

帯板圧縮摩擦試験における潤滑剤の挙動

水野高爾・神谷祥二*・岡本道生**

生産機械工学科
(1978年9月7日受理)

Lubricant Behaviors in the Compression-Friction Test of Strip Metals

Takaji MIZUNO, Shoji KAMIYA and Michio OKAMOTO

Department of Industrial-Mechanical Engineering
(Received September 7, 1978)

The lubrication mechanisms were investigated in a modified plane strain compression test where the friction is also measured by simultaneous sliding of one of the dies in the strip-width direction.

Though the average film-thickness of lubricant trapped between tool and workpiece agreed with the theoretical calculation based on the squeeze effect, the subsequent behaviors of lubricant seemed to change with the viscosity under the pressure given and the shear rate. Lubricants trapped in small pits on the deforming surface function predominantly hydrostatically when relatively low viscosity mineral oils or vegetable oils are used under relatively low pressures, but develop hydrodynamically considerable shearing stresses on the workpiece and thus even alter the surface micro structures when higher viscosity mineral oils are used under high pressures.

1. まえがき

塑性加工工具と被加工材料間の摩擦と潤滑に関する理論はいまだ未完成である。EHL (Elasto-Hydrodynamic Lubrication) 理論に刺戟されて、材料の塑性変形方程式と流体潤滑の方程式とを連立して解く試みがなされている¹⁾のは確かに1つの進展であるが、次の点で状況がEHLと異なることに解析者は注意すべきである。潤滑剤の挙動に密接に関係する材料の変形様式の実態が必ずしも明らかでない場合があること、塑性変形によって材料の表面あらさが著しく増大するため潤滑状態は解析しやすい流体潤滑状態から混合潤滑・境界潤滑状態に移行しがちなことなどである。

一方、多くの実験研究では潤滑剤の大部分は変形中の材料の表面に小さなピットを形成して捕捉され、静水的に加圧されることによって、工具と材料の接触が高まるのを抑制し、工具面圧が境界接触部分に集中することを

緩和し、ひいては全体の摩擦の減少に寄与するものとみなされている²⁾。この概念ではピットの潤滑剤の流体摩擦はむしろ無視されている。

このように、流体潤滑論的解析者と塑性加工実験者との見解にかなりの開きがある。ここで述べる摩擦試験³⁾は潤滑剤の挙動とその結果もたらされる摩擦に関する基礎的情報を得て、両者の間隙を埋めようとするもので、本論文⁴⁾の目的は以下のものである。帯板の平面ひずみ圧縮について工具・材料間の油膜厚さ分布を理論と実験と比較すること、潤滑剤の挙動が面圧・すべり速度・粘度によって異なる様を明らかにすること、流体摩擦が境界摩擦とコンパラブルとなる場合のあることを示感することなどである。

2. 帯板圧縮摩擦試験機

本試験機は帯板の圧縮加工中に工具の一方を板幅方向

* 川崎重工業 (株)

** 帝国ピストンリング (株)

に撓動させることにより摩擦を直接測定しようとするもので、詳細は別に報告³⁾したので、原理のみを Fig. 1 に示す。プレスラムに取付けられた下工具が一定速度 W で上向きに駆動されると同時に、上工具が y 方向に一定速度 V で動かされる。 V を材料の流出速度 U より十分大きくすれば、上工具と材料間の全摩擦 F が撓動抵抗 F_r として測定される。

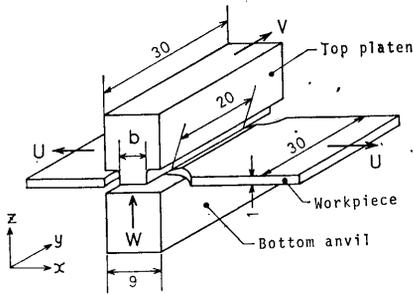


Fig. 1 Principle of the plane strain compression-friction test

試験片は板厚 1mm 幅 30mm で、圧縮される部分のみ別の理由で幅 20mm に減らされている。上下の工具にはブロックゲージが使用され、表面あらさは $0.05\mu\text{m } R_{\text{max}}$ 以下である。上工具の幅 b は 3.8mm と 4.3mm である。本実験では速度比を $V/W=5$ と比較的小さく設定したので、工具・材料の相対すべりの方向の分布を考慮して、測定された摩擦の y 方向成分 F_y を全摩擦 F に換算した。たとえば、板厚減少率 50% のとき流出速度 U は (3.8 or 4.3) W となり、 F_y/F は 0.925 or 0.905 となる。

