

## 塑性加工における焼付き発生機構の研究\*

### (第2報, 押出し形摩擦試験における潤滑油膜厚さの評価)

中村 保\*\*, 松井 伯夫\*\*\*

## Seizure Initiation Mechanism in Cold Metalworking Processes

### (2nd Report, Estimation of Oil Film Thickness in Extrusion-Type Friction Test)

Tamotsu NAKAMURA and Norio MATSUI

An oil film thickness at the tool-work interface was estimated theoretically in an extrusion-type friction test, to examine the effects of oil film thickness on seizure initiation. It has been presumed that a lubricant oil is trapped between the tool and the workmetal when the workmetal is filling up a die chamber. The trapped oil film thickness calculated could be varied in a range less than about  $2\ \mu\text{m}$  by changing the viscosity grade and the applied thickness of the mineral oil. Furthermore, it has been presumed that the trapped oil film thickness reduces with the punch stroke owing to the surface expansion of the workmetal and the contact pressure distribution. The oil film thickness calculated decreased toward the die exit, where it was less than  $0.4\ \mu\text{m}$ . The ratio of the oil film thickness at the die inlet to that at the die exit could be varied in a range from 3.7 to 5.5.

**Key Words:** Forming, Tribology, Seizure Initiation Mechanism, Oil Film Thickness, Viscosity, Surface Expansion

#### 1. 緒 言

塑性加工において、工具・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、その発生機構の解明に基づいた合理的な防止対策および潤滑性能評価法の確立が強く望まれている。

本研究では、塑性加工における焼付き発生機構の解明を目的として、試作した押出し形摩擦試験機を用いて、焼付き発生に及ぼす各種影響因子の本質的役割を個々に分離して把握することを試みている。前報<sup>(1)</sup>では、温度上昇の影響がほぼ無視できる極低すべり速度の無潤滑条件下において、新生面露出、相対すべり量および面圧が焼付き発生に及ぼす影響を明らかにした。

従来、一般摩擦面における潤滑条件下の焼付き発生に対し、臨界温度条件、熱的不安定条件および臨界膜厚条件等が提案されてきた<sup>(2)(3)</sup>。最近、塑性加工でも、木村ら<sup>(4)-(7)</sup>は鋼板の圧延におけるヒート・ストリークの発生が一定の臨界温度によって支配されることを示

した。また、吉川ら<sup>(8)</sup>は台形ねじ山の押つぶし形および線引き形摩擦試験法により、焼付き発生が一定の臨界温度に支配されるのではなく、限界の相対すべり量が温度上昇に伴い顕著に減少するという結果を示した。さらに、河合ら<sup>(9)(10)</sup>は、しごき形摩擦試験機を用いて、焼付き発生の限界相対すべり量が表面積拡大比の増加に伴い顕著に減少するという結果を示した。このように、潤滑条件下の焼付き発生を支配する臨界条件は必ずしも唯一ではなく、加工条件によっていずれの臨界条件が支配的影響を及ぼすかを解明することが重要である。

本報および次報では、常温で温度上昇の影響が無視できる条件に限って、鉱油系潤滑油を用いて押出し形摩擦試験を行い、焼付き発生に及ぼす潤滑油膜厚さの影響について検討する。そのため、油膜厚さの定量化が必須となるが、塑性加工のように高面圧が作用する広い摩擦面において、油膜厚さ分布を直接測定することは極めて困難である。そこで本報では、粘性流体力学的解析を用いて、潤滑油の粘度および塗布油膜厚さを変えた場合に、押出し加工中の油膜厚さ分布が面圧分布の変化および素材表面積拡大によってどのように変化するかを検討した。その結果、加工初期の閉込め油膜厚さおよび押出し加工中の油膜厚さ分布の定量的

\* 昭和61年8月26日 北陸信越支部信越地方(長野)講演会において講演, 原稿受付 昭和60年12月23日。

\*\* 正員, 静岡大学工学部 (〒432 浜松市城北3-5-1)。

\*\*\* 准員, キヤノン(株) (〒146 東京都大田区下丸子3-30-2)。

評価が可能となることがわかったので、ここに報告する。

2. 潤滑油膜の形成モデルと解析の仮定

図1に押し出し形摩擦試験法の原理<sup>(1)</sup>を示す。左右一對の素材試験片はコンテナ・ダイスと中心の平ダイスの間の型孔内に装てんされ、双頭のポンチにより同時に前方押し出される。中心の平ダイスと素材の間が供試摩擦面となり、面圧  $p$  と摩擦せん断応力  $\tau_f$  の分布は平ダイス (測定体) の5箇所における弾性ひずみ  $e_c$ ,  $e_t$  を検出することにより実測される。

潤滑油はあらかじめ素材試験片の供試摩擦面のみに規定油膜厚さ  $h_a$  だけ塗布されるが、素材が型孔内に充満するまでの過程で、工具・素材界面からスクイズされる。大矢根ら<sup>(11)</sup>は円柱素材の端面圧縮において、中心の高面圧部から素材の塑性変形が開始し、圧下が

進むにつれ、図2に示すように、素材表面の巨視的凹みに潤滑油が閉込められることを明らかにした。本研究の押し出し加工では、素材の幅方向 (図1の紙面に垂直方向) にスクイズされやすいと考えられるため、図2のように、押し出し方向には一様な凹みに油膜が閉込められると仮定して解析を行った。なお、Wilsonら<sup>(12)(13)</sup>も平面ひずみ圧縮における潤滑油の閉込め作用について、詳細な検討を行っているが、本研究では、油膜厚さの推定に焦点を絞り、大矢根らの解析に基づいて検討した。

