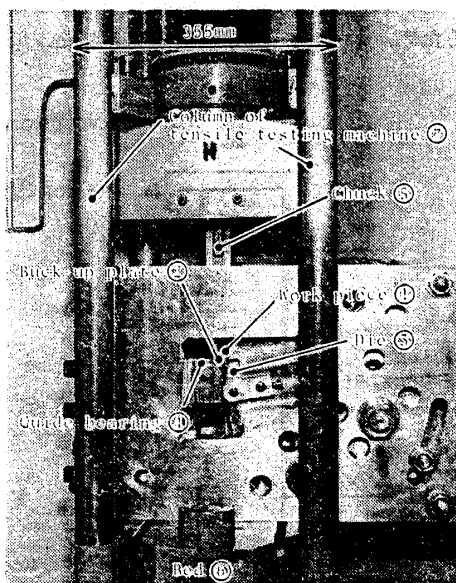


図 2 試験機主要部外観写真

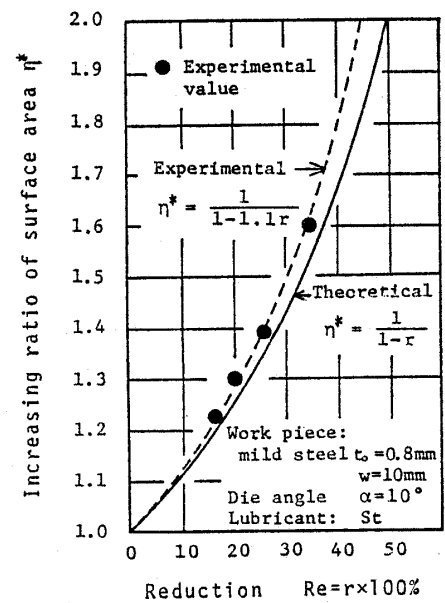


図 3 しごき率と表面積増加比の関係

験点は実験式 $\eta^* = 1/(1-1.1r)$ の上にほぼのっていることが示されている。

3. 摩擦係数, 焼付き比および製品表面性状

3.1 摩擦係数と素材表面性状の行程に伴う変化

図4に潤滑剤 P3, ダイス角 $\alpha = 10^\circ$ で一定とし,

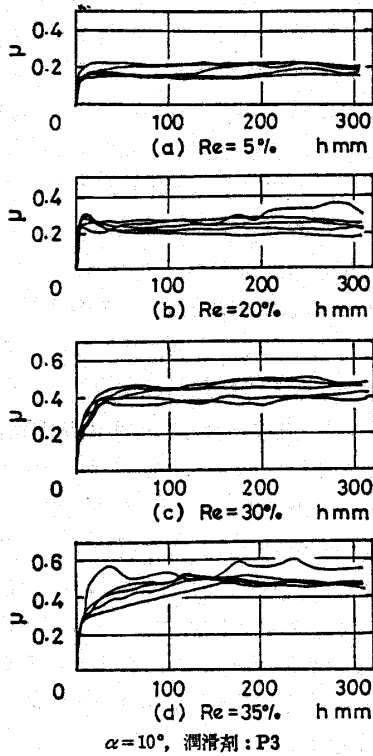


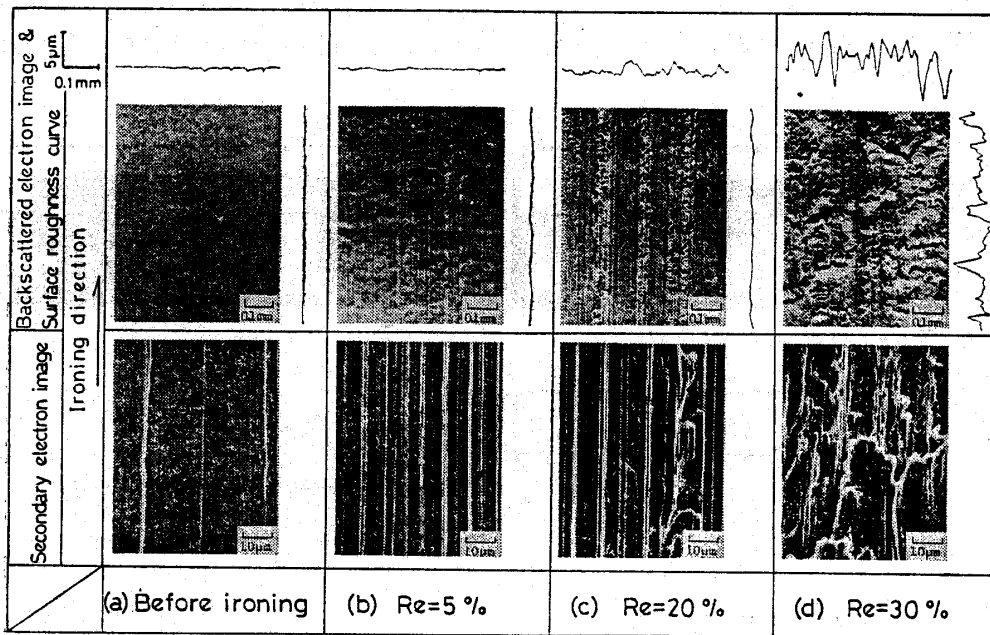
図4 摩擦係数-行程線図 (しごき率の影響)