3. 油膜厚さの分布について

3.1 理論

Fig. 2 の上工具と材料間における潤滑剤の流れに二次元の Reynolds の方程式を適用すると、

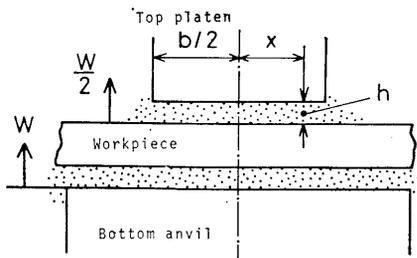


Fig. 2 Squeeze film between the top platen and the workpiece

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 12 \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

ここで、 x は中心からの距離、 h 油膜厚さ、 η 潤滑剤の粘性係数、 p 圧力、 t 時間である。

η は次のように圧力のみの関数とみなした。ナフテン系鉱油および供試植物油については

$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha p) \quad (2)$$

ここで、 η_0 は大気圧下の粘性係数で、 α は粘度の圧力係数である。パラフィン系鉱油については

$$\eta = \eta_0 (1 + c p)^n \quad (2')$$

ここで、 $n=16$ 、 c は温度と η_0 の関数⁵⁾ である。

工具と材料が接近する段階では h は一様で、 $\partial h / \partial t = -W/2$ である。 $x=0$ で $p=2k$ (材料の二次元降伏応力) となると塑性変形がはじまる*。塑性域が中心から両端に向かって広がる段階については塑性域の圧力 $p=2k$ 一定とすると、 $x=b/2$ が降伏するときの油膜厚さ分布 h_0 は次のようになる。

$$h_0 = \left\{ \frac{\alpha \cdot 2k}{1 - \exp(-\alpha \cdot 2k)} \cdot \frac{3\eta_0 W}{2k} \cdot \left(\frac{b}{2} - x \right)^2 \right\}^{1/3} \quad (3)$$

$$h_0 = \left\{ \frac{c \cdot 2k (n-1) (1+c \cdot 2k)^{n-1}}{(1+c \cdot 2k)^{n-1} - 1} \cdot \frac{3\eta_0 W}{2k} \cdot \left(\frac{b}{2} - x \right)^2 \right\}^{1/3} \quad (3')$$

式 (3) (3)' はそれぞれ式 (2) (2)' に対応し、式 (3) は既に大矢根と小坂田⁷⁾ や Wilson⁸⁾ によって導かれている。この時点における平均油膜厚さ \bar{h}_0 は次のようである。

$$\bar{h}_0 = \frac{2}{b} \int_0^{b/2} h_0 dx = \frac{3}{5} \cdot h_0(x=0) \quad (4)$$

3.2 実験

実験条件は上工具の幅 $b=4.3\text{mm}$ 、圧縮速度 $W=0.42\text{mm/s}$ 、室温 20°C 、潤滑剤はパラフィン系鉱油井 50 モータ油で、式 (2)' の $\eta_0=1400\text{cP}$ 、 $c=0.0086$ 、 $n=16$ である。

Fig. 3 に圧下の進行に伴う材料表面の変化を示す。アルミニウム A1050P-0 では油膜厚さの分布は式 (3)' の予想とはかなり異なり、中央と両端との間に 2 つの谷が形成され、中央付近はかえって高原状となっている。圧縮変形が進むにつれて谷は左右に移動するが、その速度は材料の左右への流動速度より小さい³⁾ ようで、両端に圧力の障壁があることを示唆する。それでも $r=0.7$ になると遂に谷は去り、結果的には潤滑剤がかなり一様に分布した状態が実現している。以上の変化は、円柱やリングの圧縮のように工具が材料に対してオーバハンクしている場合にはみられないもので、材料が工具に対してオーバハンクしている加工における 1 つの特徴である。

* 最近、春日ら⁶⁾ は円柱の高速圧縮試験を行い、円柱端面の圧力分布の積分値がある値に達すると端面から側面へ抜けるブロックすべりを生じ塑性変形がはじまるという新しい機構を提案している。