図1において、ポンチ行程の進みに伴い、閉込められた潤滑油は素材の表面変位および面圧分布によってダイス出口側から流出し、油膜厚さ  $h$  は漸次減少する。次報<sup>(14)</sup>で述べる工業用純アルミニウム材料の押し出し形摩擦試験において、素材摩擦面の変位速度  $U$  を実測した結果、高粘度鉱油 VG 1000、塗布油膜厚さ  $h_a \approx 200 \mu\text{m}$  に対し、図3に示す速度分布が得られた。図の横軸はダイステーパー入口を  $X=0$ , 出口を  $X=x/x_1=1$  とする無次元座標で表されている。○印の実測値には多少ばらつきが認められるが、実線で示すように、各領域の速度分布は次式によって近似される。

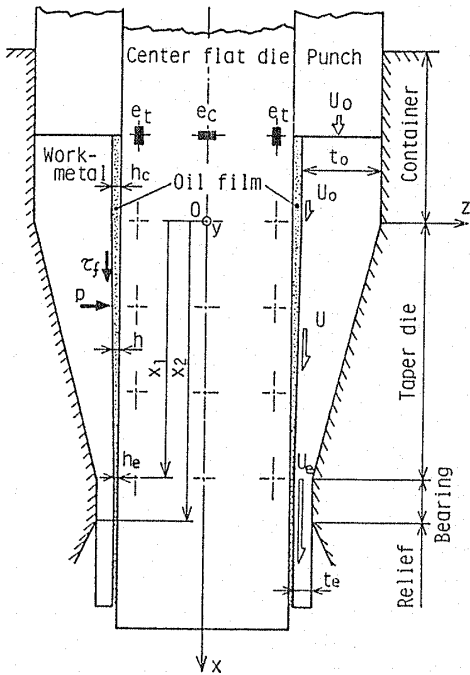


図1 押し出し形摩擦試験法の原理<sup>(1)</sup>

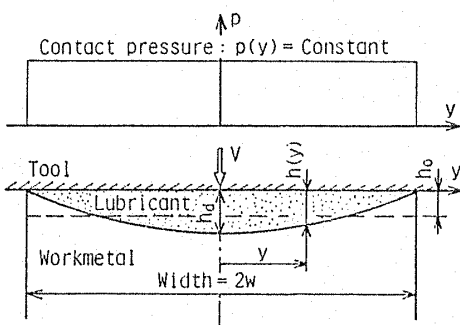


図2 素材充満時における潤滑油の閉込めモデル<sup>(11)</sup>

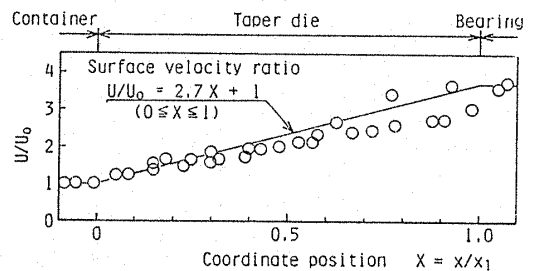


図3 素材摩擦面の速度分布 (VG 1000)

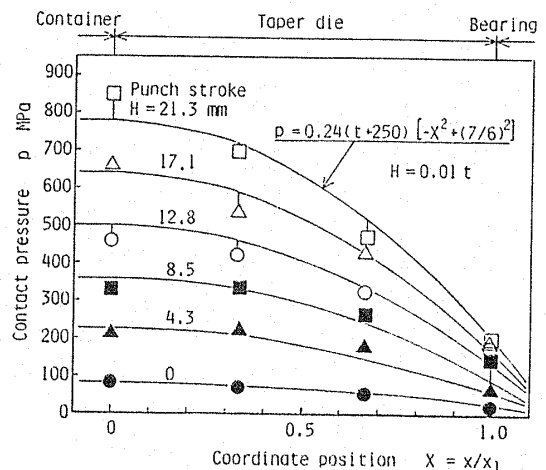


図4 接触面圧分布 (VG 1000)

$$U/U_0 = \begin{cases} 1 & (X \leq 0) \\ -2.7X + 1 & (0 \leq X \leq 1) \dots\dots\dots (1) \\ -3.7 & (1 \leq X) \end{cases}$$

他の潤滑条件の場合にも、焼付き発生直前までは、ほぼ上式によって近似されることが確認された。

一方、図4に示すように、面圧分布の実測値は、素材の型孔内への充填時（ポンチ行程  $H=0$  mmとする）に約90 MPa以下で、ポンチ行程  $H$  の進みに伴い顕著に増加する。コンテナ領域では面圧がほぼ一定であるが、テーパダイス領域ではダイス出口に向かって急減し、ベアリング出口でほぼ零となる。この面圧  $p$  [MPa] の分布は、実線で示すように、押し出し時間  $t$  [s] と無次元座標位置  $X$  の関数として次式のように近似されうる。

$$p = 32.7 U_0 (t + 250) \quad (X \leq 0) \dots\dots\dots (2)$$

$$p = 24 U_0 (t + 250) \{-X^2 + (7/6)^2\} \quad (0 \leq X \leq 1.17) \dots\dots\dots (3)$$

