

日本機械学会論文集(C編)  
52巻473号(昭61-1)

## 塑性加工における焼付き発生機構の研究\*

(無潤滑条件における面圧と相対すべり量の影響)

中村 保\*\*, 加藤 浩三\*\*\*, 松井 伯夫\*\*\*\*  
Tamotsu NAKAMURA, Kozo KATO, Norio MATSUI

**Key Words:** Forming, Seizure Initiation Mechanism, Extrusion, Contact Pressure, Relative Slip Displacement, Dry Friction

### 1. 緒 論

塑性加工において、工具と素材面間の焼付き現象は、加工力の急増、工具および製品表面の著しい損傷をもたらすため、従来種々の焼付き防止対策が試みられてきた。最近では大矢根ら<sup>(1)</sup>、後藤ら<sup>(2)</sup>、吉川ら<sup>(3)</sup>および河合ら<sup>(4)</sup>により焼付き発生の限界条件の確立が試みられているが、焼付き発生機構に立ち入った議論はまだ十分に行われていない<sup>(5)</sup>。

Kragelsky ら<sup>(6)</sup>は、塑性加工以外の一般の摩擦面において、焼付き発生の過程を、

(1) 摩擦中に生ずる発熱に依存する場合

(2) 温度上昇が少なく相対すべりに伴う機械的じょう乱に依存する場合

の二つのグループに大別している。(1)では主として摩擦面温度が支配因子となるのに対し、(2)では相対すべり量、面圧、表面あらさ、表面保護膜の性質、摩擦対の材質など数多くの因子が影響すると考えられる。塑性加工では、これ以外に、

(3) 素材の新生面の露出または表面積拡大に依存する場合

が考えられる<sup>(7)</sup>。実際の塑性加工における焼付き現象には、上述各因子が相互に関連し合って影響を及ぼしているため、焼付き発生機構の解明には、これら各因子の影響をできるだけ分離して把握し、その本質的役割を明らかにしなければならない。

著者らは、既報<sup>(8)</sup>で分流押出し形摩擦試験機を用いて、常温・低速・無潤滑という条件で工業用純アルミニ

ウム材料の焼付き発生条件を検討した。その結果、このように温度上昇の影響がほとんどない場合には、表面積拡大比、相対すべり量および面圧が主たる影響因子となり、前二者が大きいほど焼付きが発生しやすいが、面圧がかなり高い領域でかえって焼付きが抑制され、平滑なバニシ面になりやすいという非常に興味深い現象を見出した。しかし、この摩擦試験機では上記3因子を独立に広範囲に変更できないため、その機構解明が重要な課題として残されることになった。

本研究では、上述の現象解明を含め塑性加工における焼付き発生機構の解明を目的として、新たに押出し形摩擦試験機を試作した。本試験機では、焼付き発生に及ぼす表面積拡大、面圧および相対すべりの影響の本質的役割を分離して把握できるよう特別の摩擦試験法を採用している。本報では、工業用純アルミニウム材料を用いて、無潤滑・低すべり速度という条件下における焼付き発生機構を検討した結果、面圧および相対すべり量の本質的役割を明らかにできたので、ここに報告する。

### 2. 実験方法

**2・1 押出し形摩擦試験機** 図1に本試験機的主要部組立図、図2に押出し形摩擦試験法の原理を示す。本体は圧縮試験機(最大ひょう量約2MN)に組み込まれ、テーパダイスと一体の左右のコンテナ⑤、⑥とそのホルダ⑥、⑥は支持台⑧を介してベッドに、双頭のポンチ②、②はクロスヘッドに固定されている。左右2個の試験片①、①はコンテナ⑤、⑥と中心の平ダイス④の間の型孔内に装てんされ、ポンチによって前方に押出される。その際、平ダイス面に作用する面圧 $p$ および摩擦せん断応力 $\tau_f$ の分布が、I~Vの位置にてん付したひずみゲージによって測定される。各位置に作用する面圧 $p$ と摩擦力 $F$ によって生ずる

\* 昭和60年3月16日 東海支部第34期総会講演会において論文講演として講演、原稿受付 昭和59年9月17日。

\*\* 正員、静岡大学工学部 (〒432 浜松市城北3-5-1)。

\*\*\* 准員、新日本製鉄(株)名古屋製鉄所 (〒476 東海市東海町5-3)。

\*\*\*\* 学生員、静岡大学大学院。

平ダイスの圧縮ひずみ  $e_c$  と伸びひずみ  $e_t$  は次式によって表される。

$$e_c = ap + 2bF \dots\dots\dots(1)$$

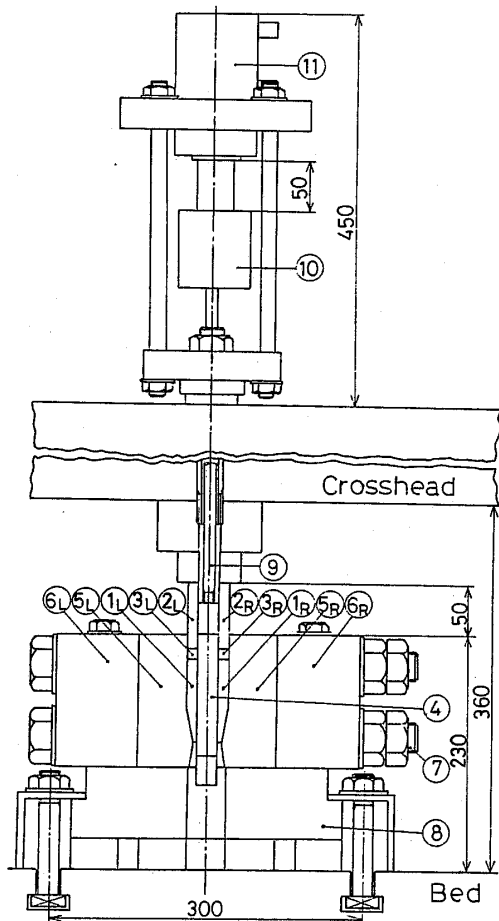
$$e_t = cp + 2dF \dots\dots\dots(2)$$

荷重検定によりあらかじめ比例定数  $a, b, c, d$  を決定しておけば、 $e_c$  および  $e_t$  を検出することにより、 $p$  と  $F$  が求められる。摩擦せん断応力  $\tau_f$  は隣接位置間の摩擦力の増分  $\Delta F$  をその作用面積  $\Delta A (8 \times 10 \text{ mm}^2)$  で除して求められる。平ダイスを兼ねる本測定体④について、 $p$  および  $\tau_f$  の分布を仮定して弾性解析を行い、本測定法の妥当性を検討した結果、原理的に  $p$  および  $\tau_f$  の分布を正確に測定しうることが確認された。また、ダイス面垂直荷重  $N$  および軸方向引張荷重  $T$  による検定の結果、面圧  $p = 10^8 \text{ MPa}$  および軸荷