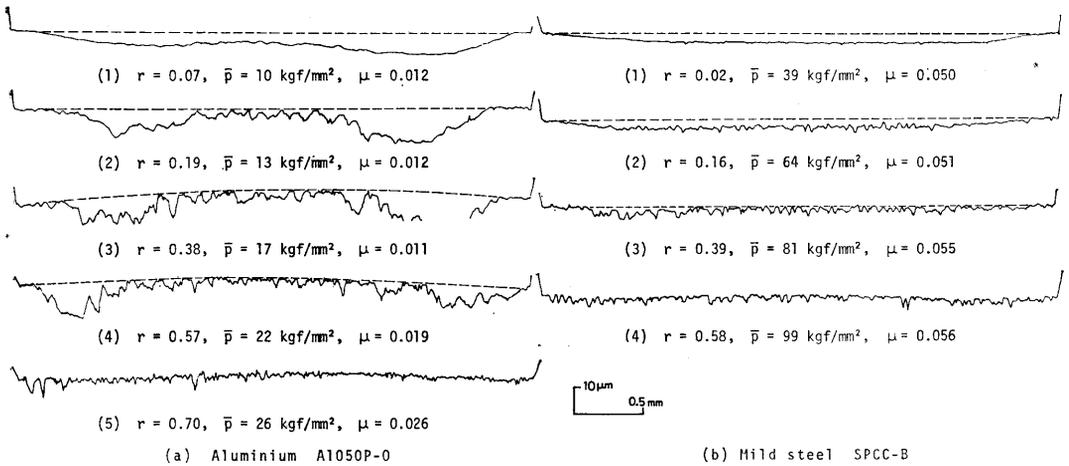


Fig. 3 Variations in surface profile with reduction and strip material (Lubricant: Motor oil #50 (20°C), $W=0.42\text{mm/s}$)

Fig. 3(b) 軟鋼 SPCC-B では当初から油膜はかなり一様で、その後の油膜の薄まり方も遅滞なく進行している。平均油膜厚さ \bar{h} の変化を示すと Fig. 4 のようである。 \bar{h} の実験値は工具面を Fig. 3 の破線のように仮定して求め、一方、理論値は式 (3)' (4) (5) より $2k=4.0\text{kgf/mm}^2$ (A1050P-O) $2k=28\text{kgf/mm}^2$ (SPCC-B) として計算されたものである。図からも初期 ($r=0$) の油膜厚さは理論値に近いが、その後の変化は予想ほど単純ではないことがわかる。

Fig. 3 (a) の油膜厚さ分布はこれと逆の形の圧力分布があって高圧力領域から低圧力領域へ潤滑剤が押しや

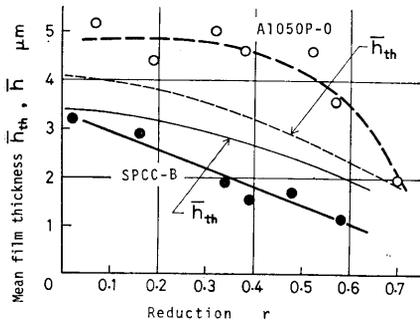


Fig. 4 Theoretical and experimental variations in the mean lubricant film thickness with reduction (Motor oil #50, $W=0.42\text{mm/s}$)

れた結果とみられるから、このことは又、この圧力 $\bar{p}=10\sim 26\text{kgf/mm}^2$ では潤滑剤はなお十分な流動性を有していたことを意味する。一方、これよりはるかに圧力が高い Fig. 3(b) では潤滑剤は上述の圧力分布に影響されずにあたかも固体化した膜のように振舞ったものと推察される。平均圧力 \bar{p} と平均摩擦係数 μ は Fig. 3 に併記し

たようで、いずれも SPCC-B では A1050P-O の数倍であるから、SPCC-B おける摩擦応力 $\tau=\mu\bar{p}$ は A1050P-O におけるよりはるかに大きい。このことから又、軟鋼の圧力下ではこの潤滑剤は固体化して境界摩擦に匹敵する流体摩擦をもたらしたことが示唆される。

4. 速度と潤滑剤粘度の影響

4.1 実験条件

銅板 TCuP1-O (0.2% 耐力 4.7kgf/mm^2 , 引張強さ 23kgf/mm^2 , 50mm の伸び 49%, 表面あらさ $0.3\mu\text{m } R_{\text{max}}$) を供試材とし、その厚さ (1mm) を 55% 圧下しながら同時に摩擦を測定した。上工具の幅 $b=3.8\text{mm}$, 圧下速度 $W=0.0042, 0.042, 0.42\text{mm/s}$ で $V/W=5$ とした。