ただし、ポンチ速度  $U_0 = 0.01$  mm/s であるため、ポンチ行程  $H$  [mm] は  $H = U_0 t = 0.01t$  と表される。

上述の素材表面速度分布と面圧分布のもとで、油膜厚さの変化について、粘性流体力学的解析を試みるが、解析を簡単にするため、次のような仮定を設ける。

(1) 潤滑油として、表1に示すような3種類のパラフィン系鉱油を用いるが、いずれも非圧縮性のニュートン流体であると仮定する。圧力-粘度関係式として

$$\eta = \eta_0 \exp(Bp) \dots\dots\dots (4)$$

の形の式が一般に使われるが、パラフィン系鉱油の場合には、次式がよく当てはまるといわれている<sup>(15)</sup>。

$$\eta = \eta_0 (1 + cp)^{1.6} \dots\dots\dots (5)$$

本報では、両者の場合について比較検討を試みる。

(2) 潤滑油の流れは層流で、工具および素材の表面粗さの影響は考慮しない。

(3) ポンチ速度  $U_0$  はごく低速(約0.01 mm/s)で、変形熱や摩擦熱による温度上昇の影響および重力や慣性力の影響は無視できる。なお、型孔内への素材充填時における工具面接近速度  $V$  はポンチ速度  $U_0$  に対し、素材の寸法比を考慮して約1/10になると考え、 $V = 0.001$  mm/s と仮定する。

(4) 油膜厚さはかなり薄いため、厚さ方向の圧力は一様であると仮定する。

(5) 工具および素材の弾性変形は考慮しない。

### 3. 素材充填時の閉込め油膜厚さ

大矢根ら<sup>(11)</sup>の潤滑油の閉込め機構の解析に基づいて、図2に示す油膜厚さの幅方向分布  $h(y)$  を求めた。

その結果は、潤滑油の圧力-粘度関係式(4)および(5)に対し、それぞれ次式のように表される。

$$h(y) = \left[ \frac{6\eta_0 B V (w-y)^2}{1 - \exp(-Bp_0)} \right]^{1/3} \dots\dots\dots (6)$$

$$h(y) = \left[ \frac{90\eta_0 c V (w-y)^2}{1 - (1 + cp_0)^{-1.6}} \right]^{1/3} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $p_0$  は図4におけるポンチ行程  $H=0$  mmのときの面圧を表す。平均油膜厚さ  $h_0$  は中央部の最大油膜厚さ  $h_a$  によって、 $h_0 = (3/5)h_a$  と表される。したがって、平均油膜厚さ  $h_0$  は次式のように表される。

$$h_0 = \frac{3}{5} \left[ \frac{6\eta_0 B V w^2}{1 - \exp(-Bp_0)} \right]^{1/3} \dots\dots\dots (8)$$

$$h_0 = \frac{3}{5} \left[ \frac{90\eta_0 c V w^2}{1 - (1 + cp_0)^{-1.6}} \right]^{1/3} \dots\dots\dots (9)$$

上式に、表1に示した3種類の潤滑油 VG 2, 26 および 1000 の圧力-粘度関係と、図4に示した行程  $H=0$  mmにおける面圧  $p_0$  の値を代入して油膜厚さ  $h_0$  の分布を求めると、図6および7の行程  $H=0$  mmに示した実線のようなになる。両図を比較してみると、(c)VG 1000の場合には、図6の圧力-粘度関係式(4)の場合の油膜厚さ  $h_0$  のほうが8~17%程度大きく見積もられている。しかし、(a)VG 2および(b)VG 26の場合には両図の  $h_0$  の値がほぼ同じとなっている。いずれの潤滑油の場合にも、面圧  $p_0$  の分布に対応してテーパダイス入口から出口に向かうほど油膜厚さ  $h_0$  が漸増する。コンテナ部 ( $X \leq 0$ ) については示し

表1 供試パラフィン系鉱油の圧力-粘度関係

Viscosity grade	$\eta = \eta_0 \exp(Bp)$	$\eta = \eta_0 (1 + cp)^{1.6}$
VG 2	$2.70 \times 10^{-3} \exp(1.03 \times 10^{-8} p)$	$2.70 \times 10^{-3} (1 + 2.27 \times 10^{-9} p)^{1.6}$
VG 26	$6.05 \times 10^{-2} \exp(2.36 \times 10^{-8} p)$	$6.05 \times 10^{-2} (1 + 1.88 \times 10^{-9} p)^{1.6}$
VG 1000	$4.15 \exp(4.17 \times 10^{-8} p)$	$4.15 (1 + 1.44 \times 10^{-9} p)^{1.6}$

Viscosity:  $\eta$  [Pa·s], Pressure:  $p$  [Pa], Temperature: 20 °C

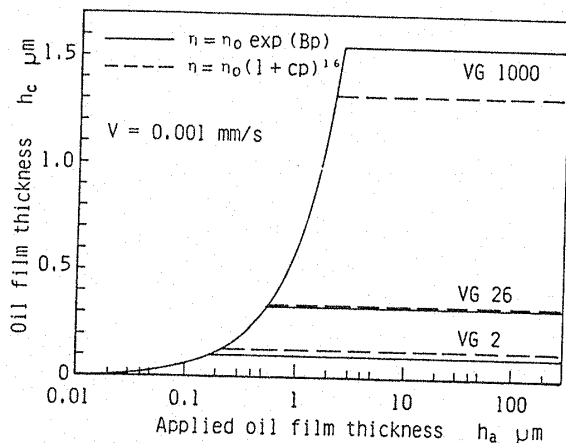


図5 塗布油膜厚さによる閉込め油膜厚さの変化

ていないが、面圧分布一定のため、 $X=0$ の値と同じ一定値をとる。

以上の結果は潤滑油をある厚さ以上に塗布した場合であるが、塗布油膜厚さ  $h_a$  が式(6)または(7)の中央部最大油膜厚さ  $h_a$  より小さくなると、スクイズの初期から中央部素材の降伏が生じるため、閉込め油膜厚さ  $h_0$  は次式のように表される。

