

539.375.6::621.892

引き抜き変形を伴うすべり面における摩擦機構*

(第2報, アルミニウム材料の場合)

河合 望**, 中村 保***, 瀬古 昇一****

1. 緒 論

塑性加工における摩擦面は境界潤滑状態におかれることが多いため, 材料がバルク塑性変形をこうむって新生面を露呈すると, 境界潤滑膜の破断ひいては焼付きを生じやすいという宿命を背負っている⁽¹⁾. 前報⁽²⁾では, 引き抜き変形を伴う摩擦面における摩擦機構なかならず焼付きの発生・成長に関する実験的検討を, 軟鋼材料に各種潤滑剤を適用して試みた. その結果, 図1に模式的に示すように, 行程の進みに伴い, 摩擦面は, I 境界摩擦状態, II 焼付きの発生・成長, III 焼付きの成長と潤滑剤の補修効果がほぼつりあう準平衡状態, IV 完全焼付き状態という一連の悪化過程をたどること, 潤滑性能が良好であればこの悪化過程は早期に消滅すること, そしてこのような摩擦状態の変化は摩擦係数変化に直接反映すること, および焼付き領

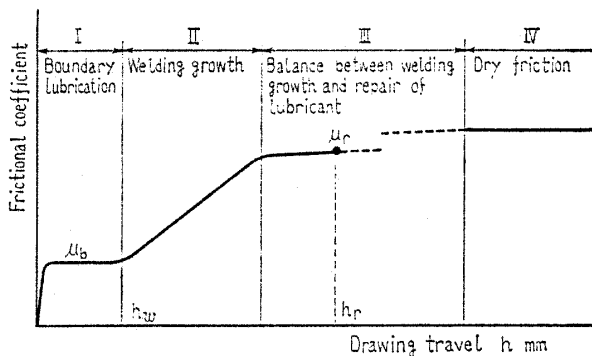


図1 引き抜き行程に伴う摩擦状態の変化

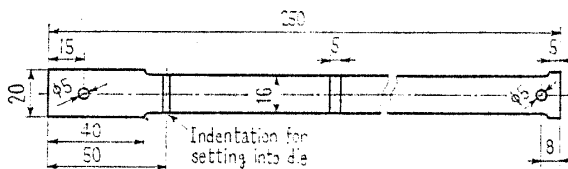


図2 試験片形状

域における摩擦せん断応力は供試潤滑剤に無関係にはほぼ一定値(材料のせん断降伏応力にはほぼ等しい)をとることなどが明らかにされた. さらに, 一連のこの変化過程の中から, 塑性加工用潤滑剤の性能を評価する尺度がみいだされた. すなわち, 境界潤滑性能評価尺度として境界摩擦係数 μ_b , 耐焼付き性能評価尺度として焼付き開始行程 h_w および焼付き補修能評価尺度として準平衡状態における摩擦係数 μ_r である.

焼付き現象は金属表面どうしの直接接触到起因するものであるから, 材料組合せによって著しく異なるであろうことは容易に想像される. そこで本報告では, 工業用加工材として多用されるアルミニウム材料を用いて同様の検討を行うことにした. その結果, 軟鋼材料の場合に得られた上述諸特性とはかなり異なる事実がみいだされた. また, 焼付き補修能評価尺度としては準平衡状態における摩擦係数 μ_r が軟鋼の場合と同様に有効であることがわかった. したがって, この尺度を用いて鉱油系潤滑剤の性能評価を試みた結果, 二, 三の重要な知見を得たのでここに報告したい.

2. 実験条件

実験には, 前報⁽²⁾⁽³⁾と同様の二次元引き抜き形摩擦試験機を用いる. 図2に示す厚さ 5 mm, 幅 16 mm の試験片に厚さを減ずる引き抜き変形を加え, ダイス面に作用する摩擦力と垂直力および引き抜き力を行程中連続測定する. 標準の試験条件を表1に示すが, 要点はつぎのようである. 試験材料は工業用純アルミニウム A1050 焼なまし材で, 摩擦面として圧延面 ($R_{max}=0.2\sim0.3\mu m$) をそのまま使い, 圧延方向に引き抜く. ダイス材料は SKD 11 焼入れ材で, 摩擦面にはラッピングを施し, 表面あらさ $R_{max}=0.3\sim0.4\mu m$ 程度に仕上げる. 最も摩擦係数の大きな潤滑剤を用いた場合の限界引き抜き率は約 15% であったため, これを標準の引き抜き率として採用する. 引き抜き速度には, 0.6 mm/s とかなり低速を用い, 潤滑剤の動粘性効果を最小限に抑えるようにした. ダイ

* 昭和52年5月20日 昭和52年度塑性加工春季講演会において講演, 原稿受付 昭和52年11月17日.

** 正員, 名古屋大学工学部

*** 正員, 静岡大学工学部 (〒432 浜松市大久保町 4643).

**** 准員, トヨタ自動車工業会社.

ス半角は 10° で一定とする。摩擦すべり距離は装置の関係上引き抜き行程で最大 140 mm である。摩擦試験の 1 回ごとにダイス面をラッピングし、1 種類の潤滑剤につき 5 回程度試験を繰り返す。供試潤滑剤としては、表 2 に示すパラフィン系鉱油 7 種、ナフテン系鉱油 4 種および流動パラフィン 3 種のほかに、添加剤として油性向上剤 3 種 (ステアリン酸、オレイルアルコール、ブチルステアレート) および極圧添加剤 3 種 (塩化パラフィン、トリブチルフォスファイト [T.B.P.]、硫化油脂) を用いる。

3. 引き抜き行程に伴う摩擦係数と摩擦面性状の変化

引き抜き行程 h の進みに伴う摩擦係数 μ の変化には、軟鋼材料の場合にも現れた一定形および漸増形のほかに漸減形および脈動形も現れ、結局四つの形式がみいだされた。以下、それら形式の特徴および発生機構について検討を加える。

表 1 試験条件

項目	材 質	機械的性質	表面あらさ
ダイス	SKD 11 (焼入れ)	硬さ $R_c \approx 58$	$R_{max} = 0.3 \sim 0.4 \mu m$
試験片	アルミニウム A1050 板厚 5 mm 焼なまし材	引張強さ 7.3 kg/mm^2 n 値 0.29	圧延面 $R_{max} = 0.2 \sim 0.3 \mu m$
引き抜き率	15%	引き抜き行程	0~140 mm
ダイス半角	10°C	実験室温度	$20 \pm 1^\circ \text{C}$
引き抜き速度	0.6 mm/s	実験室湿度	$45 \pm 5\%$

