

表面積拡大率に着目した塑性加工における境界潤滑機構のモデル化に関する研究

Study on modeling of boundary lubrication mechanism in plastic forming process focusing on surface area expansion rate

名工大（正）*前川 寛 名工大（非）小嶋 裕馬 名工大（正）劉 曉旭 名工大（正）糸魚川 文広

Satoru Maegawa*, Yuma Kojima*, Xiaoxu Liu*, Fumihiro Itoigawa*

*Nagoya Institute of Technology

1. はじめに

鍛造や板成形をはじめとする塑性加工の CAE 解析において、被加工材と金型との間の摩擦特性をいかにしてモデル化するかが計算精度の向上に向けて重要な課題である。現状では、クーロンの摩擦法則 ($\tau = \mu p$)、高い接触面圧条件下ではせん断応力一定則 ($\tau = mk$) などが使われる場合が多い一方で、 μ や k は加工の進展にともなう表面性状の変化やすべり距離（すべり距離の増加にともない油切れが進行して摩擦係数は増加する）などに依存することは明らかであり、上記の単純化した摩擦モデルのみでは限界がある。そこで本研究では、塑性加工 CAE への境界潤滑条件下での摩擦モデルの実装を目的として、被加工材の表面積拡大率の変化およびトライボロジー分野で広く知られているジャンクショングロースモデルに着目して検討を行った。接触面積が拡大すると境界膜が破断して（または油切れが生じて）摩擦係数は増加する。また、高い接触面圧下で表面の真実接触点が塑性変形状態にある場合、せん断力をうけてすべり生じる際に真実接触点が増加する（ジャンクショングロースモデルにおける接触点成長）。その結果、やはり摩擦係数は増加する。本研究では、表面積拡大にともなう摩擦係数の増加効果を考慮するための簡易モデルを提案するとともに、同モデルを実装した有限要素解析の結果とリング圧縮試験の結果を比較することで、提案するモデルの妥当性について検討する。以下、その詳細について記述する。

2. 実験および数値シミュレーションについて

本研究では、接触面積拡大率の変化にともなう摩擦係数変化を簡便に評価できる手法としてリング圧縮試験を採用した。図 1 に本研究で実施したリング圧縮試験の試験片形状と FEM 解析における初期メッシュ形状を示す。リング圧縮はサーボプレス機（SDE1522：株式会社アマダ社製）を用いて実施した。試験片の材質は S45C（焼鈍材：82HRB）、表面粗さは $R_a = 0.44 \mu\text{m}$ 程度、形状は図 1 左上の通りである。金型の材質は SKD11（HRC60-62）、表面粗さ $R_a = 0.004 \mu\text{m}$ 程度とした。圧縮率は 20%、40%、50%として、それぞれの圧縮率における内径変化を計測した。

使用した潤滑油は図 1 中の表の通りである。境界潤滑特性の違いによる摩擦係数変化を観察するために添加剤違いの 6 種類のサンプル油を準備した。なお、潤滑油のスライズ効果を排除して各サンプル油の境界潤滑特性の差を明確にするために、ヘキサソランに希釈したのちに金型表面に塗布して、ヘキサソラン揮発後の潤滑油の初期膜厚を $1 \mu\text{m}$ とした。

有限要素解析（FEM 解析）には、塑性加工用の汎用 CAE ソフトである DEFORM（Scientific Forming Technologies Corporation 社製）を使用した。初期のメッシュ形状は図 1 の左上の図の通りである。なお、開発した摩擦モデルを FEM 解析に実装するために、DEFORM のユーザーサブルーチン機能 `usrbcc` を利用した。

3. 結果および考察

リング圧縮試験の結果を図 2 に示す。同図の縦軸は内径変化率、横軸は圧縮率である。カラープロットはサンプル油 No.1 から No.6 を用いた場合の実験結果である。グレーの曲線は DEFORM による FEM 解析結果であり、被加工材と金型の間の摩擦係数を一定とした場合の内径変化率と圧縮率の関係である。一般にはこの摩擦係数一定下での FEM 解析の結果を校正曲線として、被加工材と金型の摩擦係数を見積もることが多い。

同図より、潤滑油の中の添加剤の有無および添加剤種の違いにより摩擦係数は大きく変化することがわかる。また、実験結果はそれぞれの FEM による曲線に一致していない。例えば、赤色のプロット（油 No.2）に着目すると、圧縮率 20%と圧縮率 40%の場合は摩擦係数 $\mu = 0.05$ の曲線上にあるが、圧縮率 60%の場合では実験結果は $\mu = 0.055$ と $\mu = 0.06$ の間にプロットされている。これは圧縮率の増加にともない摩擦係数が増加していることを意味する。他の潤滑油においても同様な傾向がみられており、表面積の拡大とともに境界膜が破壊され摩擦係数が増加している様子がわかる。以上の特徴を表現する摩擦係数モデルとして、Bowden と Tabor が提案したジャンクショングロースモデル（junction growth theory）に着目する²⁾。同モデルに基づけば、すべり出し時の摩擦係数 μ は以下のように表現できる。

$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{k}{\sqrt{\alpha(1-k^2)}} \quad (1)$$

ここで、 W は垂直荷重、 F は摩擦力、 α は降伏条件におけるせん断応力の寄与率であって、3~25 の範囲の値をとる。以下の計算では $\alpha = 3$ とした。また、 k ($0 < k < 1$) は表面の清浄度を表す尺度であり、表面が境界膜に完全に覆われている場合は $k = 0$ 、境界膜が完全に破断している場合は $k = 1$ となる係数である。すなわち、境界膜の破壊による摩擦係