$$h_0 = (3/5)h_a \dots\dots\dots(10)$$

塗布油膜厚さ  $h_a$  を変更した場合に、コンテナ部付近にどの程度の閉込め油膜厚さが形成されるかを示すと図5のようになる。高粘度油 VG 1000 の場合には、塗布油膜厚さ  $h_a$  が約  $2.5 \mu\text{m}$  以上で一定の閉込め油膜厚さ  $h_0 = 1.55 \mu\text{m}$  あるいは  $1.32 \mu\text{m}$  が得られるが、それ以下では  $h_a$  を調整することにより、式(10)で与えられる  $h_0$  の値に変更できることがわかる。同様に、中粘度油 VG 26 の場合には、 $h_a = 0.6 \mu\text{m}$  以下で  $h_0 = 0.35 \mu\text{m}$  以下に、低粘度油 VG 2 では、 $h_a = 0.2 \mu\text{m}$  以下で  $h_0 = 0.1 \mu\text{m}$  以下に制御しうることになる。

4. 押し出し行程に伴う油膜厚さの変化

4.1 理論解析 図1に示すように、押し出し行程の進みに伴い、素材充満時 ( $H=0 \text{ mm}$ ) に閉込められた潤滑油は、図3の素材表面速度 ( $U$ ) 分布および図4の接触面圧 ( $p$ ) 分布のもとで、押し出し方向 ( $x$ ) への粘性流れを生じ、徐々に油膜厚さ  $h$  が減少してゆく。その際、解析を簡単にするため、幅方向 ( $y$ ) への流出はないと仮定すると、 $x$  方向への粘性流れに対し、次の関係式が得られる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \left( \frac{U}{2} - \frac{h^2}{4\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{h}{2} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{h^3}{12} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \dots\dots\dots(11)$$

上式は、時間  $t$  および位置  $x$  を独立変数としたときの油膜厚さ  $h$  に関する一階準線形の偏微分方程式を表している。したがって、この偏微分方程式に関する特性曲線とそれに沿う微分関係は次式のように表される。

$$\frac{dx}{dt} = \frac{U}{2} - \frac{h^2}{4\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \dots\dots\dots(12)$$

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{h}{2} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{h^3}{12} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \dots\dots\dots(13)$$

両式の右辺第1項めは素材表面速度  $U$  分布に依存する項、第2項めは圧力  $p$  分布に依存する項を表している。

(I) コンテナ領域 ( $X \leq 0$ ) この領域では、素材表面速度はポンチ速度  $U_0$  に等しく一定であり、面

圧  $p$  は式(2)で与えられる。したがって、式(12)および(13)は次式のようになる。

$$\frac{dx}{dt} = U_0/2 \dots\dots\dots(14)$$

$$\frac{dh}{dt} = 0 \dots\dots\dots(15)$$

式(15)から、油膜厚さ  $h$  は一定となり、素材充満時の閉込め油膜厚さ  $h_0$  がそのまま残留することになる。ただし、図1においてポンチ移動に伴う油の流れが生ずる場合には、コンテナ領域でも面圧分布が生じ、それによる油膜厚さの変化も考慮する必要があるが、本研究では面圧の実測に基づき面圧一定と仮定したため、この流れは生じないものとして解析した。

(II) テーパーダイス領域 ( $0 \leq X \leq 1$ ) この領域では、 $U$  は式(1)の第2番めのように直線分布で近似され、 $p$  は式(3)で近似されうる。これらの関係と圧力-粘度関係式(4)を式(12)および式(13)に代入し、無次元化座標  $X = x/x_1$  に変換して表すと、次のような関係式が得られる。圧力-粘度関係式(5)の場合にも、ほぼ同様な式が得られる。

$$\frac{dX}{dt} = \frac{U_0}{2x_1} (2.7X + 1) + \frac{12U_0h^2X(t+250)}{x_1^2\eta_0 \exp(Bp)} \dots\dots\dots(16)$$

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{2.7U_0h}{2x_1} - \frac{h^3}{6x_1^2\eta_0 \exp(Bp)} \times \{2B(24U_0)^2(t+250)^2X^2 + 24U_0(t+250)\} \dots\dots\dots(17)$$

ここで、油膜厚さ  $h(t, X)$  の初期条件は、図6および7における素材充満時 ( $H=0 \text{ mm}$ ) の閉込め油膜厚さ  $h_0(X)$  によって与えられる。すなわち、

$$h(0, X) = h_0(X) \dots\dots\dots(18)$$

境界条件はコンテナ部の油膜厚さ  $h_c$  によって、

$$h(t, 0) = h_c \dots\dots\dots(19)$$

のように与えられる。

(III) ベアリング領域 ( $1 \leq X \leq 1.17$ ) この領域では、式(1)のように  $U/U_0 = 3.7$  (一定値) になるが、 $p$  は式(3)によって近似される。圧力-粘度関係式(4)を用いた場合に、式(12)および(13)は次式のようになる。

$$\frac{dX}{dt} = \frac{3.7U_0}{2x_1} + \frac{12U_0h^2X(t+250)}{x_1^2\eta_0 \exp(Bp)} \dots\dots\dots(20)$$

