接触面凹部に入った粘性潤滑油の解析*

小 島 之 夫*¹

An Analysis of Viscous Lubricating Oil Trapped in Surface Pit

Yukio KOJIMA*²*² Nagoya Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering,
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 466-8555 Japan

In the case of plane strain plastic compression, behavior of a viscous lubricating oil trapped in a small pit on a contact surface is calculated by a finite element method. The oil pressure is controlled by the yielding condition. When the oil pressure is constant over the surface, the oil does not flow and the pit is not flattened. When the lateral deformation of material is constrained and pressure gradient is produced, the oil in the pit flows out and the pit is flattened. Reduction in height required to flatten the pit is above several times of the pit depth. A decrease in the viscosity and an increase in the pit depth enhance the flattening. When the compression tool is slid with a high speed, a hydrodynamic effect of the oil causes a pressure change and the pit moves in the sliding direction.

Key Words: Tribology, Numerical Analysis, Plasticity, Lubrication, Finite Element Method, Surface Pit

1. 緒 言

塑性加工では、工具と材料が接触して焼き付くことを防ぐため、界面に潤滑油を塗布する。このとき、潤滑油は、界面の微小凹凸(表面粗さ)に捕捉され、潤滑状態に大きな影響を与える。多くの実験によれば、凹部の潤滑油が平坦な部分へ流出し、その部分の摩擦を減少させる。しかし、その流出機構については、まだ不明な点が多い。この状況については、池の解説⁽¹⁾に詳しい。

本研究の目的は、塑性加工において、接触面に凹凸がある場合の潤滑機構を明らかにすることである。そのため、本報では、第一段階として、潤滑油をニュートン流体、材料を微小変形弾塑性体と仮定して、接触面凹部(V形ピット)に捕捉された潤滑油の挙動を解析した。特に、凹部がつぶれて、その中の潤滑油が流出するときの条件について検討した。用いた方法は、著者が、これまで、き裂内に浸入した潤滑油を解析してきた方法⁽²⁾とほぼ同じである。

潤滑油の流動を材料の変形と連成させ、潤滑状態を解析的に検討した研究は、これまでに非常に少ない。Mengら⁽³⁾は、潤滑油を粘性体、材料を剛塑性体と仮

定し、有限要素法を用いて、円柱据込みにおける接触面での潤滑油の挙動、特に工具・材料間での閉じ込め現象について解析している。この方法では、加工初期における弾塑性状態が正確に考慮できない。また、材料表面に凹凸がある場合については、解析されていない。

2. 計 算 方 法

2.1 解析モデル 図1に解析モデルを示す。これを基準にして、いろいろな条件を変化させた。

材料は、幅が16mm、高さが $H_0=2\text{mm}$ であり、2次元平面ひずみ状態とする。高さを低くしたのは、接触圧力に勾配を与えるためである。厚さは単位量(1mm)とした。材料は焼きなましたアルミニウムを想定し、そのヤング率を $E=70\text{GPa}$ 、ポアソン比を $\nu=0.3$ とした。材料の降伏応力(変形抵抗) Y は、相当塑性ひずみを ε_p として、

$$Y=180(0.05+\varepsilon_p)^{0.25} \text{ MPa} \dots\dots\dots (1)$$

とした。この場合、初期降伏応力($\varepsilon_p=0$)は85.1MPaとなる。

材料の上表面には、中央に凹部としてV形ピットがあるとした。その半長は、凹部の変形状態を見やすくするため、2mmと大きくした。また、凹部の深さ δ は、実際の表面粗さにおける勾配を想定して、 $\delta=10\mu\text{m}$ とした。

上下の工具は、剛体と仮定し、これらによって材料

* 原稿受付 2000年3月21日。

*¹ 正員、名古屋工業大学工学部(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)。

が圧縮される。上工具の圧縮速度は、 $V_y=1\text{mm/s}$ である。また、水平方向のすべり速度を V_x とする。 $V_x=0$ の場合には、 y 軸に対して対称な変形となるので、材料の右半分だけを用いて計算した。この場合、 y 軸上の x 方向の節点変位を0にした。材料底面については、摩擦がない場合と工具に完全に固定(x 方向の節点変位が0)されている場合とを計算した。材料端での変位を ΔH として、材料の圧縮率を $r=\Delta H/\delta$ で表す。 $H_0=2\text{mm}$ の場合、 $r=1$ で、材料は0.5%の圧縮ひずみを受ける。