表 2 供試潤滑剤の性状
(a) パラフィン系鉱油

項目	記号	P01	P1	P2	P3	P4	Br ¹⁾	St ²⁾
		粘 度						
cSt	-20°C	1.63	6.45	19.6	83.0	326	2 150	4 600
	-37.8	1.24	3.98	10.4	33.7	111.2	549.6	1 085
	-98.9	0.65	1.42	2.64	5.34	11.5	32.2	50.2
硫 黄 分	wt %	0.02	0.02	0.01	0.10	0.13	0.20	0.18
環 分 析 (n-d-M 法)	-CA %	7.1	10.3	3.2	0.0	1.5	3.6	14.1
	-CN	32.3	31.5	27.7	36.8	31.3	30.6	20.3
	-CP	60.6	57.8	69.1	63.2	67.2	65.8	65.6
平均分子量		175	203	298	399	529	699	787

1) ブライトストック 2) ストックオイル

(b) ナフテン系鉱油

項目	記号	N1	N2	N3	N4
		粘 度			
cSt	-20°C	6.40	23.5	80.0	318
	-37.8	3.88	10.8	28.3	84.0
	-98.8	1.39	2.41	4.06	6.80
硫 黄 分	wt %	0.06	0.33	0.46	0.52
環 分 析 (n-d-M 法)	-CA %	24.1	17.3	20.0	22.1
	-CN	31.5	43.2	38.8	40.6
	-CP	44.4	39.5	41.2	37.3
平均分子量		210	263	311	340

(c) 流動パラフィン

項目	記号	L1	L2	L3
		粘 度		
cSt	-20°C	6.75	23.5	82.0
	-37.8	4.14	12.0	32.2
	-98.8	1.47	2.86	4.98
硫 黄 分	wt %	0.00	0.01	0.02
環 分 析 (n-d-M 法)	-CA %	0.0	0.0	0.0
	-CN	37.8	38.8	40.6
	-CP	62.2	61.2	59.4
平均分子量		200	308	373

3-1 一定形 一定形は、図 3 に例示するように、摩擦係数が引き抜き行程中約 0.1 の一定値を示すもので、ストックオイル、ブライトストックおよび N4 の

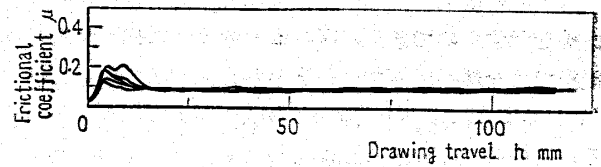
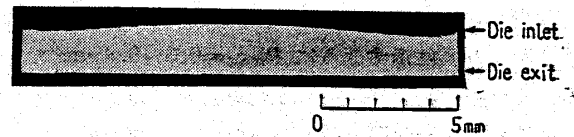
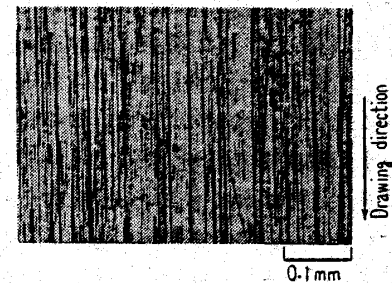


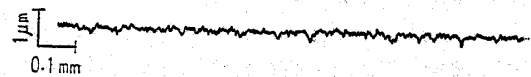
図 3 ストックオイル潤滑の場合の引き抜き行程に伴う摩擦係数の変化 (一定形)



(a) 材料摩擦面



(b) 材料摩擦面



(c) 材料摩擦面の表面あらさ曲線
(引き抜き方向に直角に測定)

図 4 ストックオイル潤滑の場合の材料摩擦面

一部という比較的高粘度の油を用いた場合にこの形式が現れる。図4(a)はストックオイル潤滑の場合の材料摩擦面全体の写真、図(b)はその拡大写真および図(c)はすべり方向に直角に測定した表面あらさ曲線を示すものである。図(a)のように肉眼程度の観察では全体が光輝面にみえるが、拡大してみると図(b)のようにすべり方向に多数の線条こんがみられる。その条こんのあらさは、図(c)に示すように $R_{max}=0.3\sim0.4\mu m$ となっており、図5(a)に示す素材圧延面の表面あらさ $R_{max}=0.2\sim0.3\mu m$ に比べて多少あらくなっている。一方、工具の初期表面あらさは図(b)に示すように $R_{max}=0.3\sim0.4\mu m$ である。また引き抜き終了後の工具摩擦面には、表面あらさ曲線または光学顕微鏡によって検知されうるようなアルミニウム材料の移着は認められなかった。したがって、図4(b)に示された線条こんは工具表面のおうとつによって圧下されたすり傷とみられる。前報⁽³⁾の軟鋼材料の場合にも述べたように、このような摩擦面は流体潤滑が混在せず、かつ焼付きも生じない、いわば境界潤滑面と呼ばれてもよいものと考えられる。このような線条こんのある摩擦面の出現は、薄板を円弧ダイスによって引き抜いて表面観察を行った池らの実験⁽⁴⁾によっても指摘されている。

結局、摩擦係数一定形は、引き抜き行程中、いわば境界潤滑状態を保ったまま摩擦すべりが続行するもので、本実験条件下ではこのような場合摩擦係数は例外なく約0.1を示した。この値は軟鋼材料の引き抜きにおいてみられた一定形の場合(ストックオイル潤滑)の摩擦係数とも一致する⁽³⁾。

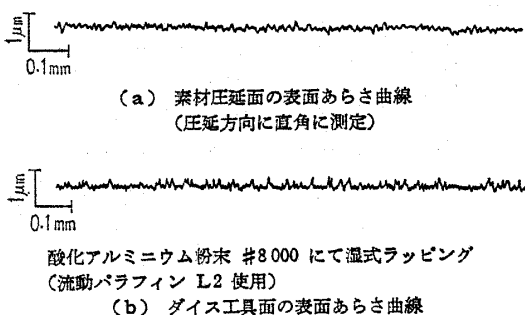


図5 素材圧延面および工具ラッピング面の表面あらさ曲線

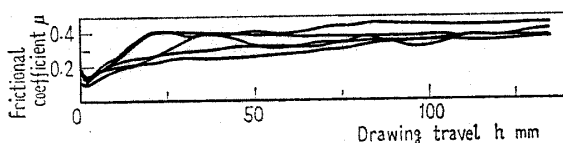


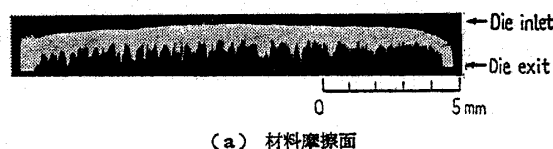
図6 N3 潤滑の場合の引き抜き行程に伴う摩擦係数の変化(漸増形)