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{h^3 \{2B(24U_0)^2(t+250)^2X^2 + 24U_0(t+250)\}}{6x_1^2\eta_0 \exp(Bp)} \dots\dots\dots(21)$$

ここで、油膜厚さ  $h(t, X)$  の初期条件はテーパーダイス領域と同様に、素材充満時 ( $H=0 \text{ mm}$ ) の閉込め油

膜厚さ  $h_0(X)$  により与えられる。境界条件はテーパダイス出口の油膜厚さ  $h_e$  によって与えられる。

テーパダイス領域の連立微分方程式(16), (17)において、右辺第2項の面圧分布による粘性流れの項を無視した場合、すなわち粘度  $\eta = \infty$  とした場合には、次式のような解析解が得られる。

$$h = h_0(X_0) \exp(-2.7 U_0 t / 2x_1) \dots\dots\dots (22)$$

$$X = (X_0 + 1/2.7) \exp(2.7 U_0 t / 2x_1) - 1/2.7 \dots\dots\dots (23)$$

ここで、 $X_0$  は油膜厚さの初期値  $h_0(X_0)$  を与えるための特性曲線の初期位置を表す。ベアリング領域では、式(20)および(21)において  $\eta = \infty$  とすると、特性曲線

$$X = (3.7 U_0 / 2x_1) t + X_0 \dots\dots\dots (24)$$

に沿って、 $h$  は一定となる。

Wilson ら<sup>(16)(17)</sup>も、押し出し加工における塑性変形を考慮した動水学的潤滑の解析を詳細に行っている。そこでは主として定常状態における油膜厚さ分布を示しているが、本研究で目的としている押し出し行程中の時々刻々の油膜厚さ分布の変化は明示されていない。

4.2 テーパダイス領域の油膜厚さ分布の変化

油膜厚さ  $h$  はテーパダイス領域でとくに顕著な減

少を生ずるため、その減少が焼付き発生に対し重要な影響を及ぼすと考えられる。そこで、連立微分方程式(16)および(17)をルンゲ・クッタ・ジルの方法によって数値計算した。圧力-粘度関係式(4)および(5)を用いた場合について、ポンチ行程  $H$  に伴う油膜厚さ  $h$  の分布の変化を示すと、図6および図7のようになる。いずれの潤滑油の場合にも、行程が  $H = 1 \text{ mm}$  程度進んだだけで、テーパダイス出口近傍の油膜厚さが急減し、 $H = 0 \text{ mm}$  の分布と逆傾向になる。行程  $H$  に伴う油膜厚さの減少は低粘度油ほど早く生ずるが、いずれの潤滑油でも定常の油膜厚さ分布に達する行程  $H_s$  は約 27~29 mm となっている。図6と7の油膜厚さ分布の変化はかなりよく似ているが、高粘度油 VG 1000 の場合には図6のほうが油膜厚さの減少速度が多少遅くなっている。これは、 $\eta = \eta_0 \exp(Bp)$  のほうが  $\eta = \eta_0(1+cp)^{16}$  より高圧粘度を大きく見積もるためと考えられる。

図6(c)における点線は、 $\eta = \infty$  とした場合の式(22), (23)を示したもので、いわゆる素材表面積拡大のみによる油膜厚さ分布の変化を表している。行程途中の分布はとくにダイス出口近傍で実線のほうが点線

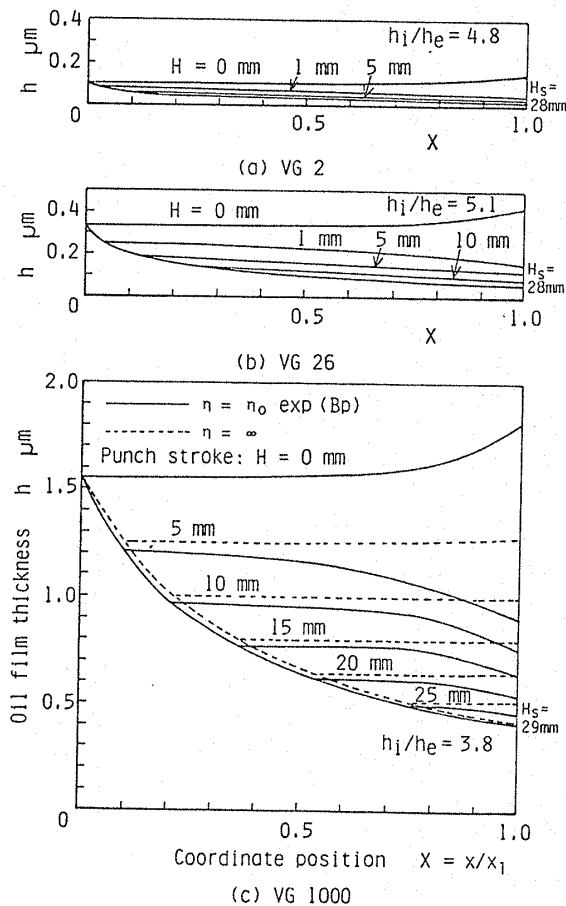


図6 油膜厚さ分布の変化 [ $\eta = \eta_0 \exp(Bp)$  の場合]