重  $T = 70 \text{ kN}$  までの範囲内において、式(1)および式(2)の比例定数  $a \sim d$  を正確に決定することができた<sup>(9)</sup>。

図2の押し形摩擦試験法によれば、

(1) 平ダイス面上各位置の素材表面積拡大比  $\eta = a/a_0$  ( $a_0, a$  は変形前後の表面積) は原理的にテーパダイスの各位置における断面減少率によって規定され、最大表面積拡大比  $\eta_{\text{max}}$  は押し比  $t_0/t$  ( $t_0, t$  は変形前



①L, ①R Workmetal (Left, Right), ②L, ②R Punch (Left, Right), ③L, ③R Ram Block (Left, Right) ④ Center Flat Die (Measuring Device), ⑤L, ⑤R Container (Left, Right), ⑥L, ⑥R Container Holder (Left, Right), ⑦ Fastening Bolt, ⑧ Base Plate, ⑨ Pull Rod for the Center Flat Die, ⑩ Joint, ⑪ Hydraulic Ram

図1 押し形摩擦試験機主要部組立図

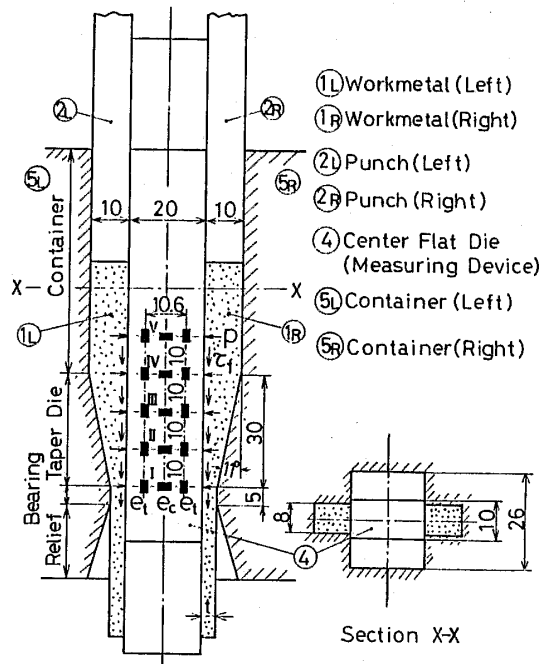


図2 押し形摩擦試験法の原理

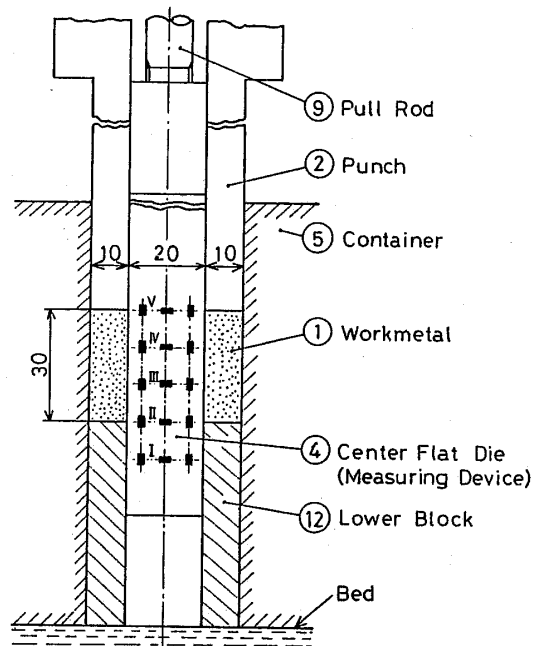


図3 面圧・相対すべり試験法の原理

後の厚さ)により他因子とは独立に変更できる。

(2) 押出し加工を中断し、ポンチ荷重を除荷することにより面圧  $p$  の調整が可能となり、平ダイス④を引き上げロッド⑨を介して油圧ラム⑩により引き上げるにより任意の面圧下で相対すべり量のみを変更することも可能である。

さらに、本研究では試験片に巨視的塑性変形を伴わない状態で、焼付き発生に及ぼす面圧  $p$  と相対すべり量  $S$  の影響を分離抽出して検討するため、図3に示すような面圧・相対すべり試験を行う。この摩擦試験法では図1の試験機を併用するが、図3のようにテーパダイスの代わりに押出し出口のないダイスを用いる。ポンチ荷重の負荷により素材は密閉状態で静水圧が高まり、平ダイス面に所望の面圧が加えられる。この状態で図1の油圧シリンダ⑪により平ダイス④を引き上げ、強制的に相対すべりを与える。

**2.2 実験条件** 表1に示すように、測定体は合金工具鋼 SKD 11(硬さ  $HRC \approx 60$ )で、供試摩擦面には1回の試験ごとに超音波研磨を施し、表面あらさ  $R_{max} \approx 0.3 \mu m$  程度に仕上げた。供試素材は工業用純アルミニウム A 1050, 板厚 10 mm の熱間圧延材を標準として用い、他に板厚 2 mm の冷間圧延材をも用いた。各供試素材の機械的性質および表面あらさを表1中に示す。ただし、供試摩擦面はいずれも圧延仕上げのままとした。押出し摩擦試験の場合、押出し比 10/4.2, ダイス角度  $11^\circ$ , 最大ポンチ行程 20 mm とした。素材試験片はダイス孔形状に合せて機械加工したのち、 $400^\circ C, 1 h$  の焼なまし処理を施した。面圧・相対すべり試験の場合、試験片長は 30 mm を標準とし、測

定体の最大引き上げ量は約 20 mm とした。

供試摩擦面は工具・素材ともにトルエンにより脱脂した無潤滑状態とした。また、ポンチ速度および測定体引き上げ速度は約 0.01 mm/s のごく低速とし、摩擦熱および変形熱による温度上昇の影響がほぼ無視できるように配慮した。