しごき率 R_e を 5, 20, 30, 35% と変更した場合のしごき行程に伴う摩擦係数 μ の変化を示す。図から明らかかなように, 摩擦係数の変化形式には, しごき行程を通して摩擦係数値がほぼ一定である定摩擦形と行程に伴ってわずかに増加する漸増形の2種類がみられる。前報⁽¹²⁾のアルミニウム板のしごきでは, このほか低摩擦一定後漸増形および高摩擦一定形 ($\mu = 0.9 \sim 1.0$) が経験されている。 R_e が5%では, 行程 h が300mmにおける摩擦係数 μ_{300} は0.17程度と低く, R_e が20%では, 行程途中から漸増するものもみられ, μ_{300} は0.22程度とわずかに高くなっている。 R_e が30%では, 行程初期で μ は0.40程度まで急増し, その後漸増している。 R_e が35%と高まると, 行程初期における摩擦係数急増行程での μ の変動とばらつきが大きく, μ_{300} は0.5程度まで高まっている。

図5は加工前および図4の各条件に対応する加工後の素板表面の走査形電子顕微鏡による反射電子像写真, あらさ曲線および同一面の二次電子像写真を示すものである。写真によれば, (a)の処女面に比べて, わずかのすり傷を有する面(b)(以後擦過傷面と呼

表3 添加剤の分類と構造式

分類	添加剤	記号	構造式
油性向上剤	ステアリン酸	S.A.	$C_{17}H_{35}COOH$
極圧添加剤	塩化パラフィン	C.P.	$CN_3(CH_2)_nCH_3$ の塩化物 (cl: 40%)
	硫化油脂	S.F.A.	油脂の硫化物
	トリブチルフォスファイト	T.B.P.	$(C_4H_9O)_3P$



$\alpha = 10^\circ$, 潤滑剤: P3, $h = 300$ mm

図5 加工前後の素板表面の走査形電子顕微鏡写真 (しごき率の影響)

ぶ), ある程度の線条こん(痕)を有する面(c)(以後線条こん面と呼ぶ), および全面にかなりのむしれを有する面(d)(以後むしれ面と呼ぶ)に大別することができる。本実験範囲内で現れる表面はすべてこの3種に分類されたが, これは前報⁽¹²⁾のアルミニウム板の結果とほぼ類似である。(b)擦過傷面は, しごき方向に $R_{max}=0.1\sim 0.3\mu\text{m}$ 程度の微細なすり傷を有する面で, 地は処女面と大きな相違はなく, 摩擦係数が

$\mu\leq 0.18$ の範囲で出現する。このすり傷はダイス表面の微小突起によるものと思われるが, 摩擦面には焼付きらしいものは見当たらず, 全体としていわゆる境界潤滑状態におかれたものとみられる。(c)線条こん面は, しごき方向に深さ $2\sim 5\mu\text{m}$, 幅 $20\sim 50\mu\text{m}$ のめいりょうな線条痕を有する面で, 摩擦係数 $\mu=0.15\sim 0.25$ の範囲で出現する。(c)の二次電子像によれば, 線条こん内部にはしごき方向に垂直に微小き裂あるいはむしれが発生している。これは焼付きによって形成されたものと考えられる。(d)むしれ面は上述のような微小き裂もしくはむしれが面状に拡大したもので, この場合, $\mu\geq 0.2$ となる。ここには示さないが, しごき率をさらに高めると, むしれの程度が激しくなりき裂深さが $30\mu\text{m}$ 以上にも達するものが出てくる。次に上述の加工後の表面がどのような過程を経て生成されるかを検討するため, しごき中における素板とダイスの接触状況を観察してみよう。