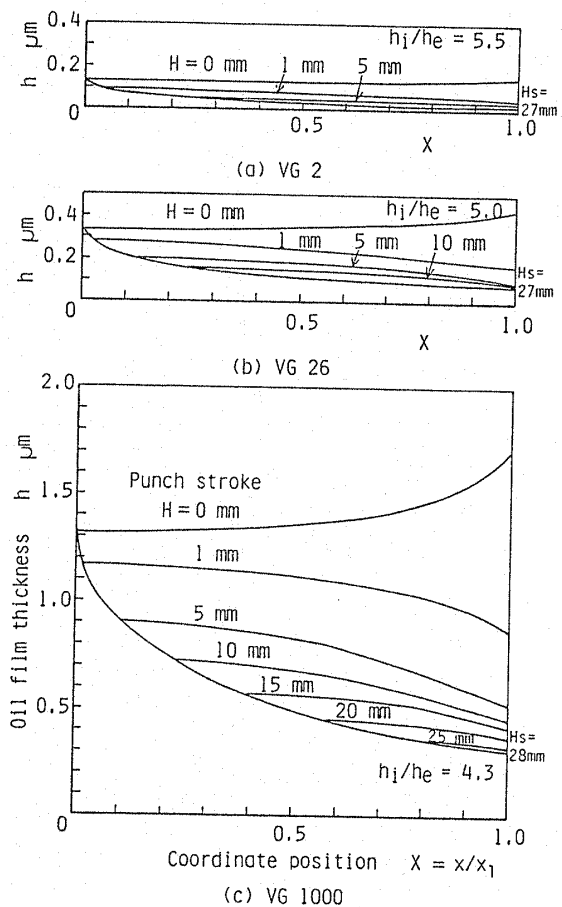


図7 油膜厚さ分布の変化 [ $\eta = \eta_0(1+cp)^{16}$  の場合]

より小さくなっているが、定常状態における分布はほとんど一致することがわかる。このときのテーパダイス入口 ( $X=0$ ) と出口 ( $X=1$ ) における油膜厚さ比  $h_i/h_e$  は約 3.8 となり、ほぼ押し出し比に一致する。したがって、高粘度油で高圧粘度が極めて大きくなる場合には、面圧分布による粘性流動よりも、素材表面積拡大による油膜厚さの減少が支配的となることがわかる。図 6 および 7 中に示すように、高圧粘度の低下に伴い、油膜厚さ比  $h_i/h_e$  は 4.3 から 5.5 程度まで減少し、面圧分布に起因する油膜厚さの減少割合が多くなることがわかる。

4.3 ポンチ行程に伴うダイス出口油膜厚さの変化  
次報<sup>(14)</sup>の実験において、焼付きはダイステーパー出口近傍から発生することが示される。そこで、図 6 および 7 におけるテーパダイス出口の油膜厚さ  $h_e$  をポンチ行程  $H$  に対して示すと図 8 のようになる。低粘度油 VG 2 では、圧力-粘度特性による差異は全く認められないで、 $H=2$  mm 程度でほぼ一定値  $h_e \approx 0.02$   $\mu\text{m}$  に達する。中粘度油 VG 26 では、圧力-粘度特性による差異が行程初期に多少認められるが、 $H \approx 10$

mm 程度ではほぼ一定値  $h_e \approx 0.07$   $\mu\text{m}$  に達する。高粘度油 VG 1000 では、塗布油膜厚さ  $h_a \geq 2.5$   $\mu\text{m}$  以上の場合に圧力-粘度特性によりかなりの差異が現れ、高圧粘度を高く見積もる  $\eta = \eta_0 \exp(Bp)$  のほうが  $h_e$  の減少が少なくなることがわかる。 $h_a$  が 1  $\mu\text{m}$  では、その差はほとんど認められない。この時  $h_e$  の値は  $H$  とともに 0.6  $\mu\text{m}$  から 0.16  $\mu\text{m}$  まで減少する。 $h_a = 0.3$   $\mu\text{m}$  では  $h_e = 0.18 \rightarrow 0.05$   $\mu\text{m}$ ,  $h_a = 0.1$   $\mu\text{m}$  では  $h_e = 0.06 \rightarrow 0.017$   $\mu\text{m}$  のように減少する。

以上のように、潤滑油の粘度および塗布油膜厚さを変更することにより、ポンチ行程  $H$  に伴うダイス出口油膜厚さ  $h_e$  の変化をある程度制御でき、油膜厚さの定量的評価が可能となることがわかった。

## 5. 結 言

焼付き発生に対する油膜厚さの影響を解明するため、本報では押し出し形摩擦試験における油膜厚さの制御と定量的評価の可能性について、粘性流体力学的解析により理論的に検討した。その結果次の結論が得られた。

(1) 素材が型孔内へ充填する過程で、塗布潤滑油が素材幅方向へのみスクイズされると仮定し、工具・素材間に閉込められる油膜厚さ  $h_0$  を推定した。仮定した圧力-粘度関係式によって  $h_0$  の値は多少異なるが、潤滑油の粘度等級と塗布油膜厚さ  $h_a$  の影響が支配的である。高粘度油 VG 1000 では  $h_a \geq 2.5$   $\mu\text{m}$  で  $h_0 = 1.4 \sim 1.5$   $\mu\text{m}$ , 中粘度油 VG 26 では  $h_a \geq 0.5$   $\mu\text{m}$  で  $h_0 \approx 0.35$   $\mu\text{m}$ , 低粘度油 VG 2 では  $h_a \geq 0.2$   $\mu\text{m}$  で  $h_0 \approx 0.1$   $\mu\text{m}$  となる。これ以下の  $h_a$  では  $h_0 = (3/5)h_a$  となる。