材料の上表面と工具との間には、粘性係数 μ (一定)の非圧縮性粘性流体(潤滑油)が入っているとす。油膜の初期厚さは、 $h_0=10\mu\text{m}$ とした。潤滑油は、材料端面から流出できる。

2.2 潤滑油と弾塑性体の連成解析 用いた方法は、文献(2)とほぼ同じである。ここでは、概略を簡単に説明する。

材料は微小変形弾塑性体と仮定し、図1に示すように、8節点アイソパラメトリック要素で分割した。材料内部の節点変位を u_1 、節点力を f_1 とし、潤滑油との境界面の節点変位を u_2 、節点力を f_2 とする。この場合、節点変位と節点力との関係が、増分形で次式のように書ける。

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta f_1 - \Delta R_1 \\ \Delta f_2 - \Delta R_2 \end{bmatrix} \quad \text{.....(2)}$$

ここで、 $K_{11} \sim K_{22}$ は、弾性剛性マトリックスである。 ΔR_1 と ΔR_2 は、弾塑性応力と弾性応力との差から計算した残差(不釣り合い)節点力である。

潤滑油は、非圧縮性ニュートン流体として、9節点アイソパラメトリック要素を用いて分割した。油膜は非常に薄く、凹部での厚さ変化も小さい。油膜の圧力は厚さ方向に変化しないと考えられる。その場合、流体潤滑の基礎式⁽⁴⁾によれば、潤滑油の速度は y の2次関数になる。9節点アイソパラメトリック要素では、一つの要素内部でこの速度分布が近似できる。このため、図1に示すように、 y 方向には1層の要素分割でよい。油膜が薄くなり、要素の縦横比が非常に小さくなって

も計算できる。これらの点については、剛体壁に入った薄い油膜がスクイーズされる場合を計算し、圧力分布が解析解に一致することで確認してある。

潤滑油には、材料との境界面で $-f_2$ の節点力が加わる。境界面の節点速度を $\dot{u}_2$ 、それ以外の領域における節点速度と節点力を $\dot{u}_3$ 、 f_3 と書く。この場合、節点速度と節点力との関係が、次式のように書ける。

$$\begin{bmatrix} L_{22} & L_{23} \\ L_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_2 \\ \dot{u}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad \text{.....(3)}$$

なお、非圧縮性の条件は、ペナルティ法を用いて満足させる。

以上の基礎式において、時間 t が含まれているのは、式(3)だけである。この式において、マトリックス $L_{22} \sim L_{33}$ は、粘性係数 μ に比例する。この場合、粘性係数 μ を大きくすることは、同じ比率で時間の尺度を大きくすることと同じになる。すなわち、 μ を大きくすることと圧縮速度 V_y を大きくすることは等価である。

節点速度 $\dot{u}_2$ 、 $\dot{u}_3$ を後退差分によって近似する。時間増分を Δt として、 Δt 時間前の f_2 を f_2^0 とする。

$\dot{u}_2 \approx \Delta u_2 / \Delta t$ 、 $\dot{u}_3 \approx \Delta u_3 / \Delta t$ 、 $f_2 \approx f_2^0 + \Delta f_2$ を式(3)に代入し式(2)に加える。 Δf_2 が消去できて次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & 0 \\ K_{21} & K_{22} + L_{22}/\Delta t & L_{23}/\Delta t \\ 0 & L_{32}/\Delta t & L_{33}/\Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta f_1 - \Delta R_1 \\ -f_2^0 - \Delta R_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

この連立方程式を解けば、時刻 t における節点変位増分 $\Delta u_1 \sim \Delta u_3$ が計算できる。 ΔR_1 、 ΔR_2 は、 Δu_1 、 Δu_2 の関数である。そして、マトリックス $L_{22} \sim L_{33}$ は、時刻 t における油膜厚さの関数である。このため、式(4)は非線形方程式になる。これを反復計算によって解いた。時間増分は、 $\Delta t=10^{-4}$ として計算を行った。時間増分をこの1/2にして計算を行っても、結果はほとんど変わらなかった。

なお、マトリックス $K_{11} \sim K_{22}$ 、 $L_{22} \sim L_{33}$ をガウスの数値積分によって計算する場合、積分点は 2×2 とした。

Fig.1 Plane strain compression of block with surface pit

以上の方法のうち、文献(2)と異なっているのは、塑性変形による残差節点力 ΔR_1 , ΔR_2 を付加したことと、用いた要素である。

3. 計算結果および考察

3.1 潤滑油がない場合 潤滑油の効果をより明確にするため、潤滑油がなく表面が工具で直接圧縮される場合を解析する。このとき、材料上面と工具との間は摩擦がないとする。