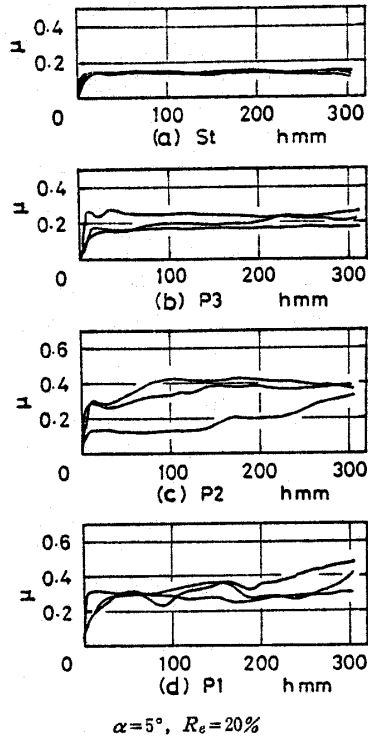
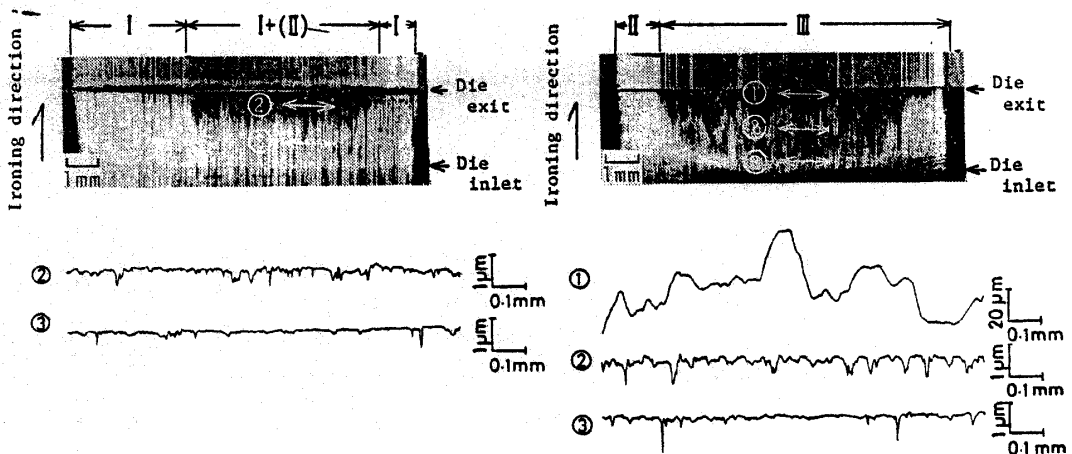


図6 摩擦係数-行程線図 (パラフィン系鉱油粘度の影響)

3.2 摩擦係数と接触中の摩擦面性状の関係 図6はダイス角 $\alpha=5^\circ$, しごき率 $R_e=20\%$ で一定として, 潤滑剤を (a) St, (b) P3, (c) P2, (d) P1 と変更した場合のしごき行程に伴う摩擦係数の変化を示すものである。St から P1 と粘度が低下するに従って摩擦係数は次第に高くなっている。St 潤滑の場合, μ_{300} は 0.17 程度の低摩擦一定形であり, 粘度が低下するに従って漸増形に移行し, P1 の μ_{300} はほぼ 0.4 に達している。

図6 (a) および (c) の場合を例にとって, しごき行程 h が 300mm において, 行程を中断して素板を取り出し, しごき中およびしごき後の素板表面を同時に