供試潤滑剤の実験温度における粘度特性は Table 1 のようで、鉱油はアニリン点 90°C を境にナフテン系とパラフィン系に分類され、式 (2) (2)' のパラメータ α と c は Cameron⁵⁾ に従って推定された。

4.2 結果

材料の板厚減少率 r の増加に伴う工具面圧 \bar{p} と摩擦応

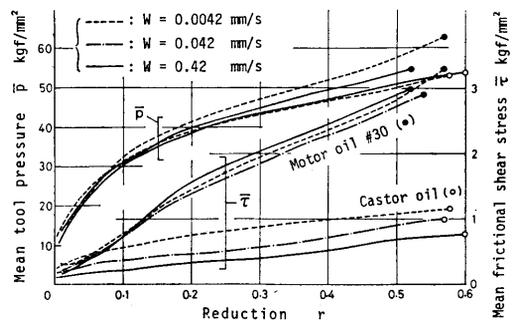


Fig. 5 Typical variations in load and friction with reduction, speed and lubricant

Table 1 Lubricants used and the viscosity parameters α and c estimated

Lubricant	Sp. gravity	Aniline point °C	Temperature °C	Viscosity cS	α in Eq. (2) mm ² /kgf	c in Eq. (2)' mm ² /kgf
Cylinder oil #90	0.984	58	21	3800	0.41	
Motor oil #50	0.924	91	26	900		0.0089
Motor oil #30	0.938	69	26	430	0.31	
Motor oil #40	0.884	110	26	310		0.0095
Motor oil #20	0.877	104	26	130		0.0100
Turbine oil #90	0.884	95	26	60		0.0105
Castor oil	0.955		28	580	0.15 ⁹⁾	
Rapeseed oil	0.924		27	62	0.13 ⁹⁾	
Beef tallow	—		22			

力 $\bar{\epsilon}$ の変化の例を Fig. 5 は示す。 $\bar{\epsilon}$ が r とともに増加するのは油膜厚さの減少と圧力の増大によるとみられるが、 $\bar{\epsilon}$ の増加率がひまし油より #30モータ油ではるかに大きいことおよびひまし油でみられるいわゆる速度効果が #30モータ油ではみられはいいことが注目される。

試験後の材料面をみると Fig. 6 のようである(縦倍率は Fig. 3 の5倍である)。工具と材料の界面に捕捉される潤滑剤の量が圧下速度 W ととも増大するのはひまし油でもモータ油でも同じであるが、材料面の微視構造は両者でかなり異なっている。すなわち、ひまし油では工具

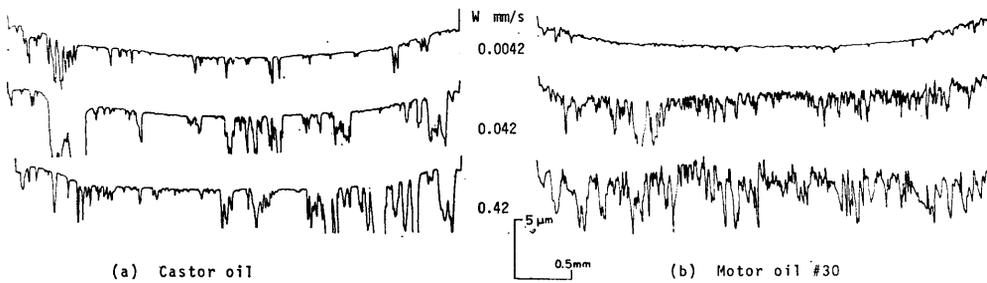


Fig. 6 Difference in the resulting surface profile between with castor oil and motor oil #30 (Strip material: copper TCuPl-O, reduction: 52~60%)

面とよくなじんだ接触部分と潤滑剤の溜り場ピットとなっている部分とが明瞭に識別されるのに対して、モータ油 #30の $W=0.042, 0.42$ mm/s では判然としない。モータ油 #30はピットをなすよりはむしろ一様に分布しようとしたようで、台地状接触部を残してピットへ押しやられることに対して相当の抵抗を示したといつてよい。