### 3. 面圧および摩擦せん断応力の分布と摩擦面性状

図4に押出し形摩擦試験の場合の測定体面上各位置における面圧  $p$  および摩擦せん断応力  $\tau_f$  の分布の一例を示す。これに対応する素材摩擦面性状の一例を図5(a)に示す。摩擦せん断応力  $\tau_f$  はダイステーパ出口近傍において極大値をとる分布を示す。また、ポンチ行程  $H$  の進みに伴い顕著に増加し、 $H = 18 \text{ mm}$  では最大約 120 MPa にまで達している。これは図5(a)に示すように、行程初期  $H = 5 \text{ mm}$  ですでにベアリング部からテーパ出口 ( $x = 0 \sim 10 \text{ mm}$ ) にかけて焼付きが発生し、行程  $H$  とともにテーパ内部へ成長するためである。面圧  $p$  はダイス出口からコンテナ内部に向かって単調増加の分布を示すが、行程  $H$  の進みに伴い顕著に高まり  $H = 18 \text{ mm}$  では最大約 1 GPa 程度にまで達している。これは焼付きの発生・成長による  $\tau_f$  の著増のためである。

図5(a)~(d)に示すように、素材摩擦面はパニシ面と焼付き面およびその遷移状態の3領域に分類され

表1 実験条件

| (a) Tool   |  |                                |                                 |
|--|--|--------------------------------|---------------------------------|
| Measuring Device                                     | Punch, Container(Die)                  |                                |                                 |
| Material   | Tool Steel Alloy SKD 11                | quenched and tempered          |                                 |
| Hardness   | Rockwell                               | $HRC \approx 60$               |                                 |
| Surface Finishing                                    | Ultrasonic Polishing                   | Grinding                       |                                 |
| Surface Roughness                                    | $R_{max} \approx 0.3 \mu m$            |                                |                                 |
| (b) Workmetal  |  |                                |                                 |
| Material   | Commercially Pure Aluminium A 1050 - P |                                |                                 |
| Thickness  | 10 mm                                  | 2 mm                           | 2 mm                            |
| Tempering  | Fully annealed                         | Cold rolled                    | Fully annealed                  |
| Tensile Strength                                     | 82 MPa                                 | 185 MPa                        | 85 MPa                          |
| Stress-Strain  | $\sigma = 124 \epsilon^{0.225}$        | $\sigma = 185 \epsilon^{0.09}$ | $\sigma = 160 \epsilon^{0.225}$ |
| Surface Finishing                                    | Hot rolled                             | Cold rolled                    | Cold rolled                     |
| Surface Roughness                                    | $R_{max} \approx 2 \mu m$              | $R_{max} \approx 0.5 \mu m$    | $R_{max} \approx 0.5 \mu m$     |
| (c) Lubricational Conditions                         |  |                                |                                 |
| Test Surface   | Dry Friction (Cleaning with a Toluene) |                                |                                 |
| Other Surfaces                                       | Tallow and Graphite Mixture or $MoS_2$ |                                |                                 |
| (d) Working Conditions                               |  |                                |                                 |
| Extrusion-type Frictional Testing Method             |  |                                |                                 |
| Extrusion Ratio                                      | 10/4.2                                 | Punch Velocity                 | about 0.01 mm/s                 |
| Reduction of Area                                    | 58 %                                   | Maximum Punch Stroke           | 20 mm                           |
| Die Angle  | about $11^\circ$                       | Room Temperature               | $10 \sim 25^\circ C$            |
| Relative Sliding Test under Various Contact Pressure |  |                                |                                 |
| Reduction of Area                                    | 0 %                                    | Maximum Stroke                 | 20 mm                           |
| Velocity lifting the Measuring Device                | about 0.01 mm/s                        |                                |                                 |

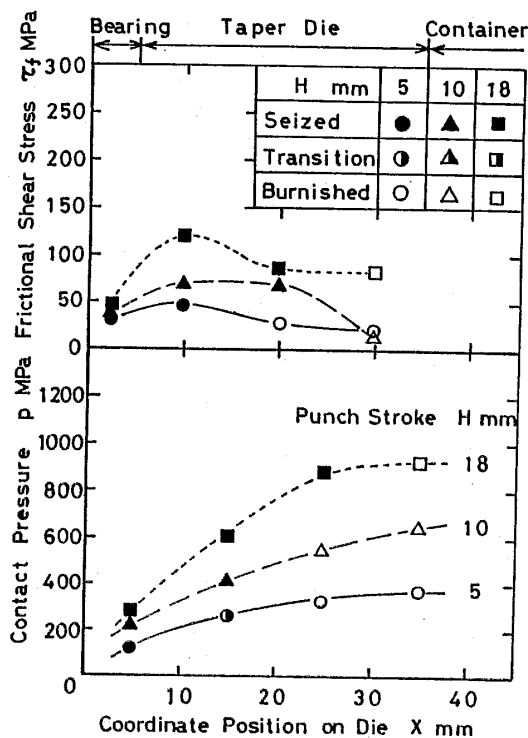
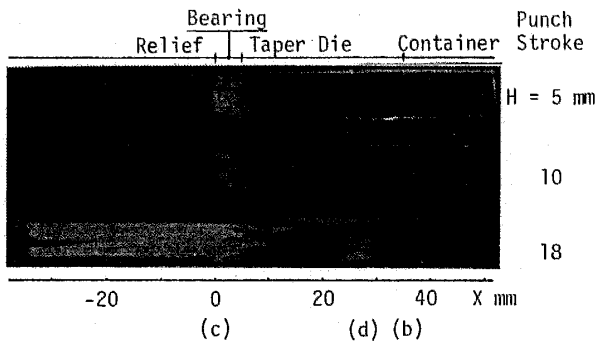
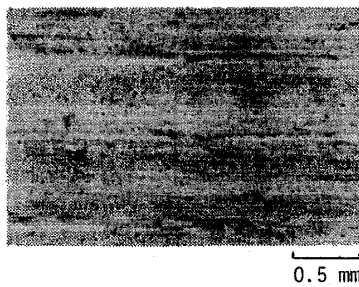


図4 押出し形摩擦試験における  $p, \tau_f$  の分布の一例

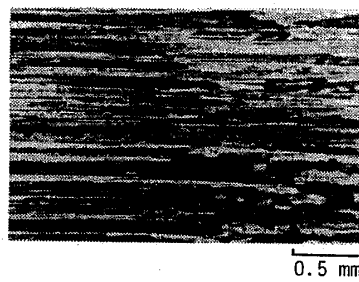


(a) 外観図



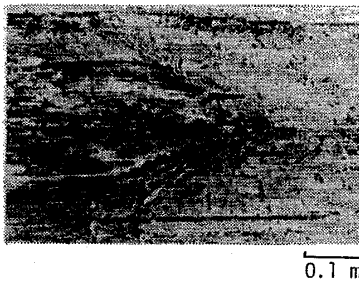
(b) パニシ面 ( $H=10$  mm,  $X=35$  mm)