3-2 漸増形 この変化形式は、軟鋼材料を用いた場合には、図1に模式的に示したような変化をたどり、典型的なタイプとなったものである。本実験で現れたこのタイプのものは、いずれも図6に例示するように行程初期(約10~40mmの範囲)に摩擦係数が急増し、その後漸増しつづける。軟鋼材料の場合にみられた境界摩擦状態Iはほとんど現れない。増加過程での再現性は軟鋼材料の場合と同じくあまり良くない。このタイプを示す潤滑剤の行程約140mmにおける摩擦係数 μ_{140} を表3に示すが、それらはほぼ0.35~0.55の範囲内に入っている。図7(a)はN3潤滑の場合の材料摩擦面全体の写真、図(b)は図(a)における白色部分の拡大写真、図(c)および(d)はそれぞれ白色部および黒色部の表面あらさ曲線を示す。白色部分はストックオイル潤滑の場合と全く同様の線条こん模様および表面あらさ $R_{max}=0.3\sim0.4\mu m$ を示

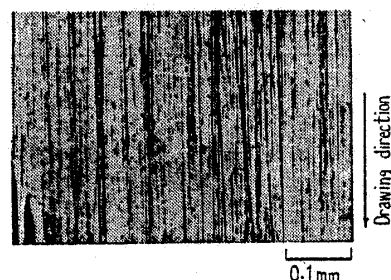
表3 漸増形の場合の行程140mmにおける摩擦係数 μ_{140}

潤滑剤	μ_{140}
N3	0.35~0.45
L2 (一部) ¹⁾	0.48
L3 (一部) ¹⁾	0.35~0.55
P2 (一部) ¹⁾	0.55
P3 (一部) ¹⁾	0.35~0.50

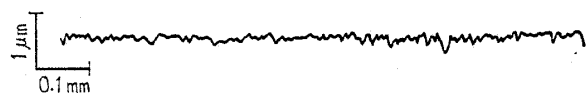
¹⁾ 5回の試験のうち、2, 3回の試験において漸増形が現れたことを示す。



(a) 材料摩擦面



(b) 材料摩擦面(入口側白色部分)



(c) 材料摩擦面の表面あらさ曲線
(入口側白色部分)



(d) 材料摩擦面の表面あらさ曲線
(出口側黒色部分)

図7 N3 潤滑の場合の材料摩擦面

し、いわゆる境界潤滑状態におかれたものと判断される。黒色部分は工具へ材料が移着してくぼんだ部分いわゆる焼付き領域を表すが、その焼付き層の厚さは図 (d) のあらさ曲線から約 $50 \mu\text{m}$ にも達することがわかる。図 8 は材料を図に示すように摩擦面に対し約 20° の傾斜角度で切断し厚さ方向の組織変化をみやすくしたいわば傾斜切断面の結晶組織を示すものである。出口側の焼付きによって生じた深さ $40\sim 50 \mu\text{m}$ のくぼみ底部の表面直下では、結晶粒が約 $20\sim 30 \mu\text{m}$ にわたって顕著なせん断変形をこうむっている。しかし、入口側表面直下の結晶粒はほとんどゆがみを受けていないこと、また入口でわずかのコンパージング変形を生じているのが認められる。ストックオイル潤滑の場合には全摩擦面が入口側とほぼ同一の組織となっており、境界潤滑状態では、摩擦面直下の結晶粒はほとんどゆがみを受けないようである。

結局、漸増形の場合、行程初期において焼付きが出口側から発生し、しだいに入口側へ成長してゆくが、潤滑剤の補修作用によってその成長が緩和されるため、図 6 に示すような摩擦係数の漸増形変化をたどるものと考えられる。

3.3 漸減形 図 9 に例示するように、初期行程

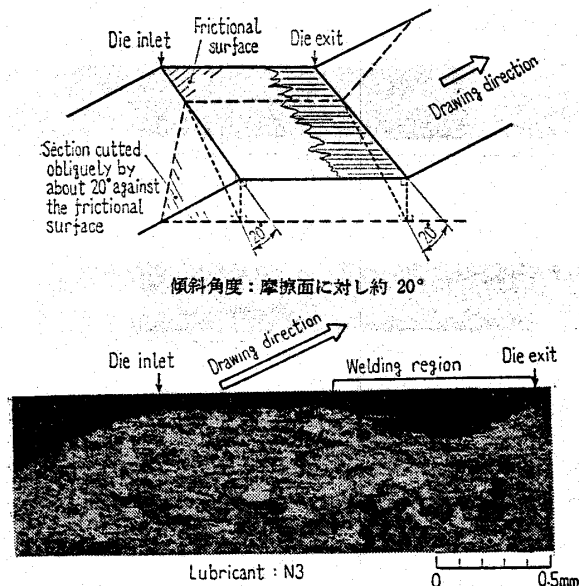


図 8 出口側焼付きの場合の材料傾斜切断面写真

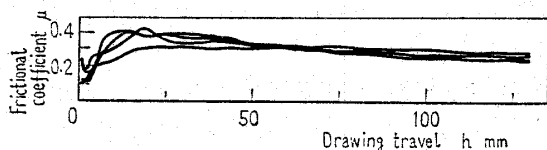


図 9 P01 とストックオイル混合油潤滑の場合の引き抜き行程に伴う摩擦係数の変化 (漸減形)

$h=5\sim 20 \text{ mm}$ の間で摩擦係数 μ が急増し最大値を示したのち徐々に減少する場合がある。このタイプを示す潤滑剤の摩擦係数最大値 μ_{max} および行程 140 mm における値 μ_{140} を表 4 にまとめて示す。 μ_{max} の値は $0.35\sim 0.63$ と潤滑条件によって多少異なるが、 μ_{max} と μ_{140} の差はいずれの場合もほぼ 0.1 で、減少量はおおよそ一定であることがわかる。図 10 は P01 43.8% とストックオイル 56.2% の混合油 (粘度 33.7 cSt , 20°C) を用いた場合の材料摩擦面性状を示す写真である。図 7 (a) に示す漸増形の場合と全く同様に出口側焼付きを生じており、表面あらさおよび結晶粒の変形状態も図 7 および 8 に示すものとほとんど同じであることが確認された。初期行程における μ の増大は焼付きの発生・成長によるが、その後の漸減がどのような機構によって生ずるのか。それには焼付き層の一部はく離または焼付き領域への潤滑剤の導入が考えられるが、現在のところいずれの証拠も確認されていない。しかし、漸減形を示す潤滑剤は、例外なく高粘度油との混合油あるいは極圧添加剤の添加油であることが注目される。

3.4 脈動形 顕著な脈動現象を示す L1+ブチルステアレート (5 wt%) 潤滑の場合の例を図 11 に示す。数回試験を繰返して再現性をみると、脈動の位相

表 4 漸増形の場合の摩擦係数最大値 μ_{max} および行程 140 mm における摩擦係数 μ_{140}

潤滑剤	μ_{max}	μ_{140}
粘度 P1 相当油 (P01 62.3%+St 37.7%)	0.45~0.55	0.38~0.45
粘度 P2 相当油 (P01 43.8%+St 56.2%)	0.35~0.42	0.25~0.3
L1+硫化油脂 5 wt %	0.45~0.60	0.35~0.5
L1+トリブチルフォスファイト 5 wt %	30.5~0.63	0.48~0.55