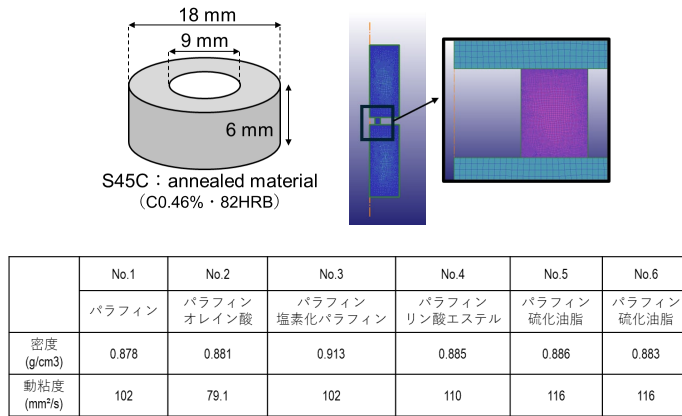


Figure 1 Experimental conditions

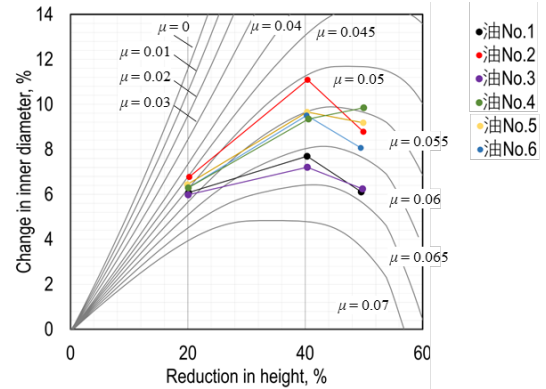


Figure 2 Typical experimental results

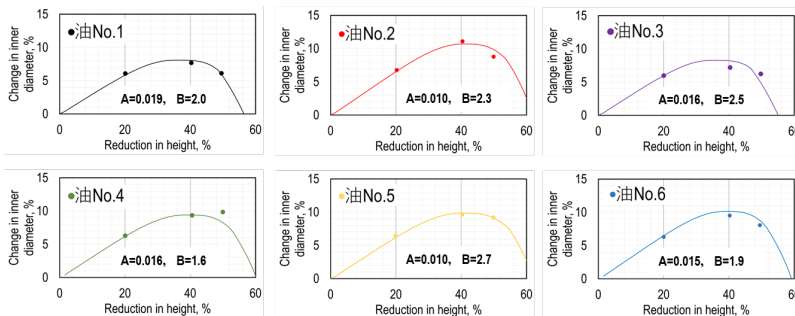


Figure 3 Experimental conditions

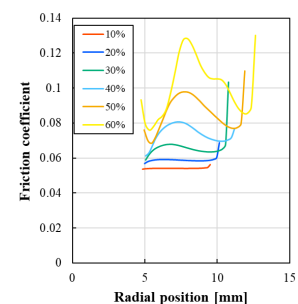


Figure 4 Friction coefficient distribution

数の増加を k の増加による μ の増大として表現することができる。また、清浄度 k は表面積拡大率の増大により、境界膜が破断し k は増加すると考える。そこで、表面積拡大率と洗浄度の関係を以下の式でモデル化する。

$$k = A(S-1)^B + C \quad (2)$$

ここで、 A 、 B 、 C はフィッティングパラメータであり、 S は表面積拡大率である。なお、 k の初期値である C は 0.069 で固定した。図 3 は内径変化率と圧縮率の関係の実験値と計算結果が一致するように、 A と B を決定した結果であり、各プロットが実験結果、実線が図中の A と B の値において FEM 解析を行った場合の計算結果である。すべての潤滑油で実験結果の挙動をうまく表現できていることがわかる。すなわち、潤滑油の境界潤滑特性を、式(2)の A と B の係数の違いによりうまく表現できることが明らかになった。図 4 は油 No.1 において、加工の進展にともなう接触面内の摩擦係数分布の変化である。表面面積が拡大するに従い摩擦係数が増加すること、その増加の程度は接触面内で不均一であることがわかる。

4. おわりに

本研究では、被加工材の表面積拡大率の変化およびトライボロジー分野で広く知られているジャンクショングロスモデルに着目して、境界潤滑条件下における摩擦モデルを提案した。具体的には、ジャンクショングロスモデルにおける洗浄度を示すパラメータ k を、塑性加工における境界潤滑膜の破断の程度を示す指標として着目した。さらに、表面積拡大率と k の関係をモデル化し FEM 解析モデルに実装することで、実験結果をうまく表現できることを明らかにした。従来の摩擦モデルとは異なり、バルクの変形特性が表面積拡大率 S を通して摩擦係数にフィードバックされる点が本モデルの新規性である。塑性加工のように材料変形が大きい場合には、材料のバルク変形と摩擦係数の関係を定式化するという本研究での摩擦係数モデルのコンセプトが重要であると考えている。

謝 辞

本件は愛知県が公益財団法人科学技術交流財団に委託し実施している「知の拠点あいち重点研究プロジェクト第IV期（第4次産業革命をもたらすデジタル・トランスメーション（DX）の加速）」の研究成果である。

文 献

- 1) Bay, N., Wanheim, T.: Wear, 38 (1976), 201-209.
- 2) Bowden, Frank Philip, and David Tabor. The friction and lubrication of solids. Vol. 1. Oxford university press, 2001.