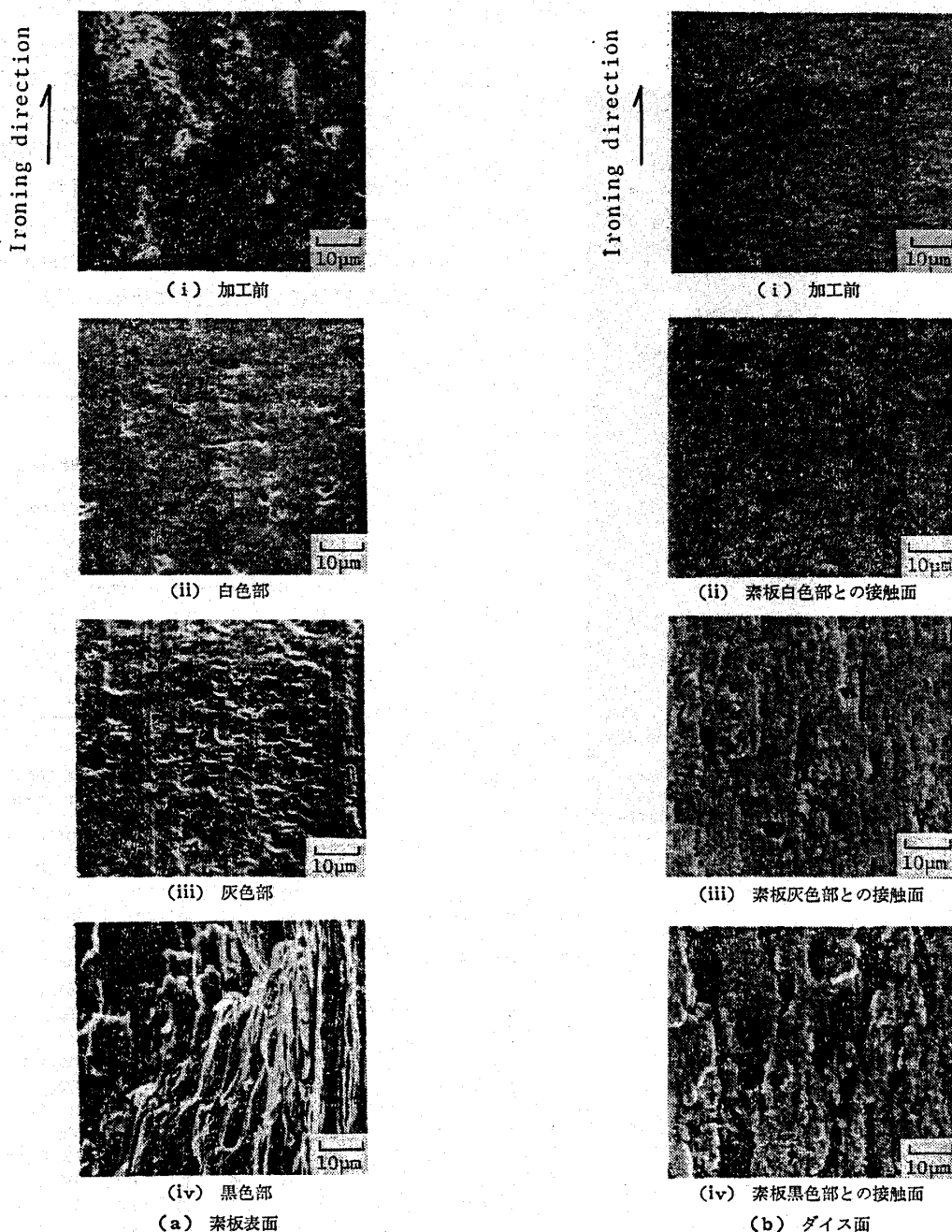
(a) 潤滑剤: St (b) 潤滑剤: P2

I: 擦過傷面, II: 線条こん面, III: むしれ面
 $\alpha=5^\circ, R_e=20\%, h=300\text{mm}$

図7 しごき行程中における素板表面性状

万能投影機による拡大写真として示したものが図7である。St 潤滑の場合 [同図 (a)], 摩擦面中央の出口側にわずかな灰色領域②がみられるが, その他はすべて白色領域③から成っている。表面あらさ曲線によれば灰色部②には $R_{max}=0.5\sim 1\mu m$ 程度のくぼみやすり傷が存在している。白色部③は $R_{max}\leq 0.5\mu m$ 程度の滑らかな面であり, わずかなミクロ凝着はあるようであるが, ほぼ境界潤滑状態におかれているものと思われる。P2 潤滑の場合 [同図 (b)] には, 摩擦面出口に黒色領域①が発生しており, それに続いて灰色

領域②が入口に向かって広がっている。表面あらさ曲線を見ると, 黒色部①には $30\mu m$ 以上の凹凸があり, 素材の一部がダイス面に凝着して, えぐり取られたものとみられる。灰色部②および白色部③は St 潤滑の場合の対応部と類似のあらさを呈している。加工後の表面をみると, 黒色領域を経た表面性状はむしろ面(Ⅲ)となっており, 灰色領域を経たものは擦過傷面に程度の差はあるが線条こんが混在した面 [I+(Ⅱ)] あるいは線条こん面(Ⅱ)となっている。さらに, 白色領域を経たものは擦過傷面(I)となって