$R_a = 0.05 \mu\text{m}$   
 $R_{max} = 0.2 \mu\text{m}$   
 0.25 mm  
 0.1



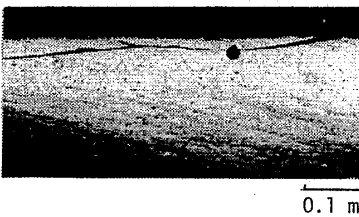
(c) 焼付き面 ( $H=18$  mm,  $X=0$  mm)

$R_a = 2.2 \mu\text{m}$   
 $R_{max} = 8.5 \mu\text{m}$   
 0.25 mm  
 0.1



(d) 遷移面 ( $H=18$  mm,  $X=28$  mm)

$R_a = 0.75 \mu\text{m}$   
 $R_{max} = 3.1 \mu\text{m}$   
 0.25 mm  
 0.1



(e) 遷移部の縦断面

図 5 押し形摩擦試験の素材摩擦面性状の一例

る。図 5 (b) のパニシ面は素材初期表面 ( $R_{max} \approx 2 \mu\text{m}$ ) が工具面 ( $R_{max} \approx 0.3 \mu\text{m}$ ) によって平滑化 ( $R_{max} \approx 0.3 \mu\text{m}$ ) された状態で、高面圧にもかかわらずダイステーパーからコンテナ内部で形成される点が特に注目される。図 5 (c) の焼付き面は工具面上へ移着した素材の大規模な凝着層によって顕著な表面損傷を受けた状態であり、低面圧にもかかわらずベアリング部からダイステーパー出口近傍において形成されることがわかる。パニシ面と焼付き面の中間の遷移領域 [図 5 (d)] では、工具面上に顕著な素材移着は観察されなかったが、図 5 (e) の縦断面写真にみられるように局所的な表層クラックが形成され、大規模な素材移着を生ずる直前の状態すなわち焼付き開始状態となっているものと考えられる。

図 6 に面圧・相対すべり試験における  $p$  および  $\tau_f$  の分布の一例を示す。平均面圧  $\bar{p} \approx 320$  MPa の場合であるが、面圧分布は測定体引き上げ量  $L$  によってほとんど変化なく、ポンチ押し込み側ほど高まる傾向を示

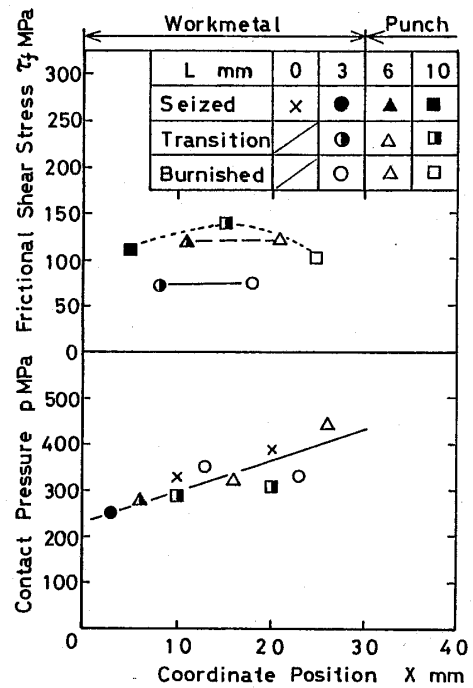
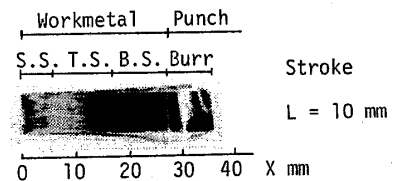


図 6 面圧・相対すべり試験の  $p, \tau_f$  の分布の一例



S.S.: Seized, T.S.: Transition, B.S.: Burnished

図 7 面圧・相対すべり試験の素材摩擦面性状の一例

している。摩擦せん断応力  $\tau_f$  はほぼ一様の分布を示すが、行程初期  $L=3$  mm からかなり高く、 $L=10$  mm では最大約 140 MPa にも達している。図 7 に示すように、試験片摩擦面は押し出しの場合と同様に、バニシ面、焼付き面およびその遷移領域の 3 領域に分類され、各領域は図 5 (b)~(d) と全く同様の性状であった。また押し出しの場合と同様にバニシ面は高面圧側で形成され、焼付きは低面圧側で発生しやすくなっている点が注目される。

#### 4. 焼付き発生の限界条件

図 5 の摩擦面性状の分類に従い、押し出しおよび面圧・相対すべり試験の結果をポンチ行程  $H$  または測定体引き上げ量  $L$  対面圧  $p$  の両対数グラフ上に整理すると、図 8 および図 9 のようになる。通常の押し出し形摩擦試験では、図 4 に示したように面圧  $p$  はポンチ行程とともに顕著に高まるため、図 8 では約 100 MPa 以上の範囲を占めている。100 MPa 以下の低面圧範囲の結果はポンチ行程  $H=2$  mm で押し出し加工を中断し、ポンチ荷重を除荷したのち測定体のみを引き上げることによって得られたものである。図 8 および図 9 において、焼付き面あるいは遷移面が多少でも出現する条件範囲を直線で近似して区分すると、一点鎖線および破線より右側の範囲となる。押し出し形摩擦試験では素材の巨視的塑性変形を伴うにもかかわらず、面圧・相対すべり試験の場合と同様の焼付き発生の限界条件の存在が認められる。すなわち、一点鎖線

で示されるように約 100 MPa 以下の面圧範囲では面圧が高まるほど早い行程で焼付きが発生しやすくなるのに対し、破線で示されるように約 200 MPa 以上の高面圧範囲では逆に面圧が高まるほど焼付き開始が遅れることがわかる。

本実験で用いた工業用純アルミニウム材料では、約 100 MPa 以下の低面圧範囲において面圧  $p$  の増加に伴い接触率（みかけの接触面積に対する真実接触面積の割合）が増加するため、工具面との相対すべりによって摩擦面の酸化膜や汚れ膜の破壊が生じやすく凝着の確率が高まり、焼付きが生じやすくなるものと考えられる。一方、高面圧範囲において面圧が高まるほど焼付き開始が遅れ、バニシ面が形成されやすくなるという興味深い現象は、著者らが分流押し出し形摩擦試験機を用いて得た結果<sup>(6)</sup>と定性的に一致する。分流押し出し形摩擦試験法では、素材の巨視的塑性変形の影響を分離できなかったが、本研究ではこれを伴わない面圧・相対すべり試験による結果とも定性的に一致したことから、高面圧の焼付き抑制作用は主として面圧と相対すべり量によって影響されるものと推定される。