(2) 素材充填時に閉込められた潤滑油 ( $h_0$ ) が、素材表面速度分布および面圧分布のもとで押し出し方向への粘性流れを生ずると仮定し、押し出し行程に伴う油膜厚さ  $h$  の変化を推定した。コンテナ領域では閉込め油膜厚さ  $h_0$  がそのまま保たれるが、テーパダイス領域ではダイス出口近傍の  $h$  の減少が顕著で、しかもポンチ行程  $H$  とともに急激に定常油膜厚さ分布 (行程  $H_s = 27 \sim 29$  mm) まで減少する。高粘度油 VG 1000 では、素材表面積拡大による油膜厚さ  $h$  の減少が支配的となり、ダイステーパー入口と出口の油膜厚さ比  $h_i/h_e$  は押し出し比 3.7 にほぼ一致する。粘度低下に伴い面圧分布による粘性流れに起因する油膜厚さ減少の割合が増すため、 $h_i/h_e$  は 4.3 から 5.5 程度まで増加する。

(3) 潤滑油の粘度および塗布油膜厚さ  $h_a$  を調整することにより、ポンチ行程に伴うダイス出口油膜厚さ  $h_e$  の変化をある程度制御でき、VG 1000 では  $h_e \approx$

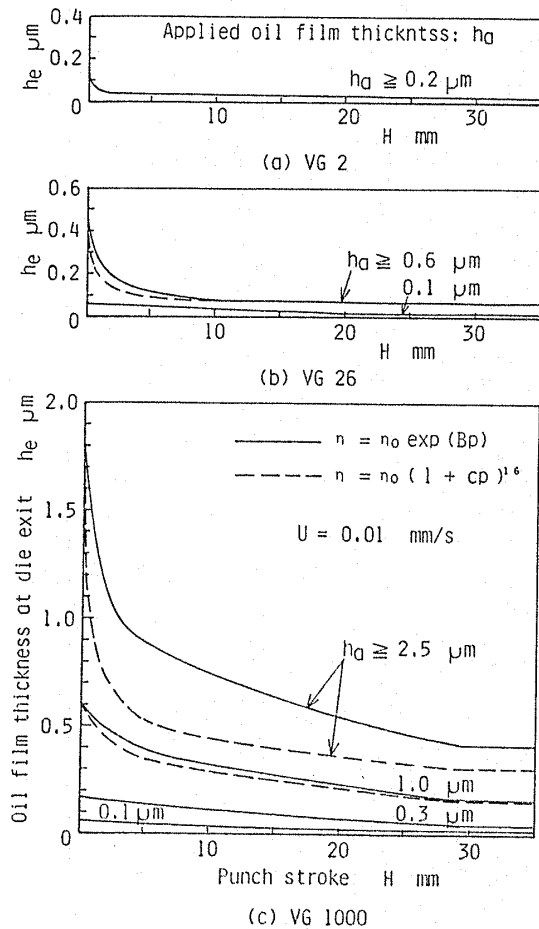


図 8 ポンチ行程に伴うダイス出口油膜厚さの変化

1.8  $\mu\text{m}$  以下, VG 26 では  $h_e \approx 0.5 \mu\text{m}$  以下, VG 2 では  $h_e \approx 0.15 \mu\text{m}$  以下の変化を定量的に評価しうる事が明らかになった。

### 文 献

- (1) 中村・ほか2名, 機論, 52-473, C (昭61), 163.
- (2) 平野・上野, 機誌, 79-696 (昭51), 1073.
- (3) 中村, 塑性と加工, 24-265 (昭58), 100.
- (4) 木村, 潤滑, 30-2 (昭60), 89.
- (5) 木村・岡田, 潤滑, 29-11 (昭59), 809.
- (6) 木村・岡田, 潤滑, 30-4 (昭60), 274.
- (7) 文献(6)の282ページ.
- (8) 吉川・ほか2名, 塑性と加工, 25-285 (昭59), 942.

- (9) 河合・ほか2名, 機論, 47-417, C (昭56), 644.
- (10) 河合・ほか3名, 機論, 48-433, C (昭57), 1473.
- (11) 大矢根・小坂田, 機論, 34-261 (昭43), 1001.
- (12) Wilson, W. R. D., *Trans. ASME, Ser. F*, 96-4 (1974), 539.
- (13) Wilson, W. R. D. and Wong, C. J., *ibid.*, 96-4 (1974), 605.
- (14) 中村・松井, 本論文集 3332 ページ.
- (15) 日本潤滑学会編, 潤滑ハンドブック, (昭53), 265, 養賢堂.
- (16) Wilson, W. R. D. and Mahdavian, S. M., 文献(13)の572ページ.
- (17) Mahdavian, S. M. and Wilson, W. R. D., *ibid.*, 98-1 (1976), 16.