$\alpha=5^\circ$, $R_e=20\%$, 潤滑剤:P1, $h=300mm$

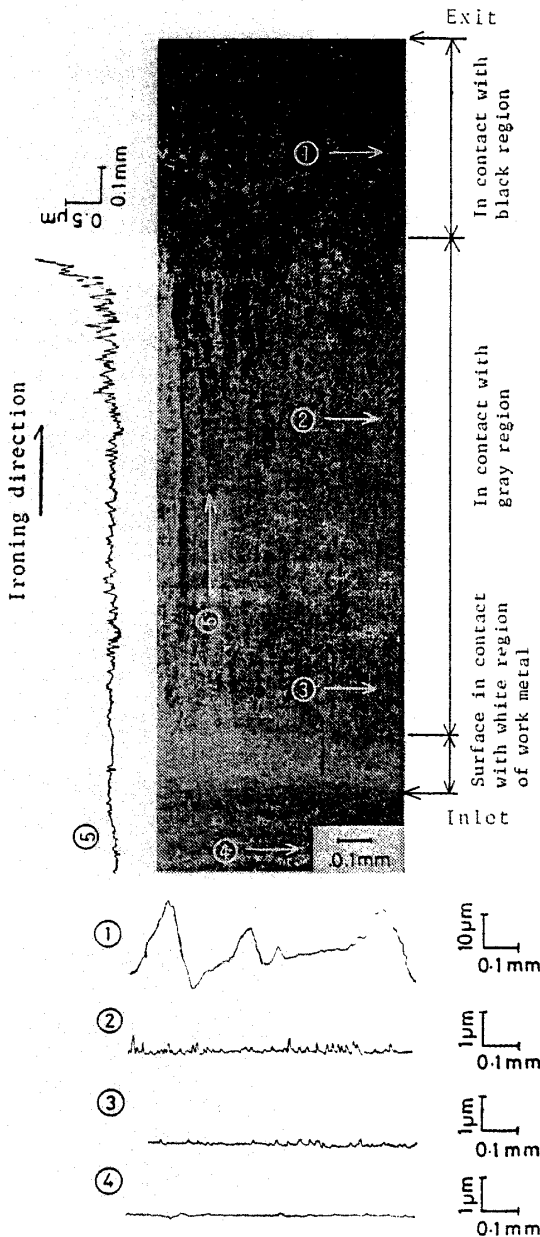
図 8 接触面の走査形電子顕微鏡写真

いる。本実験条件範囲内では素材の摩擦面にはこの黒色、灰色および白色の3領域のみが観察された。潤滑剤の優劣により各領域の出現割合が異なることになる。

3領域の表面状態をさらに詳細に検討するため、 $\alpha=5^\circ$, $R_e=20\%$, P1 潤滑の場合を例にとりて、加工前および3領域の素材表面および3領域素材面と接触中のダイス面について、走査形電子顕微鏡写真を示したのが図8である。黒色部[同図(a)-(iv)]では激しいむしれ状態がめいりょうに観察される。これに対応するダイス面[同図(b)-(iv)]では素材が厚く凝着し

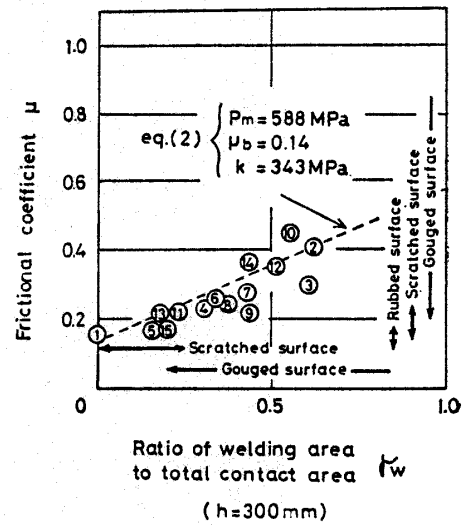
ている様子がわかる。灰色部[同図(a)-(iii)]ではしごき方向に伸びたすり傷と1~3 μm 程度の幅と長さをもつうろこ状くぼみがほぼ全面に分布しているのがみられる。すり傷は素材がダイス面上の凝着物によってひっかかれるこん跡、微小くぼみは凝着によって素材がむしり取られたこん跡と思われる。対応するダイス面[同図(b)-(iii)]には素材が不均一であるが全面にわたって凝着している様子が観察される。白色部[同図(a)-(ii)]には、加工前の素材表面[同図(a)-(i)]と比較すると、多少の圧下修正は認められるものの、マイクロ凝着や潤滑剤のマイクロボールらしきものはほとんどみられない。対応するダイス面も加工前と比較してほとんど変化がみられず、白色部は境界潤滑状態におかれていることが再確認される。

図9は、 $\alpha=5^\circ$, $R_e=20\%$, P2 潤滑の場合しごき行程 300mm におけるダイス面の光学顕微鏡写真およびダイスの入口から出口に向かってしごき方向にえがいたあらしき曲線を示す。素材白色部と接触している導入部付近では加工前に比較し性状およびあらしき共に



矢印は表面あらしき測定方向
 $\alpha=5^\circ$, $R_e=20\%$, 潤滑剤: P2, $h=300\text{mm}$

図9 ダイス摩擦面性状



	α°	$R_e\%$	Lu.	p_m MPa
①	5	5	P3	684.0
②	5	20	P2	500.8
③	5	20	P2	524.3
④	10	20	P3	598.8
⑤	10	20	P3	665.4
⑥	10	35	St	562.5
⑦	10	35	St	540.0
⑧	10	35	St	519.4
⑨	10	40	St	570.4
⑩	20	30	P2	581.1
⑪	20	30	P2	673.3
⑫	20	30	P2	554.7
⑬	20	30	P3	682.1
⑭	20	40	P3	515.5
⑮	20	40	St	586.0

Lu.: 潤滑剤

図10 摩擦係数と焼付き比の関係

ほとんど変化は認められないが、灰色部との対応面では出口に向かうに従って素材の接着が増し、表面あらさが大きくなってゆく様子がわかる。黒色部と対応する出口側の表面ではあらさの急増がみられる。

以上の表面観察から黒色部と灰色部は程度の差こそあれ、焼付き領域とみなしてよいように考えられる。そうすると、本実験にあらわれた摩擦面は境界潤滑面と焼付き面の2領域のみから構成されていることになる。この事実は前報⁽¹²⁾のアルミニウムの場合と同様である。このように考えて、素板とダイス面の全接触面に対する焼付き領域の面積比を焼付き比 γ_w とし、境界潤滑領域での摩擦係数 μ_b は面圧によらない定値⁽⁴⁾、焼付き領域での摩擦せん断力 τ_w は素材のせん断降伏応力 k に等しいとすると⁽⁷⁾、平均摩擦せん断力 τ_m と焼付き比 γ_w の間には

$$\tau_m = \mu_b p_b (1 - \gamma_w) + k \gamma_w \quad \dots\dots\dots (1)$$

なる関係が成り立つ。ここに、 p_b は境界潤滑領域に作用する接触面圧である。接触面平均面圧 p_m で両辺を割ると

$$\mu = \tau_m / p_m = \mu_b (p_b / p_m) (1 - \gamma_w) + (k / p_m) \gamma_w \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。 μ_b 、 k 、 $p_m (= p_b)$ が定値であれば、平均摩擦係数 μ は焼付き比のみに依存し、 γ_w の一次式で表せる。

