

表面積拡大率に着目した塑性加工における境界潤滑下での摩擦係数モデリング

Modeling of Friction Coefficient under Boundary Lubrication in Plastic Forming

Focus on Surface Area Expansion Rate

名工大・工（正）*前川 覚 名工大（非）小嶋 裕馬 名工大（正）笹井 遥

名工大（正）劉 曉旭 名工大（正）糸魚川 文広

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

*Nagoya Institute of Technology

1. はじめに

塑性加工分野では、製品形状や機能を実現するために、金型設計から試作・評価までを繰り返す設計試作サイクルが行われる。近年はこのサイクルを効率化するために CAE（Computer-Aided Engineering）解析の活用が一般化しており、製品開発の初期段階から加工荷重、成形限界、寸法精度などを予測することが可能になっている。しかし、CAE 解析の予測精度は入力条件の正確さに大きく左右され、特に被加工材と金型との間に作用する摩擦・潤滑条件は、その中でも最も影響が大きい要素の一つである。

塑性加工におけるトライボロジー条件は、一般的な機械要素の流体潤滑状態とは異なり、高面圧・大変形・大きなすべり距離・長時間接触といった過酷な条件下で行われるため、境界潤滑に近い状態が多い。このため摩擦係数は加工条件や加工の進展に伴って時間的・空間的に変化し、単純なクーロン摩擦則（摩擦応力が接触応力に比例）やせん断摩擦則（摩擦応力が材料のせん断応力に比例）¹⁾ だけでは、摩擦係数変化の実態を十分に再現できない。実際、境界潤滑状態では、(i) 高面圧下で真実接触面積が広がり、(ii) すべりによる摩耗や酸化膜破断により新生面が露出し、(iii) 潤滑膜の保持性が低下することで摩擦係数が増加する、といった現象が同時に進行することが知られている。

これらの現象を物理的に記述するためには、バルク変形挙動と界面状態変化を結び付けるパラメータが必要となる。著者らの研究グループでは、その指標として『表面積拡大率（Surface Expansion Ratio）』に着目した塑性加工における境界潤滑下での摩擦係数モデリングをすすめている。表面積拡大率は、加工前後の被加工材の表面積比で定義され（図 1 参照）、加工中に新たに発生する化学的に活性な新生面の割合を反映する。潤滑膜破断や清浄度の変化はこの表面積拡大率と密接に関連しており、トライボロジー分野で広く知られるジャンクショングロース理論（Junction Growth Theory）²⁾ と組み合わせることで、加工進行に伴う摩擦係数変化を簡便にモデル化できる可能性がある。

以下、本稿で紹介するモデリングの手順である³⁾。まず、リング圧縮試験により境界潤滑下での摩擦係数変化を計測して、異なる代表的な潤滑油添加剤の効果を評価する。次に、得られたデータをもとに表面積拡大率と摩擦係数との関係式を構築し、これを FEM 解析に実装して実験結果と比較することで、提案モデルの妥当性を検証する。このアプローチにより、塑性加工 CAE において、材料変形挙動が摩擦係数に与える影響を簡易かつ物理的に反映可能な摩擦モデルの構築を目指す。

表面積拡大率 S（Surface expansion ratio）

- ・加工前の表面積と加工後の表面積の比
- ・加工中にどの程度の新生面が発生するかを示す指標

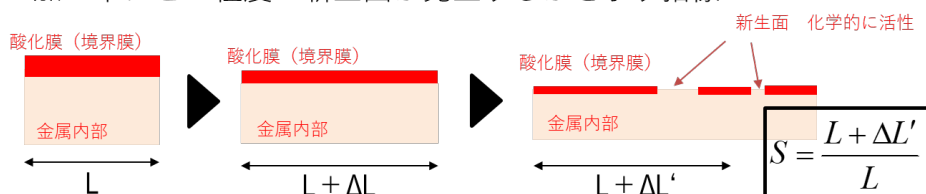


図 1 表面積拡大率 S の模式図：S の増加にともない新生面が形成され摩擦係数は増加する

2. リング圧縮試験による摩擦係数モデリング

リング圧縮試験に着目することの利点は、塑性加工における摩擦係数を比較的簡易かつ定量的に評価できる点にある。試験中のリング内径変化は、被加工材と金型間の摩擦条件に敏感であり、圧縮率と内径変化の関係を比較することで摩擦係数を推定できるため、古くから境界潤滑条件評価に用いられてきた。さらに、試験条件の設定や試験片の加工が容易で、実験データを有限要素解析（FEM）と直接比較しやすいことも利点である。

リング圧縮試験と FEM 解析手順を図 2 および図 3 に示す。詳細は前報を参照されたいが、本研究の特徴は、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にある。本モデルの構築にあたり、リング圧縮試験を用いて境界潤滑条件下での摩擦係数変化を測定し、表面積拡大率と摩擦係数との関係を抽出した。さらに、この関係をジャンクショングロースモデルに組み込み、清浄度パラメータ k と表面積拡大率の関数形として定式化することで、潤滑膜破断の進行を物理的に表現した。