圧縮に伴う上面の接触圧力 ($-\sigma_y$) と凹部深さ (表面形状) h の変化を図2に示す。材料底面に摩擦がない場合、凹部を除いて、接触圧力がほとんど一定になる。接触圧力は、平面ひずみ状態での降伏応力に等しい。一方、材料底面が工具に固定されている場合には、横方向の変形が拘束され、接触圧力が端から中心に向かって上昇する (摩擦丘)。しかし、凹部の変形状態は、両方の場合でほとんど同じである。すなわち、圧縮に伴って、凹部周辺が塑性変形して、表面が平坦になる。凹部深さ $\delta = 10 \mu\text{m}$ と同じ量 ($r=1$) 圧縮すると、凹部はほとんど消失する。

なお、潤滑油がない場合における表面凹凸の押しつぶしについては、これまでも詳細に解析され⁽⁵⁾、凹凸が平滑化されることが示されている。

3.2 圧力勾配の影響 以下、材料上面・工具間に潤滑油がある場合について解析する。はじめに、材料底面の境界条件を変えて計算を行い、接触面 (潤滑油) の圧力分布の影響について示す。

材料底面に摩擦がない場合の計算結果を図3に示す。ここで、油膜厚さ h は、工具面を基準にして上表面の形状を表している。工具が下方に移動すると、潤滑油のスクイーズ効果⁽⁴⁾によって、圧力が上昇する。材料が弾性域にある場合 ($r=0.02$)、圧力は中央部で高く、放物線状の分布になる。潤滑油は中央から端に向か

Fig.2 Pressure distribution and surface profile in the case of direct compression without lubricant

て流動する。圧力分布に対応して材料が弾性変形し、油膜は中央で厚く、端で薄くなる。潤滑油は接触面に捕捉される。さらに圧縮すると、塑性変形が材料中央から始まり、外側に向かって進展していく。 $r=0.28$ で材料全体が塑性変形する。そのときの潤滑油の圧力は、平面ひずみ状態での初期降伏応力 (98.3MPa) に等しく、接触面で一定になる。潤滑油からみれば、工具・材料間にほぼ完全に閉じ込められ、静圧が発生した状態になる。これ以後、潤滑油は流動せず、そのまま (捕捉されたまま) の油膜厚さで、材料の圧縮が進む。接触面に凹部があっても全くつぶれない。

材料底面が工具に固定された場合を図4に示す。この場合、横方向の拘束 (x 方向の圧縮応力) があるため、塑性変形すると、降伏条件によって y 方向の圧縮応力が大きくなる。このため、材料表面でも、圧縮応力すなわち接触圧力が中央に向かって高くなる (摩擦丘)。この圧力勾配によって、潤滑油は中央から端に向かって流動する。圧縮に伴って、中央付近の油膜厚さが減少していく。また、接触面の端付近では、流動してきた潤滑油がたまる傾向が見られる。接触面に凹部がある場合では、凹部内の圧力は、凹部がない場合に比べてやや平坦な分布になる。凹部は、中心に比べて外側で塑性変形が進み、つぶれていく。凹部から流出した潤滑油によって、凹部外側の油膜は、凹部がない場合に比べて厚くなる。

圧縮に伴う凹部のつぶれ方を定量的に示すため、図1に示すように、凹部と平坦部の境界点 (凹部端) を基準にして、凹部の体積 v を計算した。圧縮前の初期体積は $v_0 = 0.02 \text{mm}^3$ である。圧縮に伴う v の変化率 v/v_0

Fig.3 Pressure distribution and surface profile in the case of frictionless condition at bottom surface of block

を図5に示す。図中には、材料高さを基準高さ $H_0=2\text{mm}$ から4mmに増加させ、圧力勾配を減少させた場合もあわせて示す。

材料底面に摩擦がなく、圧力が一定の場合には、凹部がつぶれず、体積 v が変化しない。底面を固定した場合には、圧力勾配によって凹部がつぶれ、体積 v が減少する。材料高さを $H_0=2\text{mm}$ から4mmに増加させると、体積 v の減少が小さくなる。これは、底面の拘束の影響が小さくなり、圧力勾配が約1/2になったためである。 $H_0=2\text{mm}$ の場合に比べて、凹部がつぶれにくくなる。