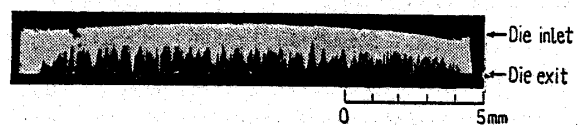


図 10 P01 (43.8%) + ストックオイル (56.2%) 混合油の場合の材料摩擦面

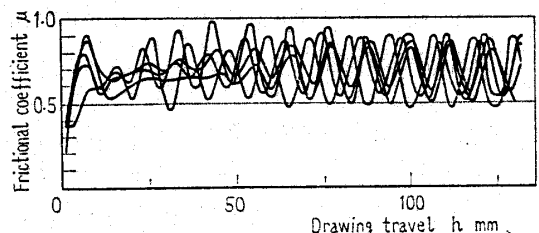


図 11 L1+ブチルステアレート (5 wt%) 潤滑の場合の引き抜き行程に伴う摩擦係数の変化 (脈動形)

表 5 脈動形の場合の μ_{140} , 脈動周期, 脈動の最大振幅

潤滑剤	μ_{140}	脈動周期	脈動の最大振幅
P01	0.75~0.90	20mm	0.13
P1	0.8	15	0.25
P2 (一部) ¹⁾	0.64~0.73	不規則	0.1
P3 (一部) ¹⁾	0.63	不規則	0.08
L1	0.73~0.82	不規則	0.2
L2 (一部) ¹⁾	0.60~0.91	不規則	0.1
L3 (一部) ¹⁾	0.73~0.88	20~30	0.3
N1 (一部) ¹⁾	0.54~0.64	10~20	0.35
N2 (一部) ¹⁾	0.52	15~20	0.07
L1+塩化パラフィン 5%	0.56~0.76	5~10	0.3 発散
L1+オレイルアルコール 5%	0.46~0.55	5~10	0.2 発散
L1+ブチルステアレート 5%	0.50~0.90	10~15	0.4
L1+飽和ステアリン酸	0.70~0.94	不規則	0.5
L1+ステアリン酸 5%	0.30~0.42	不規則	0.2
L2 50%+混合アロマ 50%	0.68~0.71	不規則	0.03
混合アロマ	0.45~0.50	15~20	0.13 減衰

¹⁾ 5回の試験のうち, 2, 3回の試験において脈動形が現れたことを示す。

は一致しないが, 周期および振幅は, とともにほぼ同じであることが示されている。潤滑剤によっては脈動形もしくは漸増形のいずれかが現れたり, あるいは脈動形から漸増形への移行あるいはその逆の場合が生ずることもある。表5は脈動形を示すすべての潤滑剤の引き抜き行程 140 mm における摩擦係数 μ_{140} , 脈動周期および最大振幅を示す。摩擦係数の平均値は 0.4~0.8, 周期は 5~30 mm, 振幅は 0.3~0.5 と潤滑剤によってかなり変化し, 潤滑剤の系統別または粘度などに基づいた一定の傾向は見当たらない。図 12(a) は脈動形を示す P01 潤滑の場合の焼付き発生直後における材料摩擦面全体を示す写真である。黒色部分で示される焼付き移着部は摩擦面の入口に近い側に島状に形成されている。ここには示さないが, 工具摩擦面にも, この島状部分に対応した位置に, ほぼ同じ形状の焼付き層が形成されることが確認された。図 (b) はこの焼付き部の材料表面あらさ曲線であるが, 焼付き層の厚さは出口側焼付きの場合と同じで約 50 μm にも達することがわかる。出口側は図 (c) に示すように表面あらさ $R_{\text{max}}=0.3\sim0.4\mu\text{m}$ の比較的平滑な摩擦面となっている。しかし, 拡大してみると, 図 (d) にみるように, すべり方向の条こん以外に微小クラックと思われるひび割れ状のこん跡が散在しており, 図 4 (b) および 7 (b) に示した境界潤滑面の表面性状とはかなり異なることがわかる。以後, 図 12 (a) のような焼付き状態を島状焼付きと呼ぶ。

図 13 (a) は引き抜かれたあとの試験片表面性状を示すもので, 白色スポットおよび引き抜き方向の白色

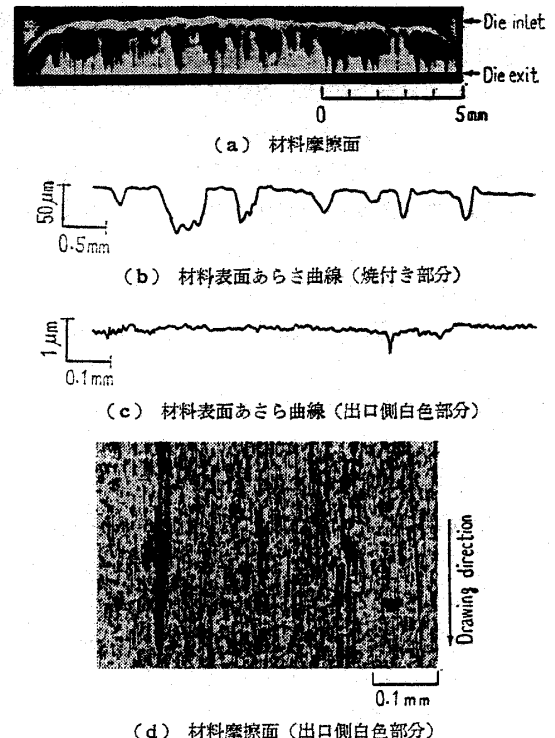
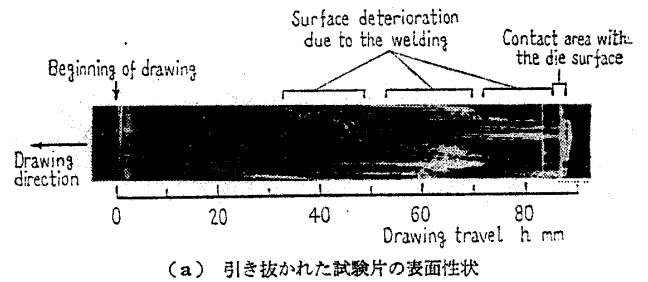
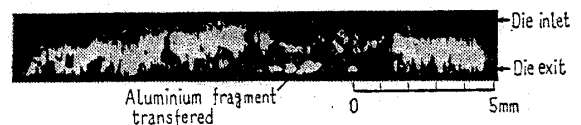


図 12 P01 潤滑の場合の焼付き発生直後の材料摩擦面 (脈動形)