#### 5. 焼付き発生に及ぼす面圧と相対すべり量の影響

##### 5.1 高面圧下における相対すべりの拘束効果

工具と素材面圧間の相対すべり量の分布を正確に調べるため、素材摩擦面に深さ約 0.8~1 mm の圧こんを 2 mm 間隔で刻印し、その圧こん中に化学染料（アリ

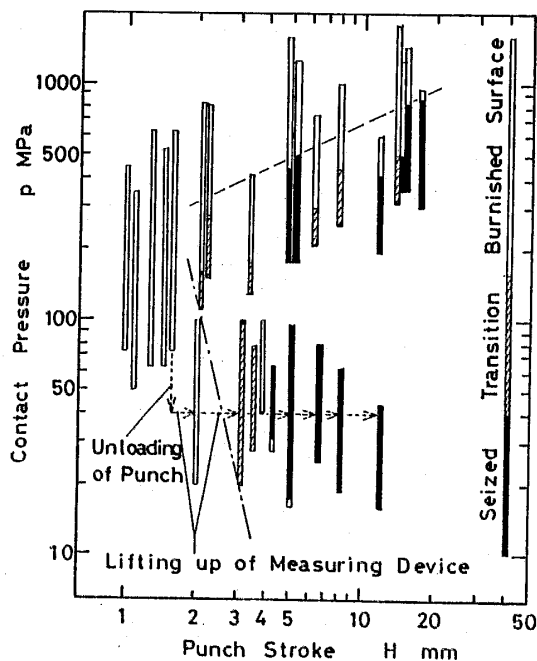


図 8 押し出し形摩擦試験の焼付き発生限界条件

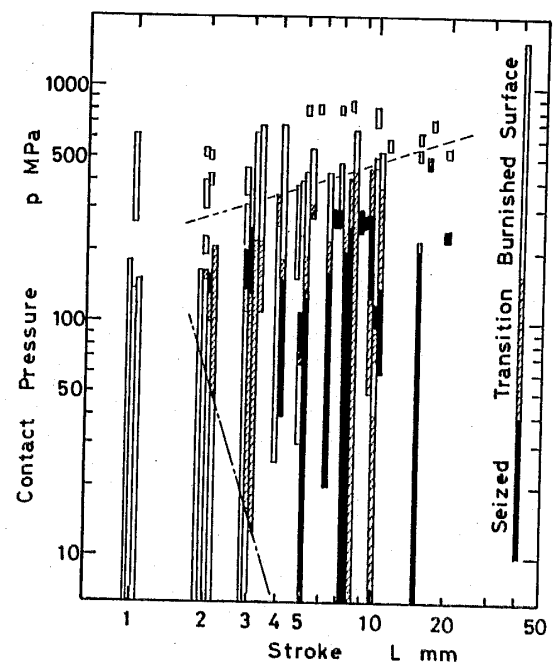


図 9 面圧・相対すべり試験の焼付き発生限界条件

ザリン赤)を充てんした試験片を用いて、ポンチ行程  $H$  または測定体移動量  $L$  に伴う素材摩擦面の変位を実測した。図 10 に示すように、押し出し形摩擦試験の場合には、加工前にダイステーパ出口近傍 ( $x_0=44\sim 50$  mm) にあった圧こんは、ほぼ(ポンチ行程  $H$ ) $\times$ (押し出し比 2.38)の距離だけ変位している。一方、コンテナ内部からダイステーパ内部の初期位置 ( $x_0=0\sim 42$  mm) にあった圧こんはポンチ行程  $H$  の進みにもかかわらず、その変位は数 mm 以内に拘束され、破線で示されるようにポンチの食い込んだ範囲 ( $x \leq H$ ) では

バリとして残されることがわかる。その結果、初期位置  $x_0=42\sim 44$  mm の素材摩擦面が最も顕著な表面積拡大を生ずるとともに、図 10 中に  $\times$  印で示すようにダイステーパ出口 ( $x=50$  mm) において素材内部材料が新生面として露出し、それぞれ  $\circ$  印などの位置まで変位することがわかる。以上のように、焼付きが最初に発生するダイステーパ出口において新生面が露出し、ベアリング部では相対すべりが確実に生じていることが確認される。これに対しバニシ面が形成されるコンテナからダイステーパ内部では、相対すべり量が数 mm 以内に抑制され表面積拡大もほとんど生じないことがわかる。また、ポンチ行程  $H$  の進みに伴い焼付き面または遷移面が拡大してゆくダイステーパ出口近傍では、相対すべり量と表面積拡大がある程度生じている。

面圧・相対すべり試験の低面圧の場合には、図 11(a) の  $p=50\sim 100$  MPa に例示するように、測定体の移動中素材摩擦面はほとんど変位しないで、工具面との間には測定体の移動量とほぼ等しい相対すべり量が生ずることがわかる。一方、高面圧の場合図 11(b) の  $p=200\sim 400$  MPa に例示するように、素材摩擦面は工具面に引きずられ、全範囲において測定体の移動量  $L$  とほぼ同程度の変位を生じ、ポンチ側には  $L$  とほぼ同じ長さのバリが形成される。すなわち、工具面との間の相対すべり量  $S$  は最大でも 5~6 mm 以下に抑制されることがわかる。