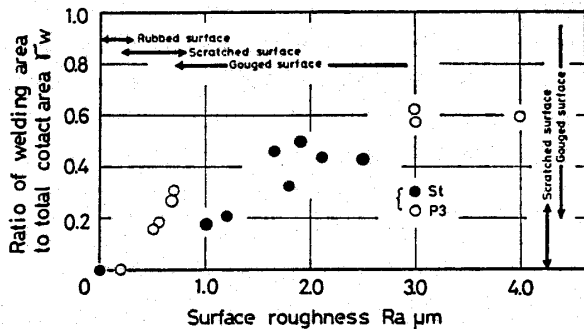


図 11 焼付き比と製品表面あらさの関係 ($h=300$ mm)

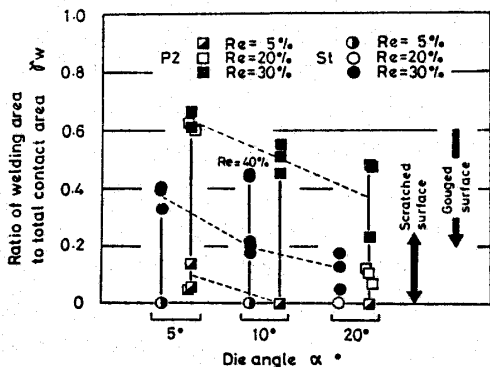
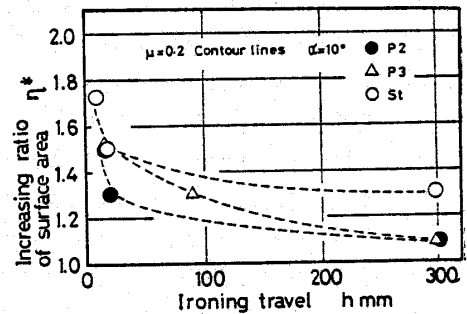
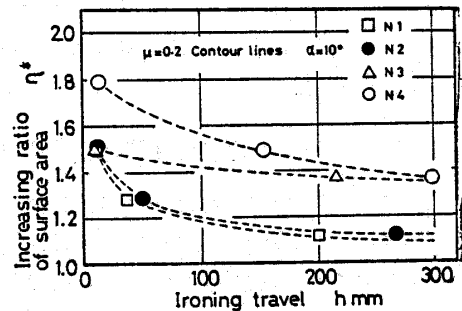


図 12 各ダイス角における焼付き比におよぼすしごき率の影響 ($h=300$ mm)

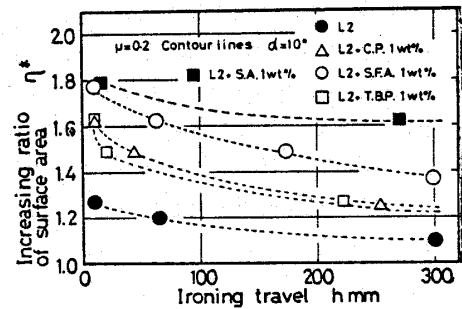
式(2)を実験結果と照合したのが図10である。ここに、式(2)の計算結果が破線で示されるが、素材のせん断降伏応力 k を焼付き部直下のビッカース硬さから推定して約 343 MPa、図4(a)、図6(a)を参照して μ_b を 0.14 と仮定する。摩擦面に作用する垂直荷重は焼付き領域と境界潤滑領域で負担されるが、各々の領域における面圧を分離して求めることは困難である。そこで第一近似として $p_b = p_m$ とおくことにした。また、実験点には、 $p_m = 500.8 \sim 684$ MPa と比較的近い面圧範囲のものを選んだが、式(2)の p_m の値としては、便宜的にこれらの平均値 584 MPa を用いた。 p_m は R_e ⁽¹¹⁾ と τ_m の減少⁽¹²⁾ によって増加するが、図10に付記の p_m の変化はおよそこれを物語るものである。ともあれ、両者の一致からみて、前述の考え方に大きな間違いはないものと結論される。こう



(a) パラフィン系鉱油



(b) ナフテン系鉱油



(c) 各種添加剤の効果

図 13 耐焼付き能評価限界線図

考えれば、摩擦係数は焼付き比 γ_w によって一義的に定まることになる。焼付き比 γ_w は当然しごき後の製品の表面性状を支配する。製品の表面性状を表示する尺度として、しごき方向と直角に測定した中心線平均あらさ R_a を採用し、焼付き比との関係を示したのが図 11 である。 R_a と γ_w の相関は明らかに看取される。上述のように、焼付き比は加工後の素板表面性状および摩擦係数と密接に相関することが明らかとなった。