(a) 引き抜かれた試験片の表面性状



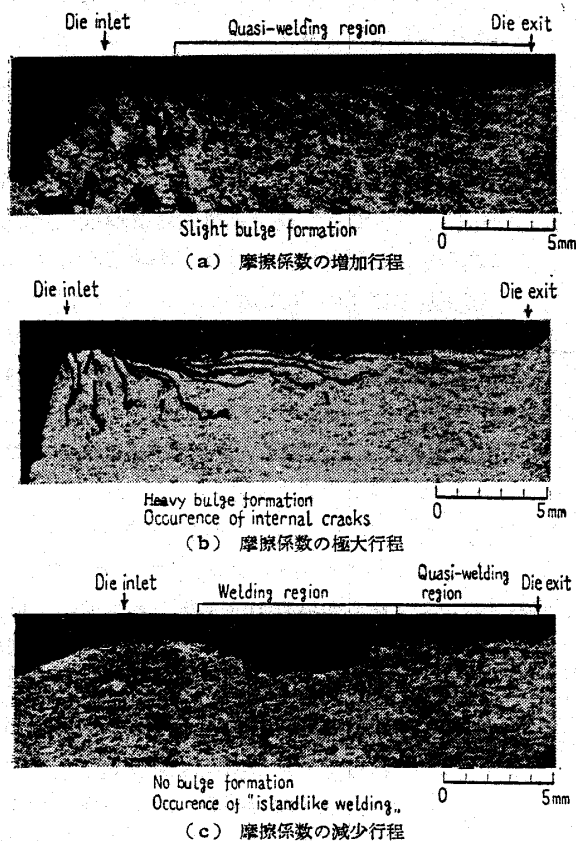
(b) ダイ工具摩擦面
潤滑剤: L1+ステアリン酸 5wt% を静置したあとの上澄液 (飽和ステアリン酸)
引き抜き行程: $h=85\text{mm}$

図 13 島状焼付きの場合の試験片表面および工具摩擦面

条こんは焼付きによって生じた表面あれを現す。これらの発生は引き抜き行程 $h=40\sim50\text{mm}$ の中央部やや上寄り, $h=60\sim70\text{mm}$ の両端付近, $h=75\sim85\text{mm}$ の中央部やや上寄りに見られる。この表面あれが生ずる行程は摩擦係数 μ の減少時期に対応している。図 (b) に, 表面あれが生じ μ が減少している行程におけるダイス摩擦面の焼付き状態を示す。白色部分はアルミニウム材料の移着層を現すが, 中央部付近に矢印で示したのは, 移着層が出口付近まで移動して摩擦

面から脱落しかけている部分である。図 (a) の表面写真で観察される白色の表面あれは、移着層によるひっかきこん跡と脱落移着層が材料表面に埋込まれた跡であることが確かめられた。

ここで、摩擦係数の脈動と摩擦面性状との対応を明



潤滑剤: P01, 切断面傾斜角度摩擦面に対し約 20°

図 14 脈動形の場合の材料傾斜切断面写真

らかにするため、図 (a) 摩擦係数 μ の増加行程、図 (b) μ の極大行程および図 (c) μ の減少行程に対応した材料摩擦面下の変形状態を傾斜切断面写真によって調べたのが図 14 である。図 14 (a) は μ の増加行程に対応するものである。出口側のほぼ 8 割の領域は表面直下にきびしいゆがみ変形を受けているが、これは図 12 (d) に示した摩擦面と同様の性状のものと判断された。後にここでの摩擦せん断応力 τ_f は焼付き部の τ_f とほぼ同じであることが明らかにされる。このような事実から以後ここを準焼付き領域と呼ぶことにする。入口側では、いわゆる境界潤滑領域が現れているが、ここにめいりょうなバルジ変形が認められる。図 14 (b) は μ の極大行程に対応するものである。準焼付き領域がほぼ全摩擦面をおおっていることが確認され、さらに顕著なバルジ変形の発生とともに、多数のめいりょうなき裂が摩擦面のほぼ全面にわたって約 0.1mm の深さまで浸入していることがわかる。図 (c) は μ の減少行程に対応するもので、図 12 に示したものと同じである。摩擦面の中央部に材料移着の生じた焼付き領域、出口側に準焼付き領域、入口側に境界潤滑領域が生じており、バルジ変形は認められない。

以上、図 12~14 に関連して述べた結果をまとめてモデル図として示すと、図 15 のようになる。すなわち、摩擦係数 μ の図 (a) 増大、図 (b) 極大、図 (c) 減少、図 (d) 極小という脈動現象は、図 (a) バルジ変形を伴う準焼付き領域の成長、図 (b) 顕著なバルジ変形と内部き裂の発生、図 (c) き裂発生による材料移着の助長いわゆる焼付き層の発生、図 (d) 材

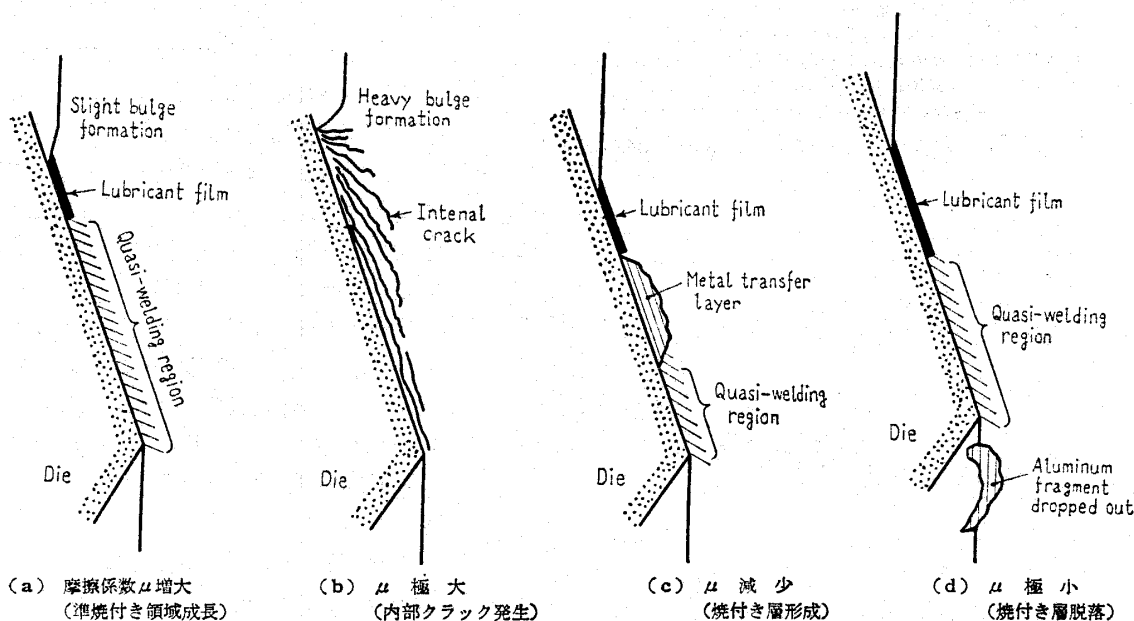


図 15 島状焼付きの発生・成長・脱落過程モデル図

料移着層の脱落という摩擦面性状の変化過程とめいりょうに対応するものである。これは摩擦不安定現象の1種とみることができる。また、池らは薄板の引き抜きにおいて焼付きに伴う素材の激しいかじり現象が生