断面曲線から平均油膜厚さ \bar{h} を求め、 W に対してプロットしたのが Fig. 7 で理論どおり \bar{h} は W の1/3乗に比例している。但し、半固体の牛脂(融点 44°C で 46cS の液体に変わる)はこの温度 22°C ではニュートン流体とはみなしがたく、極く低速で極く厚い膜を形成するという特異な挙動を示している。Fig. 8 は実験値 \bar{h} を理論値 \bar{h}_{th} と比較したもので、理論が前提としているように材料面初期あらさより厚い油膜が形成される場合には \bar{h} は

\bar{h}_{th} とよく一致している。

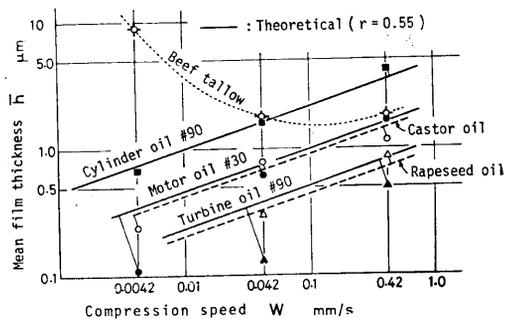


Fig. 7 Mean lubricant film-thickness versus compression speed

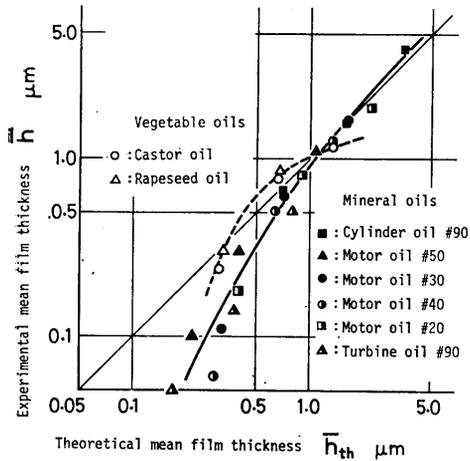


Fig. 8 Comparison of the experimental mean film thickness with the theoretical ($r=52 \sim 60\%$, $W=0.0042 \sim 0.42 \text{ mm/s}$)

しかしながら、 \bar{h} が同じでも工具・材料界面の微視構造は Fig. 6 の例のように異なりうることを忘れてはならない。又、 $\bar{h} < 1 \mu\text{m}$ では \bar{h}_{th} が同じなら鉱油より植物油の方が厚い油膜が形成される事実も注目されてよい、これは冷間圧延実験でも認められた現象である^{10), 11)}。

4.3 潤滑機構の考察

Fig. 9は摩擦応力 $\bar{\tau}$ の速度依存性を圧下率 $r=0.05, 0.5$ について示したものである。工具面圧 $\bar{p}=50 \sim 60 \text{ kgf/mm}^2$ の $r=0.5$ についてみると、植物油と低粘度鉱油（モータ油 #40・#20、タービン油 #90）では W を増すと $\bar{\tau}$ が低下する、いわゆる速度効果がみられるが、高粘度鉱油（シリンダ油 #90、モータ油 #50・#30）では W を増すと $\bar{\tau}$ はかえって増大している。その結果、 $W=0.42 \text{ mm/s}$ まで速度を上げると、高粘度鉱油の $\bar{\tau}$ は低粘度鉱油の3倍になっている。よくみると、 $r=0.05$ でも同様

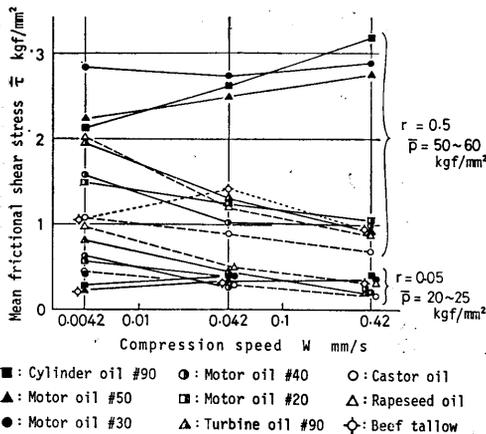


Fig. 9 Variation in friction with speed

な傾向がみられ、極低速 $W=0.0042 \text{ mm/s}$ では粘度大なるほど $\bar{\tau}$ 小となるいわゆる粘度効果が認められるが、 $W=0.42 \text{ mm/s}$ では潤滑剤による $\bar{\tau}$ のちがいはほとんどなくなっている。ここで1つ注意すべきは、常圧粘度は Table 1のように大差ないのに、モータ油 #30 が高粘度鉱油に属し、モータ油 #40は低粘度鉱油の挙動を示していることである。