潤滑油がなく材料表面を直接圧縮する場合では、 $r=1$ で体積 v がほぼ0になる。しかし、潤滑油があると、凹部が非常につぶれにくい。 $H_0=2\text{mm}$ の場合でも、凹部を完全につぶすためには、凹部深さ δ の4倍($r=4$)以上の圧縮が必要になる。

以上の結果(図3~5)から、接触面に潤滑油がある場合、凹部が圧縮塑性変形によってつぶれるためには、

Fig.4 Pressure distribution and surface profile in the case of fixed condition at bottom surface of block

Fig.5 Change of volume of pit v with compression ratio r

接触面に圧力勾配が必要であることがわかった。次に、基準条件から粘性係数 μ 、凹部深さ δ 、初期油膜厚さ h_0 を変えて計算を行い、凹部の変形に与える影響について示す。

3.3 粘性係数 μ の影響 潤滑油の粘性係数を $\mu=0.01\text{Pa}\cdot\text{s}$ と小さくした場合を図6に示す。また、 $\mu=0.01, 0.1, 1\text{Pa}\cdot\text{s}$ の場合について、体積 v/v_0 の変化を図7に示す。

粘性流体では、流体のせん断変形(応力)によって流動抵抗が生じる。そして、せん断応力は粘性係数 μ に比例する。したがって、 μ が小さい場合には、流動抵抗が減少し、潤滑油が端から流出しやすくなる。このため、接触面全体で油膜厚さが小さくなる。 $\mu=0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ (図4)の場合に比べて、凹部内の圧力がわずかに平坦になる。これに伴って、材料の塑性変形が、中央($x=0$)付近に比べて凹部周辺($x=2$)付近で進み、凹部がつぶれ方がやや大きくなったと思われる。この機構については、今後さらに検討する予定である。図7に示すように、粘性係数 μ が小さいほど、圧縮に伴う凹部の体積減少量が大きくなる。

Fig.6 Effect of viscosity on pit flattening ($\mu=0.01\text{Pa}\cdot\text{s}$)

Fig.7 Effect of viscosity μ on volume of pit v

3・4 凹部深さ δ の影響 凹部の深さを $\delta=20\mu\text{m}$ と大きくした場合を図8に示す。また、 $\delta=5, 10, 20\mu\text{m}$ の場合について、体積 v/v_0 の変化を図9に示す。材料の圧縮率として $r=\Delta H/\delta$ を用いているので、凹部がない場合(Flat)については、図8の $r=1$ が図4の $r=2$ と同じ結果になる。

δ を大きくした場合には、 $\delta=10\mu\text{m}$ の場合(図4)に比べて、凹部内における潤滑油の圧力がやや平坦な分布になる。これは、凹部内で粘性流動抵抗が減少するためと考えられる。 $r=3$ において凹部形状を比較すると、中央付近では、図8($\delta=20\mu\text{m}$)の方が図4($\delta=10\mu\text{m}$)に比べて深くなっている。しかし、全体的には、ほぼ同じ程度の深さである。はじめの深さが2倍違うことを考えれば、 δ が大きいほど凹部がつぶれやすいといえる。この傾向は、図9に示す凹部体積の変化からもわかる。

3・5 初期油膜厚さ h_0 の影響 初期油膜厚さを $h_0=1\mu\text{m}$ と小さくした場合を図10に示す。また、 $h_0=1, 10, 100\mu\text{m}$ の場合について、体積 v/v_0 の変化を図11に示す。なお、 $h_0=100\mu\text{m}$ として計算した場合には、圧力

Fig.8 Effect of pit depth on pit flattening ($\delta=20\mu\text{m}$)

Fig.9 Effect of pit depth δ on volume of pit v

と油膜厚さの分布が、 $h_0=10\mu\text{m}$ の場合(図4)とほとんど同じであった。これは、両方の場合で、材料が塑性変形を開始するときの油膜厚さがほぼ同じ($6\mu\text{m}$ 程度)になったためである。一方、初期油膜厚さ h_0 が小さくなり、 $6\mu\text{m}$ 程度以下になると、圧縮後すぐに塑性変形が生じるようになる。このため、 h_0 が油膜厚さと圧力に対して影響を与えるようになる。