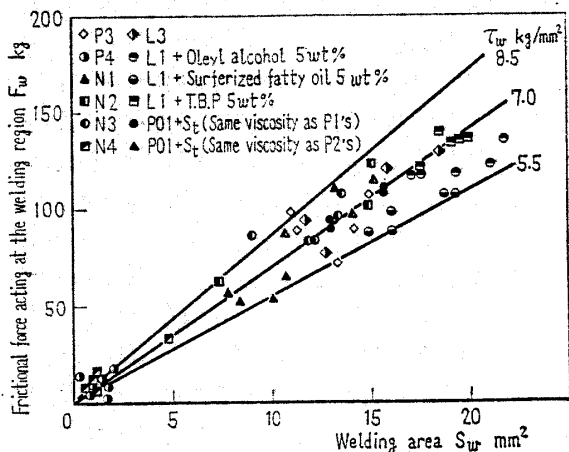
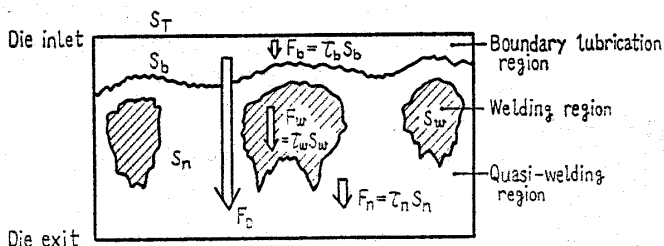


図 16 出口側焼付きの場合の焼付き領域に作用する摩擦力と面積の関係



- S_T : ダイス材料面間の全接触面積 $= S_w + S_b + S_n$
- S_w : 焼付き領域の面積
- S_b : 境界潤滑領域の面積
- S_n : 準焼付き領域の面積
- F_D : ダイスに作用する全摩擦力 $= F_w + F_b + F_n$
- F_w : 焼付き領域に作用する摩擦力
- F_b : 境界潤滑領域に作用する摩擦力
- F_n : 準焼付き領域に作用する摩擦力
- τ_w : 焼付き領域の摩擦せん断応力 $= F_w / S_w$
- τ_b : 境界潤滑領域の摩擦せん断応力 $= F_b / S_b$
- τ_n : 準焼付き領域の摩擦せん断応力 $= F_n / S_n$

図 17 島状焼付きの場合の摩擦面モデル

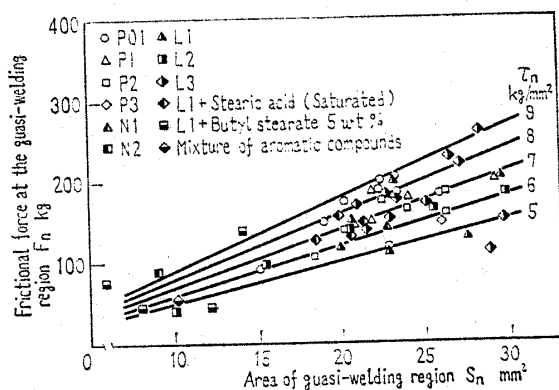


図 18 島状焼付きの場合の準焼付き領域に作用する摩擦力と面積の関係

ずる場合には、ダイス出口近傍に引張応力最大の方向にクラックが発生することを指摘している⁽⁴⁾。そのき裂が図 14(b)のものと同様であるかどうかは不明であるが、ダイス摩擦面直下における内部き裂の発生とそれに伴う移着層の発生は、Suh のいう薄片摩耗粉説 (delamination theory)⁽⁵⁾ の一つの裏付けとなりうることに注目しておきたい。

4. 焼付き領域および準焼付き領域における摩擦せん断応力

軟鋼材料の場合には、「出口側焼付き」のみを生じたが、その場合、焼付き領域の摩擦せん断応力 τ_w は潤滑剤によらず、材料のせん断降伏応力 k にほぼ等しい定値 (約 31.3 kg/mm²) をとることがわかった⁽³⁾。本実験において、出口側焼付きを生ずる場合について、焼付き領域に作用する摩擦力 F_w を焼付き面積 S_w に対して示すと、図 16 のようになる。ここに、 S_w は万能投影器による実測値、 F_w は次式によって計算した値である。

$$F_w = F_D - \mu_b N_D (S_b / S_T) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、ダイス面全体に作用する摩擦力 F_D および垂直力 N_D は行程を通して自動記録されており、全接触面積 S_T 、境界摩擦領域の面積 S_b は万能投影器によって実測される。

この場合、全接触面積は $S_T = S_b + S_w$ と表される。また、境界摩擦係数 μ_b の大きさとして、全面境界潤滑となる場合 (ストックオイル、ブライトストック潤滑など) の値 0.1 を仮定する。軟鋼材料の場合⁽³⁾ に比べてばらつきは多少大きいですが、潤滑剤によらず、ほぼ

$$F_w = 7.0 \times S_w \dots \dots \dots (2)$$

の直線関係が成立し、 τ_w は 7 ± 1.5 kg/mm² の範囲内にあることがわかる。ダイス工具面および材料表面をベンゼンにて脱脂した無潤滑条件で引き抜きを行い、ほぼ全面焼付き状態をうることができたが、その場合 τ_w は $6.7 \sim 6.9$ kg/mm² となった。これは上記の算出値とほぼ同じである。また、焼付き表面下約 50 μ m 近傍における微小ビッカース硬度 H_v は使用潤滑剤に無関係に 45 ± 5 となったが、この値から推定されるせん断降伏応力は約 7 kg/mm² である。結局、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はほぼ等しいことがわかる。

島状焼付きの場合に現れる準焼付き領域に作用する摩擦せん断応力 τ_n を算出するため、摩擦面を図 17 に示すようにモデル化する。焼付き領域の摩擦せん断

応力 τ_w は出口側焼付きの場合と同じく 7 kg/mm^2 と仮定して、準焼付き領域に作用する摩擦せん断応力 τ_n を算出してみる。図の記号を用いると、ダイス全面に作用する摩擦力 F_D は、

$$F_D = F_w + F_n + F_s$$

$$= \tau_w S_w + \tau_n S_n + \mu_s (S_b / S_T) N_D \dots\dots\dots (3)$$

と表される。 F_D , N_D , S_w , S_b および S_T の値を実測し、 $\mu_s = 0.1$ を仮定すれば、準焼付き領域 S_n に作用する摩擦力 F_n を見積もることができる。このようにして摩擦力 F_n を求め、面積 S_n に対してプロットすると、図 18 のようになる。摩擦せん断応力 τ_n は $7 \pm 2 \text{ kg/mm}^2$ の範囲内に入っている。結局、準焼付き領域では、肉眼および光学顕微鏡のいずれによっても焼付きは認められないが、摩擦せん断応力は焼付き領域のものとはほぼ同じとなることがわかる。