以上のように、無潤滑条件下の押し出しでは、ダイス

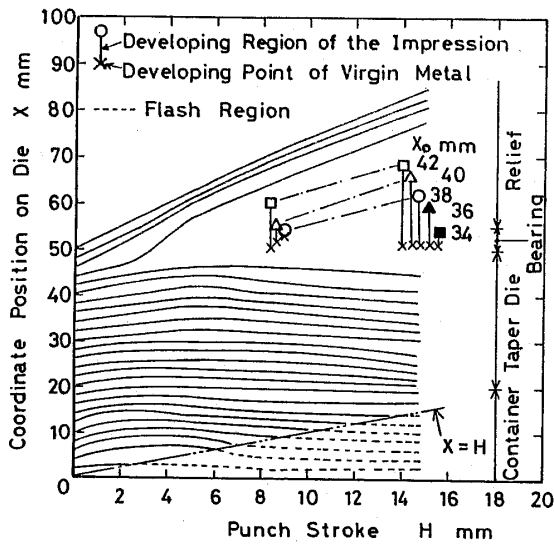


図 10 押し出し形摩擦試験における素材摩擦面変位

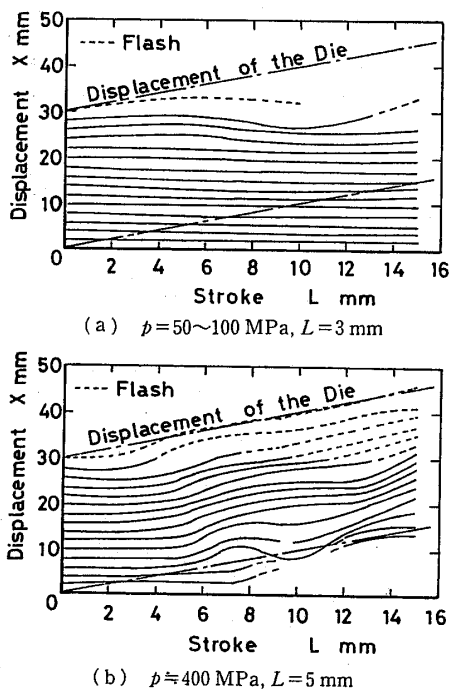


図 11 面圧・相対すべり試験における素材摩擦面変位

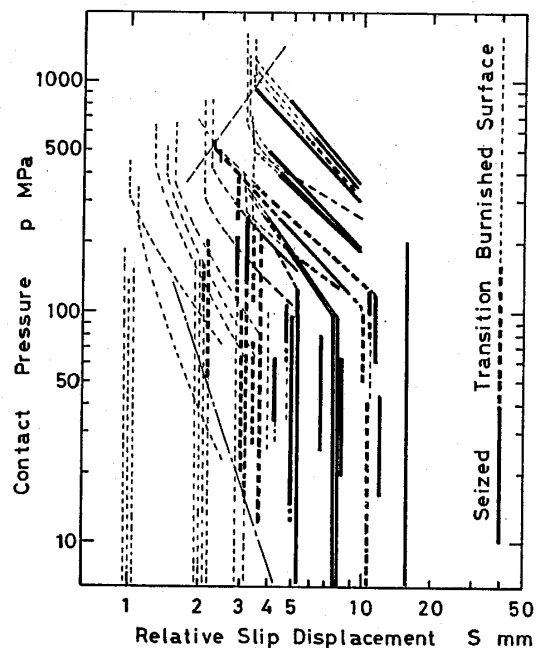


図 12 焼付き発生に及ぼす面圧と相対すべり量の影響

テーパ出口より外側では新生面露出と相対すべりが焼付きの発生・成長の主たる原因となっているが、コンテナ内部およびテーパ部では面圧・相対すべり試験の場合と同様に高面圧下の摩擦拘束により素材摩擦面の相対すべり量が限定され、それに応じて焼付き開始が遅れるものと考えられる。図12は図8および図9の結果を相対すべり量  $S$  と面圧  $p$  の両対数グラフに再整理したものである。  $p=100$  MPa 以下の低面圧範囲では、図8および図9とほぼ同様な焼付き発生限界（一点鎖線）を示している。一方、  $p=200$  MPa 以上の高面圧範囲では、パニシ面の出現する相対すべり量  $S$  は約2~4 mm以内に限定され、高面圧下における焼付きの抑制作用は第1に固着摩擦による相対すべりの拘束効果に起因することが確認される。しかし、図12ではこの相対すべりの拘束効果を除いてもなお高面圧ほど焼付き開始が遅れる傾向を示している。この点について5・2節で検討する。

**5・2 高面圧下における静水圧増加に伴う素材摩擦面直下表面層の延性向上効果** 図5(d)および図5(e)の遷移面に示されるように、焼付き発生の直前の素材摩擦面には、工具面に局所的に固着した領域とその周囲の境界にきわめて厳しいせん断変形が生ずるため、表面層に沿ってクラックが形成されることがわかる。このように焼付き発生の過程では素材移着層形成の段階で、規模の大小に差異はあるものの固着部の素

材内部において必ず破壊過程を伴うものと考えられる。高面圧下では、素材摩擦面直下の表面層に高静水圧が作用するため固着部のせん断破壊が抑制され、焼付き開始が遅れるのではなかろうか。

図13(a)および図13(b)は面圧・相対すべり試験における素材摩擦面直下表面層の縦断面組織を示したものである。図13(a)の低面圧  $p=50\sim 100$  MPa、工具移動量  $L=3$  mmではすでに焼付きが発生しているが、表面結晶粒が摩擦面に沿ってわずかなせん断変形を生じている程度である。これに対し、図13(b)の高面圧  $p=400$  MPa、  $L=5$  mmでは摩擦面直下にきわめて厳しいせん断変形が認められるが、この状態でも完全な焼付きには達していない。焼付き限界状態における素材表面層のせん断ひずみ  $\gamma$  の分布を調べるため、図14中に示すようにすべり方向に直角な断面で二分割した試験片を用いて、その合せ面の角度  $\alpha$  を実測し、せん断ひずみ  $\gamma$  を求めた。図14に示すように、焼付き発生限界近傍の  $L=5$  mmでは摩擦面直下  $t=0.1$  mmにおいて  $\gamma=30$  程度まで達している。

素材摩擦面直下約0.1 mm以内の極表面層において、焼付き発生の限界までにどの程度の塑性変形が生じうるかを調べるため、工業用純アルミニウム A1050 (厚さ2 mm) の硬質材 ( $H_v=41.6$ ) およびそ