なお、春日ら¹²⁾は円柱試料の高速 ($4 \sim 8 \text{ m/s}$) 圧縮では低粘度潤滑剤の方が加工効率が大となることを報告している。これ又、高粘度油ほど工具・材料間に残留する油量が増して摩擦が低下するという従来の概念では説明できない現象である。

Fig. 6 のような断面曲線と後に Fig. 12 で示すような全面写真とから接触率 R (工具面と接触して平坦化された部分が全体に対して占める割合) を算定して Fig. 10 に示した。牛脂以外の潤滑剤では W を増せば \bar{h} が大となり R は低下する。しかるに、高粘度鉱油では $\bar{\tau}$ が W

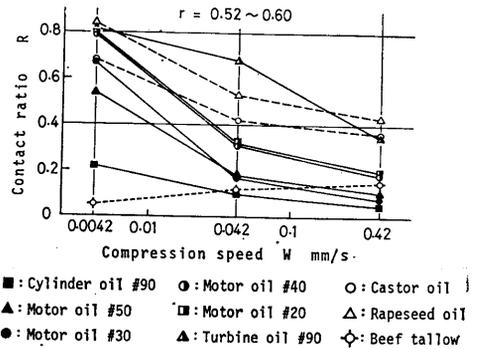


Fig. 10 Variation in contact ratio with speed

とともに増大した (Fig. 9) のであるから、摩擦が境界接触部分の面積に支配されるという従来の概念は修正されねばならない。このことは $\bar{\tau}$ を R に対してプロットしてみると Fig. 11 のように一層明瞭となる。植物油とター

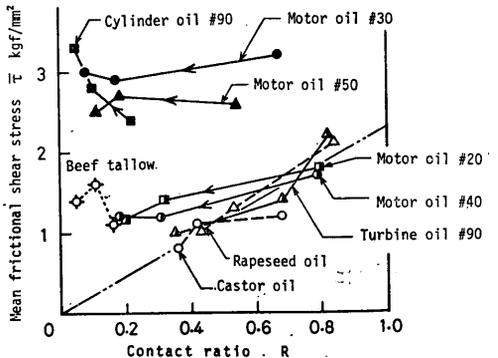


Fig. 11 Friction versus contact ratio

ビン油#90では $\bar{\tau}$ は従来の概念どおり R にはほぼ比例しており、 $R=1$ における $\bar{\tau}$ 2.2kgf/mm²は境界摩擦係数 $\mu=\bar{\tau}/\bar{p}=0.04$ であることを示している。一方、高粘度鉱油は R によらず常に他の潤滑剤より高い $\bar{\tau}$ を示し、 $R=0$ における $\bar{\tau}$ 約3kgf/mm²は流体摩擦応力が境界摩擦応力に匹敵したことを示している。すなわち、 W の増加は R の減少ひいては境界摩擦の減少をもたらすが、同時にすべり速度の増加を伴うため流体摩擦を高め、結局、 R は減少するけれども $\bar{\tau}$ はかえって増大するという結果をもたらしたのである。

断面曲線 (Fig. 6) に対応して表面の外観にも Fig. 12 のように差違が認められた。図の上方に向かって工具が摩擦しているのに、植物油 (Fig. 12(a) (b)) では材料面に相対すべりの方向を示す痕跡がほとんどみられない。これは潤滑剤が変形中の材料面のピットに留まっていて材料の塑性流動につれて主として左右方向に移動したことを示唆する。一方、高粘度鉱油モータ油#30 (Fig. 12(c)) では材料面に相対すべり方向の分布に対応した模様が現われている。潤滑剤が材料流動だけでなく工具面のすべり運動にもつれて移動し、逆に材料面の微視的塑性