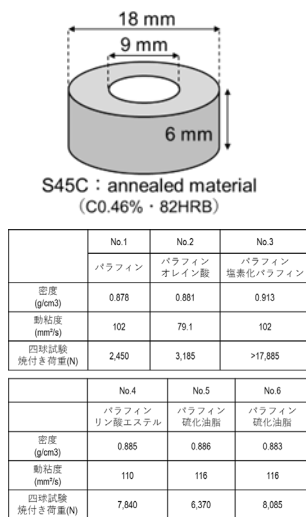


図2 リング圧縮試験条件

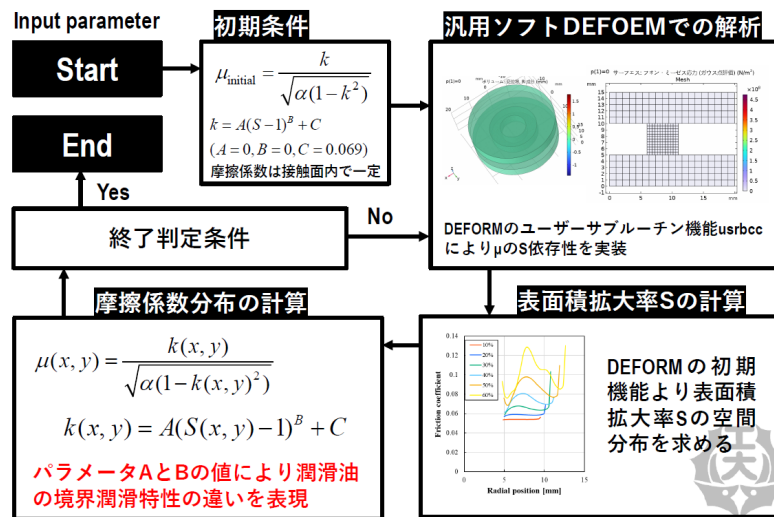


図3 ジャンクショングロースモデルを実装したFEM解析

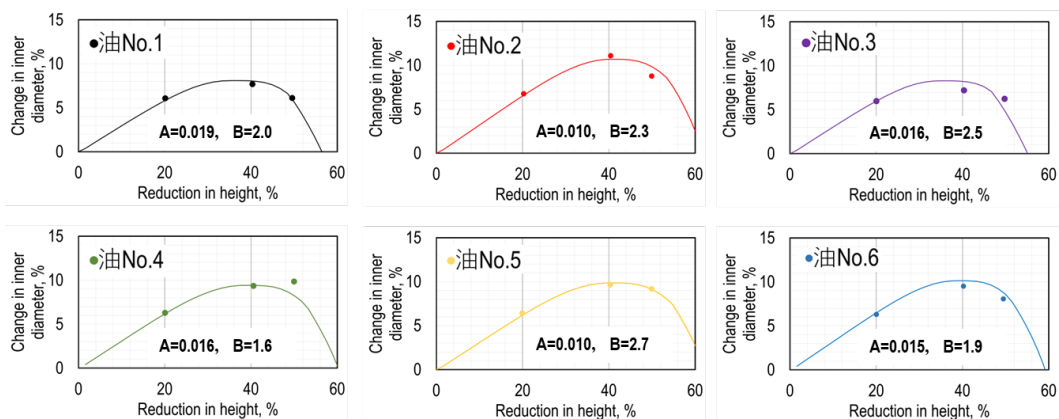


図4 実験結果³⁾: ジャンクショングロースモデルを実装することで圧縮率に対する内径変化率を高精度に再現可能

3. 結果および考察

得られたモデルパラメータ（図3の清浄度パラメータ k と表面積拡大率 S を関係づけるパラメータ A , B , C ）をFEM解析に実装し、実験結果との比較検証を行った結果、各種潤滑条件における摩擦係数の変化傾向を良好に再現できることが確認された（図4）。本研究の利点は、複雑な境界潤滑摩擦特性をパラメータ A や B といった数値データとして表現できる点にあり、例えば潤滑油特性のデータベース化や加工条件選定への活用が容易になる。一方で、本モデルは比較的低温域での検証に基づいており、高温や高速変形といったより厳しい条件への適用には、追加的な実験とモデル拡張が必要である。

4. おわりに

本研究では、被加工材の表面積拡大率とジャンクショングロースモデルを基に、境界潤滑下の摩擦モデルを提案した。清浄度パラメータ k を潤滑膜破断の指標とし、表面積拡大率との関係をモデル化してFEM解析に実装した結果、実験挙動を良好に再現できた。本モデルは、大変形を伴う塑性加工において、バルク変形特性を摩擦係数に反映できる点に特徴がある。

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.
- 3) 前川他. トライボロジー会議 2024 秋名護 予稿集, A45