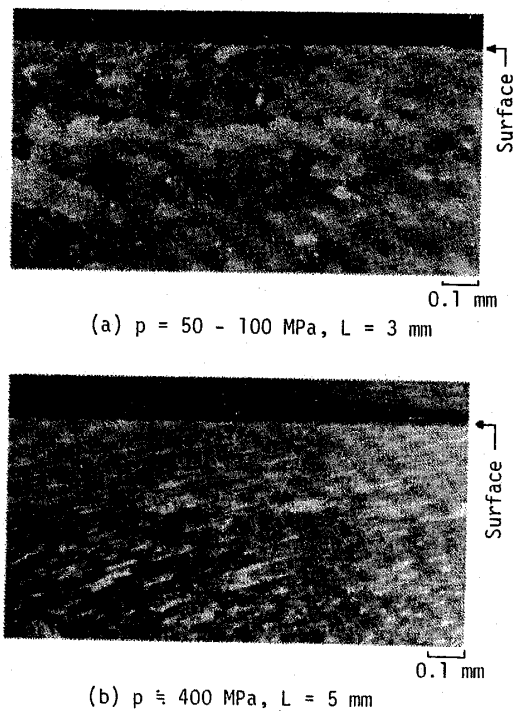


図13 面圧・相対すべり試験における素材摩擦面直下表面層の縦断面組織

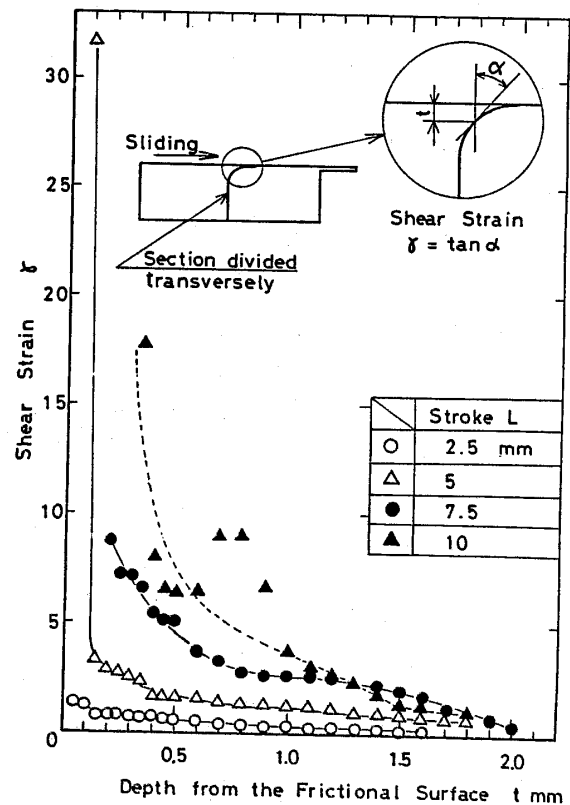
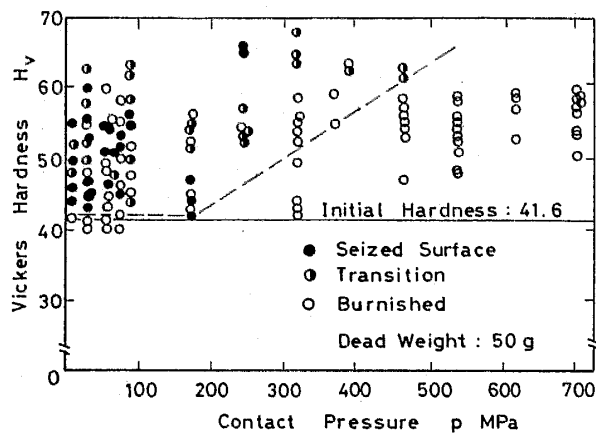
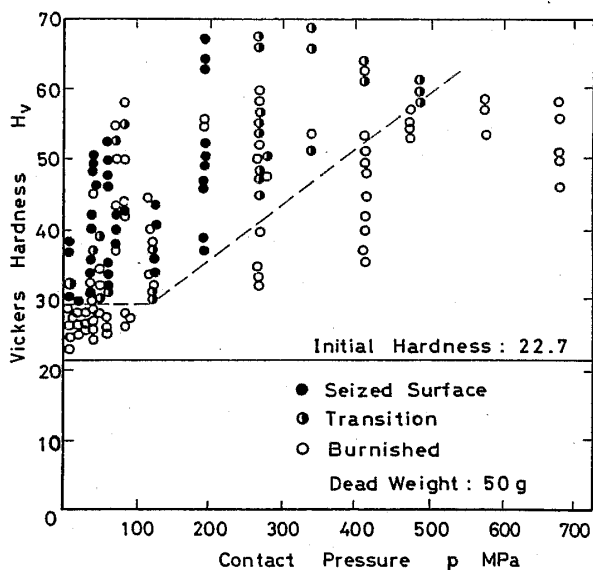


図14 面圧・相対すべり試験における素材摩擦面直下表面層のせん断ひずみ分布 (面圧  $p=400$  MPa)



(a) 硬質材



(b) 焼なまし材

図 15 面圧・相対すべり試験における面圧に対する素材各摩擦面の硬さの変化

の焼なまし材 ( $H_v=22.7$ ) を用いて面圧・相対すべり試験を行い、素材の各摩擦面状態におけるマイクロビッカース硬さ (荷重 50 g) を測定した。圧こん深さは約 0.01 mm 程度で極表面層のひずみ量の定性的比較が可能であると考えられる。図 15(a) および図 15(b) に面圧に対する各摩擦面状態の硬さ  $H_v$  の変化を示す。焼付きおよび遷移面は破線より上部範囲に現れ、低面圧範囲では、図 15(a) の硬質材の場合には初期硬さとほぼ同じ硬さから焼付きが発生するのに対し、図 15(b) の軟質材では  $H_v=30$  程度までひずみが増大してから焼付きに至ることがわかる。一方、高面圧範囲では、図 15(a), (b) いずれの場合にも面圧増加に伴い焼付き発生時の硬さ  $H_v$  すなわちひずみ量が顕著に高まることわかる。

以上のことから、高面圧下の焼付き抑制作用は、相対すべりの拘束によって素材摩擦面直下にきびしいせ

ん断変形が生ずるにもかかわらず、静水圧増加に伴う素材の延性向上効果により固着部のせん断破壊が抑制される結果現れるものと考えられる。

## 6. 結 論

試作した押し形摩擦試験機を用いて、常温、無潤滑、低すべり速度という摩擦条件下における焼付き発生機構の解明を試みた。本研究では、押し形摩擦試験と同様に、素材に巨視的塑性変形を伴わない状態で面圧と相対すべり量を独立に与える摩擦試験を行い、両者の結果を比較検討した。

(1) 押し形摩擦試験では、面圧はダイス出口から内部に向かって顕著に高まる分布を示したが、焼付きは低面圧側のダイス出口から発生しダイステーパ内部に向かって成長する。面圧・相対すべり試験の場合にも、高面圧側よりも低面圧側で焼付きが発生しやすいことがわかった。素材摩擦面性状をバニシ面、焼付き面および遷移面に分類し、ポンチ行程または測定体移動量対面圧の両対数グラフ上に整理した結果、異なる 2 種類の焼付き発生限界条件の存在が確認され、約 100 MPa 以下の低面圧範囲では面圧が高いほど早い行程で焼付きが発生するのに対し、約 200 MPa 以上の高面圧範囲では逆に面圧が高いほど焼付きの開始が遅れることがわかった。

(2) 工具と素材面間の相対すべり量を実測した結果、押し加工ではダイス出口近傍において素材内部材料が新生面として露出したのち相対すべりを生じ、これが焼付き発生の主たる原因の一つとなる。これに対し、高面圧下のコンテナおよびダイステーパ内部では高い摩擦拘束のため相対すべり量が数 mm 以内に限定される。この高面圧下における相対すべりの拘束効果は面圧・相対すべり試験によっても同様に確認され、高面圧下における焼付き抑制作用の第 1 の原因となることが明らかになった。