5. 鉱油系潤滑剤の耐焼付き性能評価

軟鋼材料の場合には⁽⁶⁾、図 1 に示すように、境界摩擦係数 μ_b および焼付きの発生時期 h_w がめいりょうに現れ、これらの尺度により潤滑剤の性能評価が可能であった。しかし、本実験におけるアルミニウム材料の場合、焼付きの発生・成長が急激であるため、 μ_b および h_w の測定は事実上不可能となった。図 1 に示した準定常状態における摩擦係数 μ_r の大きさは焼付きに対する潤滑剤の補修能力の尺度となることは既報⁽⁶⁾で示されている。本実験では μ 一定形を除けば、いずれの場合にも引き抜き行程約 50 mm までには準定常状態あるいは脈動状態に達するため、この行程以後における摩擦係数を比較することにより潤滑剤の焼付き補修能を評価することが可能である。ここでは、この尺度として引き抜き行程 $h=140 \text{ mm}$ における摩擦係数 μ_{140} を検討の対象とする。

図 19 は表 2 に示す各種鉱油の摩擦係数 μ_{140} を仮

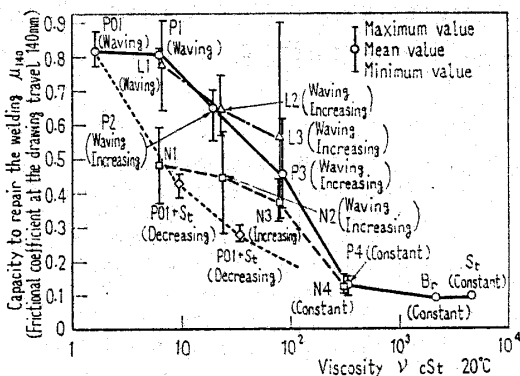


図 19 基油および混合油の焼付き補修能と粘度の関係

に粘度 ν に対して整理したものである。脈動幅およびばらつきを最大値、最小値として示してあるが、ここでは主として平均値を検討の対象とする。パラフィン (P) 系油、ナフテン (N) 系油および流動パラフィン (L) 系油のいずれも、粘度 ν 増加に伴って μ_{140} は顕著に低下し、 ν が 500 cSt 以上になると約 0.1 に落ち着く。摩擦係数の減少に伴って、摩擦係数の変化形式は脈動形から漸増形、漸減形、一定形へと移行している。3 系統の鉱油の中では、ナフテン系鉱油の μ_{140} が最も小さいが、その差は低粘度ほど大きい。表 2 の性状をみるかぎり、N 系油は P 系油および L 系油に比べて芳香族化合物の割合 $C_A\%$ が多いことがわかる。深絞り板押さえ面⁽⁶⁾および四球式摩擦試験機⁽⁷⁾⁽⁸⁾においては、この芳香族化合物が良好な潤滑性能を示すことが確認されている。本実験でもこの影響を調べるため、粘度 ν が $20 \sim 25 \text{ cSt}$ (20°C) とほぼ等しく芳香族化合物濃度の異なる 5 種の潤滑剤すなわち L2, P2, N2, 混合アロマティクス (ドデシルベンゼン 47.9% とモノドデシルベンゼン 52.1% の混合物) および L2 (50%) + 混合アロマ (50%) を適用して、それらの μ_{140} を比較してみた。図 20 に、その結果を示すが、 C_A が 17% 以上になると、 μ_{140} が低下する傾向を示している。さて、前述のように図 19 には粘度増加に伴う μ_{140} の顕著な低下が認められたが、これが粘性の動的効果のみによるものかどうかを検討してみる。このため、低粘度油 P01 に高粘度油 St を混合して、P1 および P2 に近い粘度の油を調整し、その μ_{140} を調べてみた。図 19 中に破線で示すように、混合油の μ_{140} は P1 および P2 に比べてかなり小さく、さらに $C_A\%$ の多い N1 および N2

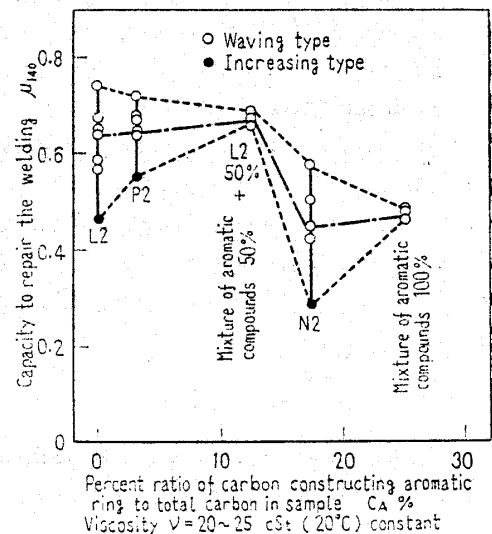


図 20 焼付き補修能に及ぼす $C_A\%$ の影響

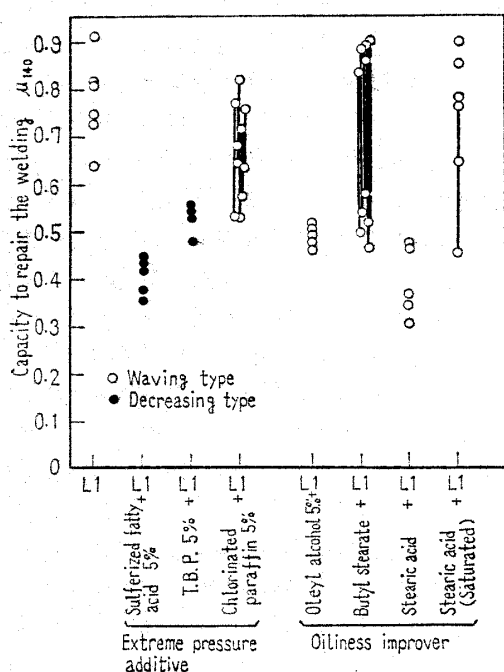


図 21 焼付き補修能に及ぼす添加剤の効果

よりも小さくなることが注目される。また、摩擦係数の変化形式は漸減形となっている。これらの結果は高粘度油の潤滑性能が単なる力学的動粘性効果のみによるものでないことを示すが、その詳細な潤滑機構は不明である。