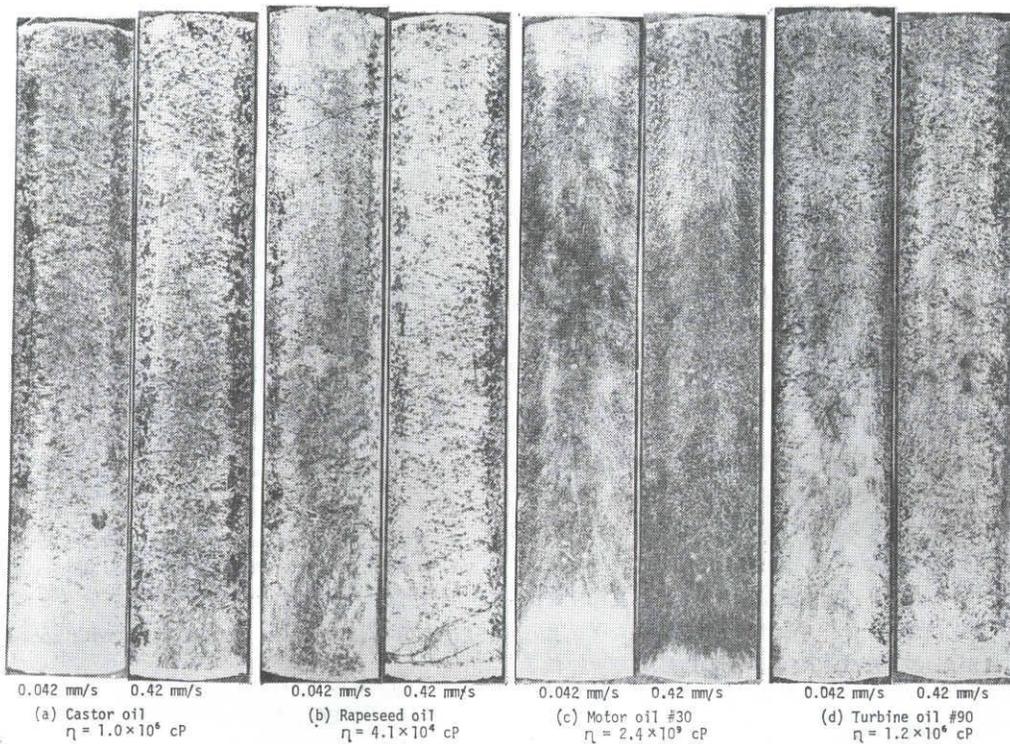


Fig. 12 The different surface appearances with lubricants and compression speeds

変形に影響したかにみえる。換言すれば、植物油がピットで静水的に挙動したのに対して、モータ油#30は動水的に振舞い相当のせん断応力を材料面に伝達して、あたかもピットを出て台地を踏み分けて移動したかにみえるのである。高粘度鉱油のこうした挙動が、 W を増すと R は減少するにもかかわらず、 $\bar{\tau}$ を増大せしめたものと考えられる。

流体摩擦はせん断速度と粘度に比例する。すべり速度は W に比例するのに対して油膜厚さは W の1/3乗にしか比例しないから、せん断速度は W の2/3乗に比例し、 $\bar{\tau}$ が W とともに増大する要因となる。一方、高圧たとえば50kgf/mm²下の粘度を推定してみると、常圧粘度の似か

よったモータ油#30 (高粘度鉱油) とモータ油#40 (低粘度鉱油) の $\bar{\tau}$ のちがいは定性的には説明できる。前者はナフテン系で式(2)より $\eta=2.4 \times 10^9$ cP、後者はパラフィン系で式(2)'より $\eta=2.7 \times 10^6$ cPと計算されるからである。50kgf/mm²における粘度の推定値は Fig. 12にも併記してあり、植物油と同程度の高圧粘度を有する低粘度鉱油タービン油#90 (Fig. 12(d)) は、事実、植物油と似かよった表面状態と摩擦をもたらしている。

なお付け加えると、接触率 R は平均油膜厚さ \bar{h} だけでなく界面での潤滑剤の挙動にも依存することになる。Fig. 13に示すように、 \bar{h} が同じなら、 R は植物油で大、高粘度鉱油で小、低粘度鉱油で中位となる傾向を認めて

よい。

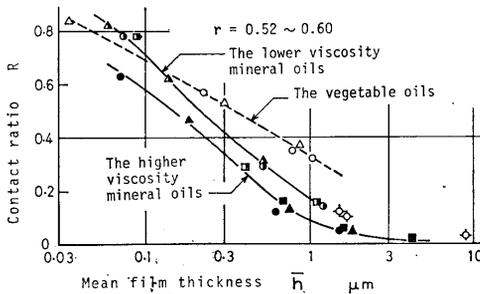


Fig. 13 Contact ratio versus mean film thickness

5. 結論

油膜厚さの理論値は実験値とかなりよい一致を示した。これはスキューズ作用下の油膜厚さは元来、圧延ロールと材料間にくさび作用で創成される油膜厚さ^{13),14)}ほどには、速度や粘度の変化に敏感でないことと、本実験では熱的效果を無視できたことにもよっている。