(3) 焼付き発生限界までに素材摩擦面直下の表面層に生ずる限界ひずみ量が面圧増加に伴い顕著に高まること明らかになり、高面圧下の焼付き抑制作用は、相対すべりの拘束によって素材摩擦面直下の表面層にきびしいせん断変形が生ずるにもかかわらず、静水圧増加に伴う素材の延性向上効果により固着部のせん断破壊が抑制される結果現れることがわかった。

## 文 献

- (1) 例えば、大矢根・ほか 3 名、塑性と加工、22-242 (昭 56), 257.
- (2) 例えば、後藤・若杉・辻、塑性と加工、24-265 (昭 58), 207.
- (3) 例えば、吉川・佐藤・村上、塑性と加工、25-285 (昭 59),



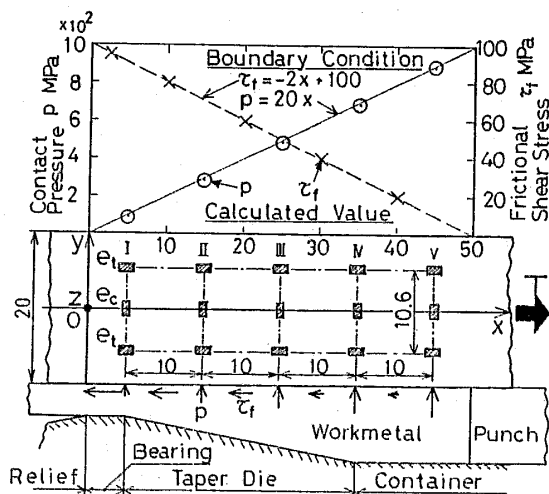
- 942.
- (4) 例えば, 河合・ほか3名, 機論, 48-433, C (昭57), 1473.
- (5) 例えば, 池, 文献(2)の179ページ.
- (6) Kragelsky, I. V. and Alekseev, N. M., *Trans. ASME, Ser. F*, 98-1 (1976), 133.
- (7) 河合・中村, 機論, 39-328 (昭48), 3811.
- (8) 河合ほか3名, 機論, 49-441, C (昭58), 875.
- (9) Nakamura, T., ほか2名, *Proc. 1st ICTP: Advanced Technology of Plasticity, I* (1984), 267.

## 討 論

〔質問〕 黒崎 靖〔三重大学工学部〕

弾性体のひずみ状態を情報源として, 不均一に分布する応力の境界条件を推定する考え方を焼付き現象の解明に適用された点で, 貴研究は貴重と思う。そこで, 式(1), (2)についてお伺いしたい。一般に, 特定の場所での  $e_c$ ,  $e_t$  は境界面全体に分布する  $p$  および  $\tau_f$  による応答の重ね合せとして生ずると思うが, 式(1), (2)のように, その場所近傍の  $p$ ,  $T$  のみの関数として独立に表現できるのはなぜか。換言すれば, これらの式が成立するためには,  $p$ ,  $T$  の分布形態に何らかの制約条件が必要でないか。

〔回答〕 ご指摘のとおり, 特定の場所におけるひずみ  $e_c$ ,  $e_t$  は工具表面に分布する面圧  $p$  と摩擦せん断応力  $\tau_f$  によるひずみの重ね合せとして現れるが, 問題はその影響範囲であると思われる。荷重検定の結果では, 例えば図2において, IとIIの中間位置より上側の範囲だけに一樣な面圧を負荷した場合, Iの  $e_c$  はほとんど零となるのに対し, IIの  $e_c$  はIII~IVと同量のひずみが生ずることが確認された。したがって, I~Vの各位置で検出されるひずみ  $e_c$  はその位置を中心として最大でも  $\pm 5$  mm 以内の面圧によって影響されるものと考えられる。



付図1 測定体の弾性計算による  $p$ ,  $\tau_f$  分布の測定原理についての検討

また, 付図1の実線および破線で示すように,  $p$  および  $\tau_f$  の直線分布を仮定して測定体の弾性解析を行い, I~Vの各位置における  $e_c$  および  $e_t$  の計算値から, 式(1), (2)を用いて  $p$  と  $\tau_f$  を逆算してみた。その結果, 付図1中に○印および×印で示すように, 仮定した境界条件と良く一致することがわかる。さらに境界条件として  $p$  および  $\tau_f$  を付図1と逆の分布および正弦曲線分布の場合についても同様の結果が得られることを確認している。したがって, 図4および図6に示されるように本実験では,  $p$  および  $\tau_f$  の分布が急激な変化をしないため, 式(1)および式(2)を用いてかなり良い精度で  $p$  および  $\tau_f$  を見積もることができると考える。

〔質問〕 池 浩〔理化学研究所〕

(1) 押し出し摩擦試験の場合, 焼付きなどを観察したのは試験片のテーパダイス側と思うが, その面圧などは平ダイス側の測定からどうやって推定できるのか。

(2) 図10とその説明によれば押し出し摩擦試験ではコンテナからテーパダイス部にかけてデッドメタルを生じた押し出し変形であったことがわかる。パニシ部といっても表面下ではデッドメタル部と押し出される材料の界面でのしゅう動があり, 負荷中は巨大な焼付きが生じていたとも言えよう。試験片を工具から分離する時にデッドメタル (= 工具付着物) が板に冷間接合された形で取り出されるため, 試験片最表面はみかけの損傷がない。こういう現象をさしてパニシ部は焼付きがない部分と呼んでいいものであろうか。

また焼付き発生部の  $p$ ,  $\tau_f$  などを論じておられるが, デッドメタルが形成されなかった部分の塑性力学的条件を決定することになる。焼付き発生の一般的条件を論じているわけではないと理解してよろしいか。

〔回答〕 (1) 説明不足のため誤解を招いたようであるが, 供試摩擦面は平ダイス側である。

(2) コンテナからテーパダイス部では, 工具面境界における直接の相対すべりが抑制されるため, 素材表面層では図13(b)と同様にきわめてきびしいせん断変形を生じる。図5(d)および図5(e)に示すよう

に、焼付き発生直前の遷移面直下には局部的に表層クラックが発生するのが確認できるが、バニシ面が現れる場合には、素材内部にクラックのような不連続な境界面は観察されなかった。したがって、バニシ面直下の素材はきびしいせん断変形にもかかわらず、高静水圧のためせん断破壊が抑制され、焼付きに至らなかったものと考えられる。

本実験では押出し形摩擦試験だけでなく面圧・相対すべり試験を併用し両者を比較検討することにより、焼付き発生に及ぼす面圧  $\mu$  と相対すべり量  $S$  の影響をできるだけ特殊な条件に限らないで議論するように試みた。これらの焼付き発生条件に関する考え方がどの程度広範な条件に適用できるかについては、今後さらに慎重な検討が必要であると考えられる。