図 21 は流動パラフィン L1 に各種添加剤を加えた場合の μ_{140} を示す。図中、最小の μ_{140} を示すのは、ステアリン酸 5 wt% を添加した場合である。これは、ステアリン酸が難溶性でゾル状を呈したためと考えられ、潤滑剤の性状が焼付きに対して大きな影響をもつことが改めて認識された。このことは、さらにつきの実験、すなわちステアリン酸を添加して静置した場合の上澄液いわば飽和ステアリン酸を用いると添加効果がほとんど現れないことから推測される。極圧添加剤では、硫化油脂およびトリブチルフォスファイト添加の μ_{140} が著しく低下し、摩擦係数の変化形式は漸減形となる。油性向上剤の場合には、オレイルアルコールが比較的優れているが、 μ の脈動現象はとまらない。その他の添加剤、塩化パラフィン、ブチルステアレートおよび飽和ステアリン酸は添加効果がほとんど現れない。

6. 結 論

前報に引き続き、二次元引き抜き形摩擦試験機を用いて、引き抜きダイス面におけるアルミニウム材料の

焼付き機構を実験的に検討した。その結果に基づいて鉱油系潤滑剤の耐焼付き性能試験を行い、つぎの結論を得た。

(1) 引き抜き行程の進みに伴う摩擦係数の変化には、軟鋼材料の場合にみられた一定形および漸増形のほかに、新たに漸減形および脈動形がみいだされた。一定形の場合には焼付きは生ぜず、行程を通して境界潤滑状態が保たれたものと考えられる。漸増形および漸減形の場合には、軟鋼材料の場合と同じく、出口側焼付きを呈した。脈動形の場合には摩擦係数の増大・減少に伴って準焼付き領域の拡大、内部クラックの発生、島状焼付きの発生、焼付き層の脱落という一連の摩擦面の性状変化過程を繰返すことがわかった。

(2) 軟鋼材料の場合と同様に、焼付き領域の摩擦せん断応力は材料のせん断降伏応力にほぼ等しい一定値 ($7 \pm 2 \text{ kg/mm}^2$) をとることがわかった。また、焼付きは識別されないが、摩擦せん断応力は焼付き領域のものと同じになるいわば準焼付き領域の存在が確認された。

(3) 引き抜き行程 140 mm における摩擦係数 μ_{140} の大きさから潤滑剤の焼付き補修能を評価してみた。パラフィンおよびナフテンのいずれの系列油でも粘度増加に伴って顕著な μ_{140} の減少言いなおせば焼付き領域の減少が生じ、粘度 500 cSt (20°C) 以上の高粘度油になると、本実験範囲では焼付きはほとんど認められず、摩擦係数の変化形式は一定形でその大きさはほぼ 0.1 となる。この特性は高粘度油の単なる動的粘性効果によるものではないことが、P01 にストックオイルを混合し同一粘度で成分の異なる潤滑油を試験することによって確認された。各系列油の中では、ナフテン系鉱油が最も焼付きが少なく、これは芳香族化合物を多量 (約 17% 以上) に含有するためと考えられた。極圧添加剤では硫化油脂、トリブチルフォスファイト、油性向上剤ではオレイルアルコールが優れた効果を示した。また、ステアリン酸 5 wt% 添加のゾル状油が優れた効果を示すことがわかった。

文 献

- (1) 河合・中村, 機論, 39-328 (昭 48-12), 3811.
- (2) 河合・中村, 機論, 39-326 (昭 48-10), 3190.
- (3) 河合・ほか 2 名, 機論, 43-369 (昭 52-5), 1947.
- (4) 池・ほか 3 名, 理化学研究所報告, 52-6 (昭 51-11), 195.
- (5) Suh, N.P., *Wear*, 44-1 (1977-8), 1.
- (6) 河合・ほか 3 名, 機論, 37-301 (昭 46-9), 1783.
- (7) 豊口・高井, 石油学会誌, 4-7 (昭 36), 525.
- (8) Appeldoorn, J.K. and Tao, F.F., *Wear*, 12-2 (1968-8), 117.

討 論

〔質問〕 吉田 清太 (理化学研究所)

(1) 多くの因子が複雑に影響し合う現象に関する貴重な資料にその解釈例を着実に累積されておられることに敬意を表す。前回は板幅縮小の引き抜きで、今回は板厚減少の引き抜きであるが、変えられた理由は、実験技術上、あるいは現象の発生や観測上の都合によるものか。

(2) 私達の経験では、準定常状態の焼付きになっても、そのときの μ_r と板表面の損傷程度 (肉眼的ならびに表面あらさでみた損傷) とは必ずしも一致しなかったが、潤滑剤の種類により表面損傷が性格的に異なった観察例はなかったか。

(3) 図 15 において、図 (b) のバルジ変形部 (入口側) が局部的破壊と変形により図 (c) の焼付きとなり入口側のバルジ変形部は消えると、見えるが、このような解釈でよいのか。

(4) 前報での討論で潤滑剤の補修能が論じられているが、この補修能はいったん発生した焼付の補修なのか未然に防ぐ能力なのかわかりにくい。

ご存知のように、焼付きや摩擦挙動に材料の親和性という概念がしばしば用いられるが、このような材料の性質も、潤滑剤とのからみで補修能に含まれているのか。

〔回答〕 (1) 前報では、巨視的表面積増加を伴うダイス面と、これを伴わない板押さえ面 (変形を二次元に拘束する面) の摩擦特性を同時に調べ、比較検討を行った。その結果、焼付きは巨視的表面積増加を伴うダイス面において生じやすく、板押さえ面では終始境界摩擦状態を保つことが確かめられた。したがっ

て、本報では、ダイス面の摩擦特性のみを検討の対象としたが、そのため板押さえ面拘束のかわりに、板幅を増し、できるだけ二次元変形を保つようにして、板厚減少の引き抜き変形を採用した。このように実験を簡明にして、問題の焦点を絞ることとした。

(2) 著者らの実験では、図 16 に示すように、引き抜き途中で加工を中断し、その時点における摩擦係数と焼付き面積を測定して対応させている。引き抜きダイスを出た後の製品表面性状は、焼付き層の移着、その脱落、再移着などいろいろの経過が累積されたもので、その様相は潤滑剤によって、例えば出口側焼付きと島状焼付きなどかなり異なる。したがって、摩擦係数 μ_r が同じでも製品表面性状は常に同じになるとは限らない。

(3) 質問者が指摘されるように、バルジ変形部の局部的破壊と変形によってクラックが生じ、焼付き層になったものとも考えられるが、焼付き機構の詳細が不明であるため、今後の検討課題としたい。

(4) 著者らは、微視的な凝着が巨視的凝着に発展し肉眼観察が可能となった場合を焼付きと呼んでいる。本研究で使っている「補修能」という言葉は微視的凝着が焼付きに発展するのを未然に防ぐ能力を表している。したがって、これを耐焼付き能と呼ぶことも可能ではあるが、著者らは初めて焼付きが発生するのを抑制する能力を耐焼付き能、いったん発生した焼付きの成長を抑制する能力を補修能と呼んで区別することにした。したがってこの能力には、潤滑剤自体の物理、化学的性質のほか、工具と材料の親和性をも影響因子として含むものと考えられる。