初期油膜厚さが $h_0=1\mu\text{m}$ の場合、圧縮初期($r=0\sim 2$)では、凹部から流出した潤滑油が、外側付近へ流入する現象が拡大して現れる。凹部の端における油膜厚さは、 h_0 より大きくなる。これは、凹部外側の平坦部において、潤滑油の粘性流動抵抗が大きくなったためと考えられる。 $r=0\sim 2$ で凹部が大きくつぶれ、その後は、 $h_0=10\mu\text{m}$ の場合とほぼ同じになる。この傾向は、図11に示す凹部体積の変化からもわかる。

3・6 すべり速度 v の影響 上工具が材料を圧縮しながら($v_s=1\text{mm/s}$)、左から右へすべる場合を計算する。すべりの影響だけを見るため、底面に摩擦がなく、拘束による圧力勾配がない場合を計算した。潤滑油から伝達される粘性摩擦によって、材料が底面で右方向へすべることを防ぐため、材料の左下角において、 x

Fig.10 Effect of initial oil thickness on pit flattening ($h_0=1\mu\text{m}$)

Fig.11 Effect of initial oil thickness h_0 on volume of pit v

Fig.12 Effect of sliding of tool on pit flattening

方向の節点変位を0にした。予備的に計算を行った結果、すべり速度が $V_x=100\text{mm/s}$ 、粘性係数が $\mu=100\text{Pa}\cdot\text{s}$ の場合に、すべりの影響が比較的良好に判別できた。その結果を図12に示す。

工具にすべりがあると、凹部における動水力学のくさび作用によって、圧力が変化する。凹部の右側では、圧力が上昇し、左側では減少する。この圧力変化は、材料が弾性状態($r=0.1$)では大きい、塑性変形すると小さくなる。圧縮に伴い凹部は左側がつぶれて、潤滑油が右側に移動する。その結果、凹部は、底がやや丸くなって、右に移動する。

圧縮が進むと、接触面の左端では、油膜が非常に薄くなる。この領域が大きくなると、圧力分布が振動状になり、妥当でなくなった。このため、計算を打ち切った。方法を改良して、さらに計算が続行できれば、表面が平滑化される様子がわかる。すなわち、凹部は、ほぼこのままの形で右端まで移動するのか、あるいは途中で深さが減少して消滅するのかわかる。工具にすべりがある場合については、以上の点も含め、他の条件を変化させた場合の影響について、別に報告したい。

4. 結 言

材料を弾塑性体、潤滑油を粘性流体と仮定し、平面ひずみ圧縮において、接触面凹部に入った潤滑油の挙動を解析した。

接触面(潤滑油)の圧力は、主に材料の降伏条件によって支配される。接触圧力が一定の場合、圧縮しても凹部は全くつぶれない。材料の横方向の変形を拘束すると、接触面に圧力勾配が生じる。この場合、圧縮に

よって凹部がつぶれ、潤滑油が周辺へ流出する。それでも、潤滑油がなく、表面を直接圧縮した場合に比べて、凹部は非常につぶれにくい。平坦にするためには、凹部深さの数倍以上圧縮する必要がある。潤滑油の粘性係数が小さいほど、凹部が深いほど、つぶれやすい。また、初期油膜厚さが小さいと、潤滑油が凹部周辺へ流出する現象が拡大して現れる。

圧縮と同時に、工具が材料表面と相対的にすべる場合では、潤滑油の動水力学的作用によって、凹部がすべり方向へ移動する現象が見られる。

塑性加工において、接触面の凹凸に入った潤滑油を数値解析して、その潤滑機構を明らかにしようとする事は、これまでほとんど行われていない。今回の計算は、その第一歩と考えている。実際の加工では、今回の計算と比べて、塑性変形量が多い。凹凸面(表面粗さ)も変形によって変化する。また、実際の潤滑油では、粘性係数が圧力に依存して変わる⁽⁶⁾。さらに、油膜が薄くなった場合には、工具と材料とは、境界潤滑状態を経て、直接接触することもある。これらも含め、より実際に近い状態を解析し、実験結果と比較することは、今後の課題である。

文 献

- (1) 池浩, 塑性と加工, **34**-393 (1993), 1075-1081.
- (2) 小島, 機論, **62**-599, A (1996), 1571-1576.
- (3) Meng, Y.G., Wen, S.Z. and Hiroyuki, S., *Wear*, **160** (1993), 163-170.
- (4) 日本機械学会編, 機械工学便覧, B1 機械要素設計・トライボロジー(1985), 35, 日本機械学会
- (5) 池浩・牧野内昭武, 塑性と加工, **32**-366 (1991), 848-855.
- (6) 文献(4)の42ページ.