しかしながら、加工中の油膜厚さの分布、工具と材料の接触具合や摩擦は潤滑剤が高圧界面でその後どう振舞うかに依存する。植物油や比較的粘度の小さい鉱油は変形中の材料面にピットを形成して材料の塑性流動に伴って移動する。すなわち、これらの潤滑剤の摩擦と潤滑への関わりはおおむね静水力学的で、従来の塑性加工における潤滑概念²⁾に従う。問題の圧力下の粘度（経験式による推定値）が桁はずれに大きくなる高粘度鉱油は材料面に相当のせん断応力を伝達し、材料面の微視構造を前記潤滑剤の場合とはまるで異なったものにしてしまう、すなわち、静水的ではなく動水力学的に、あるいは固体化した膜として挙動することが示唆された。

このように、工具・材料界面に挿入された潤滑剤の量が同じであっても、材料面の微視構造、接触率、摩擦などは潤滑剤によって異なってくる。たとえば、植物油と鉱油の潤滑性能の差は、従来その化学的特性によって説明されているが、界面における物理的挙動のちがいにともよっているというべきである。

文 献

1) たとえば, Walowit, J.A. and Anno, J.N.: Modern Developments in Lubrication Mechanics, Applied Sci. Pub., 1975, pp. 151-179.

- 2) たとえば, 春日保男・山口勝美: 塑性加工における工具面, 材料面間の摩擦および潤滑, 機械学会論文集, Vol. 33, No. 252, 1978-8, pp. 1294-1313.
- 3) 水野高爾・平崎彦治: 帯板圧縮摩擦試験機による潤滑の研究, 潤滑, Vol. 20, No. 7, 1975-7, pp. 497-503. および Vol. 21, No. 5, 1976-5, pp. 324-329.
- 4) Mizuno, T., Kamiya, S. and Okamoto, M.: Lubricant Behaviors in the Compression-Friction Test of Strip Metals, Bull. JSME, Vol. 21, No. 159, Sep. 1978, pp. 1424-1430.
- 5) Chu, P.S.Y. and Cameron, A.: Pressure Viscosity Characteristics of Lubricating Oils, J. Inst. Petroleum, Vol. 48, No. 461, May 1962, pp. 147-155.
- 6) 春日保男・堤成晃・井藤正照・村上豊: 高速圧縮加工下における金属円柱の端面摩擦, 第26回塑性加工連合講演会講演論文集, 1975-11, pp. 133-136.
- 7) 大矢根守哉・小坂田宏造: 高速圧縮加工時における潤滑剤の閉込めの機構, 機械学会論文集, Vol. 34, No. 261, 1968-5, pp. 1001-1008.
- 8) Wilson, W.R.D.: An Isoviscous Model for the Hydrodynamic Lubrication of Plane Strain Forging Processes With Flat Dies, Trans. ASME, Vol. 96F, No. 4, Oct. 1974, pp. 539-546.
- 9) 管義夫: 油の粘度に及ぼす温度及び圧力の影響, 理化学研究所彙報, Vol. 12, No. 8, 1933-8, pp. 643-662.
- 10) 水野高爾・原慧: 軟鋼板の冷間圧延における潤滑状態, 塑性と加工, Vol. 16, No. 168, 1975-1, pp. 37-43.
- 11) 水野高爾: 薄板の冷間圧延における潤滑状態, 同上, Vol. 16, No. 171, 1975-4, pp. 337-344.
- 12) 春日保男・堤成晃・井藤正照: 軸圧縮高速加工における金属円柱の柱端境界, 同上, Vol. 16 No. 174, 1975-7, pp. 593-601.
- 13) 水野高爾: 冷間圧延に関する実験, 同上, Vol. 7, No. 66, 1966-7, pp. 383-389.
- 14) 水野高爾・松原喜与志・木村紘: 薄板の冷間圧延における摩擦と潤滑, 機械学会誌, Vol. 71, No. 595, 1968-8, pp. 1037-1044.