4. 標準条件の検討

本試験機において制御可能な条件因子はしごき率（表面積増加比）とダイス角の二つである。新生面出現に対する潤滑剤の耐焼付き能評価を行うには、ダイス角を一定としてしごき率を順次高め、焼付き発生のしごき率あるいはしごき行程を知るのが一法と考えられる。図 12 は低粘度油の P2、高粘度油の St を用い、しごき行程 300 mm においてダイス角 $\alpha=5^\circ$, 10° , 20° に対するしごき率と焼付き比の関係をみたものである。いずれのダイス角でもしごき率が高まれば、焼付き比は増大し、ダイス角が小さい程その程度は大きい。劣悪な潤滑剤でもしごき率を低めれば焼付きが発生しないこと ($\gamma_w=0$)、優れた潤滑剤でもしごき率を高めれば必ず焼付きが発生することが、試験条件として必要である。 $\alpha=10^\circ$ と 20° の場合が一応この両条件を満たしているが、St よりさらに優れた潤滑剤がまれでないことを考えると、 $\alpha=10^\circ$ を標準のダイス角として用い、しごき率を操作因子とすることが適当と判断される。

5. 耐焼付き能評価限界線図

さて、耐焼付き能評価の量的尺度を 4 章の結果から導きたいのである。前述のように、焼付き比と摩擦係数の間には一義的な関係があり、また製品表面性状を表す中心線平均あらさ R_a と焼付き比の間にも密接な相関が存在する。従って加工後の素板表面の許容性状を摩擦係数によって定量的に指定し、表面積増加比 η^* としごき距離 h の 2 因子表示の座標面内に許容摩擦係数一定の等高線図いわば耐焼付き能評価の限界線図をえがくことができる。便宜的に許容し得る表面性状を線条こん面程度と仮定すると、図 10 からむしろ面が出現する最低の摩擦係数として $\mu=0.2$ を許容値とみなし得る。

図 13 は、上述の考えに従って、図 4 に例示する摩擦係数-行程線図の $\mu=0.2$ に至る行程の平均値から耐焼付き能限界線図をえがいたものである。同図(a)

のパラフィン系鉱油では、粘度が高くなるに従って限界線が上方に移動し、耐焼付き能の向上が示される。同図 (b) のナフテン系鉱油の場合も同様な傾向を示すが、一般的にパラフィン系鉱油より優れていることがわかる。ナフテン系鉱油には、芳香族化合物やイオウが比較的多く含まれること⁽¹⁰⁾がこの原因と考えられる。同図 (c) には、流動パラフィン L2 に各種添加剤を 1 wt% 加えた場合の結果を示す。極圧添加剤では塩化パラフィンとトリブチルフォスファイトが同程度で、硫化油脂がさらに良好となっているが、油性向上剤のステアリン酸が著しく優れていることが注目される。とくに硫化油脂に比べて、すべり距離が増しても、容易に表面が劣化しないことが示されている。

6. 結 論

表面積増加比およびすべり距離を比較的広範囲に変化させ得るしごき形摩擦試験機を用い、塑性加工における耐焼付き能を的確に評価する方法の確立を試みた。そのため、軟鋼板に各種鉱油系潤滑剤を適用し、ダイス角およびしごき率を種々変更して、しごき行程に伴う摩擦係数の変化、加工後の素板表面性状およびしごき行程中における摩擦面性状を詳細に検討した結果、本試験機による耐焼付き能評価の標準条件と量的方法について以下の結論が得られた。

(1) 軟鋼板に各種鉱油系潤滑剤を適用した場合現れる製品表面性状は擦過傷面、線条こん面およびむしろ面の 3 タイプに分類できた。これは、アルミニウム板の場合とおおよそ類似である。

(2) 軟鋼板においても、アルミニウム板の場合と同じく素材とダイスの接触面には焼付き面と境界潤滑面の 2 種類のみ出現する。また焼付き面に作用する摩擦せん断応力は素材のせん断降伏応力 τ にほぼ等しいことが確認された。

(3) 本試験機の標準試験条件としては、良好な潤滑剤でもしごき率を高めれば必ず焼付きが発生し、劣悪な潤滑剤でもしごき率を低めれば焼付きを発生しないことが必要である。この観点から、ダイス角 $\alpha=10^\circ$ を用いしごき率を操作因子とし順次高めて焼付きを発生させる方法が適当と判断された。

(4) しごき行程中にあらわれる摩擦係数は焼付き比と一義的に結びつき、焼付き比は製品表面性状を支配する。従って製品の許容表面性状を摩擦係数によって量的に指定することができる。許容表面性状を線条こん面とした場合、すなわち許容限界摩擦係数を $\mu=0.2$ とした場合の、表面積増加比およびしごき距離の 2 因子に対する限界線図から、潤滑剤の耐焼付き能評

価を量的に的確に行えることがわかった。

(5) 耐焼付き能評価の限界線図をえがいて、若干の潤滑剤の性能を比較したところ、パラフィン系鉱油よりナフテン系鉱油の方が優れていること、いずれの鉱油でも粘度が高まるに従って良好となること、および添加剤としては油性向上剤として知られるステアリン酸が格段に優れることが明らかとなった。

文 献

(1) Hill, R., *The Mathematical Theory of Plasticity*,

(1950), 163, Oxford Univ. Press.