### 討 論

〔質問〕 工藤英明〔横浜国立大学工学部〕

油膜厚さの計算結果がどんな物理現象を説明し, またそれによって裏付けられるかは次報以下に期待する。今回は計算方法について二, 三質問する。

(1) 初期条件であるが, 素材は焼なまし状態でテーパダイにぴったり当たるノーズをつけられているのか。そのため図4に示されるように面圧分布がパンチストロークとともに増加するののか。

(2) 3325 ページ右欄5行めには, 「押し出し方向に一樣なくぼみ」とあるが, 式(8), (9)で  $h_0$  は  $p_0$  の関数なので図4によつ押し出し方向に一樣ではありえないと思う。矛盾ではないのか。

〔回答〕 校閲の関係で, 第3報をすでに報告したが, 本報の計算に基づいて, 焼付き発生の限界油膜厚さの存在を確認することができた。

(1) 初期条件については, ご指摘のとおり, 素材は焼なまし状態で, テーパダイスにはほぼ適合するノーズをつけたものを用いた。そのため, 図4に示されるように, 面圧分布がパンチ行程とともに増加している。

(2) ご指摘のとおり, 「押し出し方向に一樣なくぼみ」という表現が不正確なため, 式(8), (9)の  $h_0$  の分布と矛盾している。正確には, 「図2において, 押し出し方向  $x$  への潤滑油の流れが生じないと仮定し, 図2と同様なくぼみ形状に油膜が閉じ込められるとして解析を行った」という表現にしたほうがよかったと思う。

〔質問〕 島 進〔京都大学工学部〕

(1) 平面ひずみ押し出しの初期において, 型孔内充滿時に閉じ込められる潤滑膜厚さは計算のための仮定(素材の幅方向にのみ油がスクイズされる。したがって押し出し方向には一樣な油膜厚さとする)は, 止むを

得ないと思う。しかし実際には(充滿時には)膜厚は押し出し方向に一樣でなく, ダイ出口近傍では, ほぼ零になっていると思う。このようなことは, 貴研究の主題である油膜厚さの変化にどのような影響があるとお考えか。

(2) また, 表面粗さは, 膜厚変化の制御にどのような影響を及ぼすのか。

〔回答〕 ご指摘ありがとうございます。表現が不正確のため多少誤解を招いたようであるが, 以下のようにお答えする。

(1) 素材充滿時, 「図2のように押し出し方向には一樣なくぼみに油膜が閉じ込められると仮定して解析を行った」と表現したが, 実際には式(8), (9)に示したように素材充滿時の閉じ込め油膜厚さ  $h_0$  は面圧分布  $p_0$  に応じて, 例えば図6の  $H=0$  の実線のような分布を示す。すなわち, 面圧  $p_0$  の低いダイス出口付近で  $h_0$  はやや増加する傾向を示す。第3報において, 素材摩擦面の断面曲線から求めた油膜厚さ分布でもダイス出口近傍でやや増加傾向を示すことを確認している。ただし, ご指摘のように素材の最先端では油の閉じ込めにより  $h_0$  はほぼ零になっていた。

押し出し中の油膜厚さの計算には, このような初期分布を考慮すべきと思うが, 例えば図7に示すように, パンチ行程  $H=1 \text{ mm}$  程度進むと, ダイス出口近傍の油膜厚さがすぐに減少し, いずれもほぼ同じ傾向になるので, 本研究の焼付きの限界油膜厚さの推定にはさほど影響がないものと思われる。

(2) 素材の初期表面粗さがあらい場合には, その粗さのくぼみに油膜が強制的に捕そくされるので, その表面粗さによって油膜厚さがかなり左右されるものと思われる。これを利用して油膜厚さを制御すること

も可能になるものと考えられる。

〔質問〕 水野高爾〔名古屋工業大学〕

速度および圧力の測定結果に適合する油膜厚さ分布を計算されたものであるが、実験結果の考察上有益と思われる。計算結果の妥当性と適用範囲は材料の表面の観察からある程度判定されよう。

(1) 押し出しがはじまってからは  $y$  方向には油は流動しない(漏れない)という仮定は妥当か。また、 $y$  方向分布は実際どうなっているか。

(2) 素材の表面あらかおよび塑性変形による表面粗化を考慮すると、 $0.1\ \mu\text{m}$  程度の油膜厚さの値の取扱いは注意を要する。たとえば、低粘度油では  $h_i/h_e$  が押し出し比よりもかなり大きくなるという結論は現実的か。

(3) VG1000 では油膜厚さ分布  $h(X)$  は表面あらかの分布と対応しているか。

〔回答〕 (1) 第3報の実験において示すが、実際には図2のような巨視的なくぼみへの油の閉じ込めではなく、素材の表面凹凸のくぼみへの閉じ込めがほ

とんどであることが確認された。 $y$  方向の両側端付近では  $y$  方向への油の洩れが多少あるかもしれないが、押し出し中には素材の表面変位による押し出し方向への油の流れが主になると思われる。 $y$  方向の圧力分布は、素材表面のマイクロプールの状態から判断して、さほど顕著な変化はないように思われる。

(2) ご指摘のとおり、とくに低粘度油では、油の閉じ込めは局所的なマイクロプールによるもので、 $x$  方向の面圧分布による粘性流れに基づく油膜厚さの減少はほとんど生じないものと思われる。本報の結論は、あくまで層流を仮定した解析結果によるもので、現実には素材表面積拡大による油膜厚さの減少がほとんどであると思われる。したがって、実際には、 $h_i/h_e$  は押し出し比にほぼ一致すると考えられる。

(3) 素材摩擦面の表面粗さ分布を詳細に測定していないが、マイクロプールの状態から推定したかぎりでは、ダイス出口に向かって油膜厚さ  $h(x)$  が減少する分布は、定性的にはほぼ類似していると判断される。