- (2) Wiegand, H., ほか 2 名, *Stahl u. Eisen*, 81-41 (1961), 924.
 (3) 河合・中村, 潤滑, 18-3 (昭 48), 203.
 (4) 河合・ほか 2 名, 機論, 43-369 (昭 52), 1947.
 (5) 吉田, 塑性と加工, 19-204 (昭 53), 3.
 (6) Bernick, L.B., ほか 2 名, *Wear*, 48-2 (1978), 323.
 (7) 河合・ほか 2 名, 機論, 45-389, C (昭 54), 138.
 (8) 河合, 塑性と加工, 20-227 (昭 54), 1055.
 (9) 河合, 第 66・67 回西山記念技術講座, (昭 55), 167, 日本鉄鋼協会.
 (10) 山路, 潤滑, 26-1 (昭 56), 34.
 (11) 大矢根・ほか 3 名, 塑性と加工, 22-242 (昭 56), 257.
 (12) 河合・ほか 2 名, 機論, 47-417, C (昭 56), 644.

討 論

〔質問〕 時 沢 貢 (富山大学工学部)

耐焼付き機構を加工材表面とダイス面との対応でしごき過程を直視した結果を摩擦係数での変化で、まとめられたことに敬意を表する。

(1) 焼付きを生じるしごき過程で、鋼板の表面が白色から灰色に変わる過程をあらさ曲線よりみれば細かく連続しているの、潤滑剤の閉じ込め過程で光沢を失い灰色になるものと考えられ、一方、ダイス面に広がった凝着は加工前の鋼板の酸化皮膜の転写ではないか。そして、この凝着皮膜が新生された鋼板面をえぐりとり小さくぼみとなり、黒色にみえるのではないか。お考えがあればお教え願いたい。

(2) しごき率が高くなれば焼付き比は増大するということには同意するが、本文中で「ダイス角が小さい程その程度は大きい」また、潤滑剤との関連で $\alpha=5^\circ$ では悪く「 $\alpha=10^\circ$, $\alpha=20^\circ$ の場合が、一応この両条件を満たしている」について、一般の引き抜き加工のように最適ダイス角に対するお考えがあれば、その理由もお教え願いたい。

(3) 本研究で用いられた潤滑剤は比較的低粘度であるため、しごき過程ですべて焼付きを生じるので、顕著な比較はしにくいと思われるが、本試験法は半固体潤滑剤の性能評価にも応用できないか。

〔回答〕 (1) 灰色領域に接触しているダイス面では微小な凝着こんが全面に分散しており、また黒色領域に接触している面には素材が厚く凝着していることを走査形電子顕微鏡観察およびあらさ測定により確認した(図 8 および 9)。灰色領域は素材の工具面への

微小な凝着により微小くぼみが生じ、さらにそれらの凝着物によるひっかき傷が生成することによって光沢を失い灰色を呈するものと考えられる。黒色領域はご指摘のように工具出口側に発達した厚い凝着層により素材の一部がえぐりとられたものと考えられる。

凝着層の組成に関する検討が不十分なため、凝着層が素材表面の酸化皮膜の移着によるものか、あるいは母材自身の凝着したものか現在のところ不明である。焼付き機構の解明にとって工具面上の凝着層の発達過程を詳細に観察することは不可欠と考えている。

(2) 本研究は焼付きに重要な影響を及ぼす表面積増加とすべり距離の 2 因子を量的に評価するためのシミュレート試験法を確立しようとするものである。この観点から考えると、一定のダイス角で、しごき率を変化させた場合、焼付き無しから発生へと変化することが望ましいわけである。一般の引き抜き加工における最適ダイス角は引き抜き力極小を与えるものなので、本研究の場合とは異なるものと思われる。本研究では、結論(3)に述べた理由で $\alpha=10^\circ$ が最適であろうと判断される。また St よりさらに良好な潤滑剤に対しては $\alpha=5^\circ$ と小さくした方が良いように考えられる。

(3) 本実験では手始めとして液体潤滑剤に対して評価を行ったが、本試験機は固体などの各種潤滑剤の適用あるいは各種素材とダイスとの適合性評価が可能なのである。今後さらに、各種表面処理鋼板、固体潤滑剤などおよび適合性評価に対しても実験を行う予定である。