

研究ノート

リング圧縮試験を用いた境界潤滑状態における潤滑油の評価

永繩 勇人^{*1}、杉本 賢一^{*1}、津本 宏樹^{*1}、廣澤 考司^{*1}
花井 敦浩^{*2}、森田 晃一^{*1}、藤波 駿一朗^{*1}

**Evaluation of Lubricants in Boundary Lubrication
Using the Ring Compression Test**

Hayato NAGANAWA^{*1}, Kenichi SUGIMOTO^{*1}, Hiroki TSUMOTO^{*1},
Koji HIROSAWA^{*1}, Atsuhiro HANAI^{*2}, Koichi MORITA^{*1}
and Shunichiro FUJINAMI^{*1}

Industrial Research Center^{*1*2}

境界潤滑条件下のリング圧縮試験により、潤滑油中の添加剤が摩擦係数に及ぼす影響を評価した。添加剤により摩擦係数は異なり、オレイン酸は加工初期に安定した潤滑膜を形成して効果を発揮し、極圧剤の効果は加工後半で現れ始めた。圧縮率の増加に伴い摩擦係数は上昇し、潤滑膜の破壊や焼付きにより加工面内の摩擦係数は均一でなかった。このため、平均摩擦係数だけでは実際の潤滑挙動を十分に表現できないことがわかった。今後は潤滑状態の変化を反映できる動的摩擦モデルの検討が求められる。

1. はじめに

リング圧縮試験¹⁾とは、リング状試料を圧縮し、圧縮端面の摩擦による厚みと形状の変化から摩擦係数を推定する手法である。具体的には、CAE で仮定した摩擦係数に基づいて変形挙動を解析し、圧縮率と内径変化率の関係からノモグラフを作成する。そこに実験結果を重ねることで、端面の平均摩擦係数を求めることができる。厚みと内径の測定のみで摩擦係数を簡便に推定できる手法として、従来から広く用いられている。

しかし、塑性加工における加工の進展に伴う表面性状の変化や、すべり距離の増加に伴う潤滑油の油切れは摩擦係数に大きな影響を及ぼす。そのため、クーロン摩擦則などに基づく単純化モデルでは限界があり、鍛造をはじめとする塑性加工用 CAE における解析精度の向上において、摩擦は依然として重要な技術的課題となっている。前川らは、塑性加工 CAE への境界潤滑条件下における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、トライボロジ一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、表面積拡大に伴う摩擦係数の増加効果を考慮したモデルを提案した²⁾。著者らもこの研究に参画しており、境界潤滑条件下における潤滑油中の各種添加剤の効果について実験的検討を行ってきた。本稿では摩擦モデルの詳細には踏み込みます、これまでの実験から得られた圧縮率変化に対する摩擦係数の挙動と潤滑状態の関係を報告する。

2. 実験方法

摩擦係数は、リング圧縮試験を用いて評価した。供試体の材質には S45C(焼鈍材、174HV)を用い、外径 18mm、内径 9mm、厚さ 6mm のリング形状とした。寸法公差は $\pm 10\mu\text{m}$ 以下、表面粗さは $\text{Ra}=0.3\mu\text{m}$ 程度である。金型の材質には SKD11(60~62HRC)を用い、形状は直径 50mm、高さ 50mm の円柱とした。金型の表面粗さは $\text{Ra}=0.004\mu\text{m}$ 程度である。圧縮試験は、サーボプレス機(SDE1522、株式会社アマダ製)を用いて実施した。動作条件は 5spm で下死点において 10 秒間停止するモーションとした。また、圧縮率が 20%、40%、50%となるようにスライドストロークを調整した。圧縮後、それぞれの圧縮率における内径変化をマイクロメータで計測した。

使用した潤滑油の詳細を表 1 に示す。境界潤滑特性の違いによる摩擦係数の変化を評価するため、添加剤の異なる 6 種類の潤滑油を準備した。各潤滑油のスクイズ効果を排除して境界潤滑特性の差を明確にするため、潤滑油はヘキサンで希釈後に金型表面へ塗布し、ヘキサン揮発後の初期潤滑膜厚が $1\mu\text{m}$ となるようにした。

摩擦係数の推定に用いるノモグラフの作成には、塑性加工用の汎用 CAE ソフトである DEFORM(SFTC 社製)を用いた。解析は二次元軸対称モデルにより行い、金型(要素数 5,000)は弾性体、供試体であるリング(要素数 5,000)は弾塑性体として取り扱った。

*1 産業技術センター 金属材料室 *2 産業技術センター 金属材料室 (現産業振興課)

表 1 リング圧縮試験に用いた潤滑油

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
パラфин	パラфин オレイン酸	パラфин 塩素化パラфин	パラфин リン酸エステル	パラфин 硫化油脂(活性)	パラфин 硫化油脂(非活性)	
密度(g/cm ³)	0.878	0.881	0.913	0.881	0.886	0.883
動粘度(mm ² /s)	102	79.1	102	109	116	116

3. 実験結果及び考察

作成したノモグラフおよびリング圧縮試験の結果を図1に示す。なお、リング圧縮試験は各条件につき2回実施しており、図1の結果はそれぞれの平均値である。潤滑油中の添加剤の種類により摩擦係数が異なり、多くの添加剤でベースオイルであるパラфин単体に比べて摩擦係数は低下した。中でも、オレイン酸を添加したNo.2は、金属表面に高い吸着性を持ち、潤滑状態が早期に安定することで、圧縮率40%までは最も低い摩擦係数を示した。一方、極圧剤を添加したNo.3~6の中には、圧縮率50%時にオレイン酸を上回る摩擦低減効果を示す例もみられ、極圧剤の効果が発現し始めた可能性がある。ただし、塩素化パラфинを添加したNo.3では、全体を通じてパラфин単体とほとんど変わらなかった。この要因として、リング圧縮試験における表面積拡大率が2程度と小さいことから、極圧剤の効果が十分に発現しにくかったことが挙げられる。

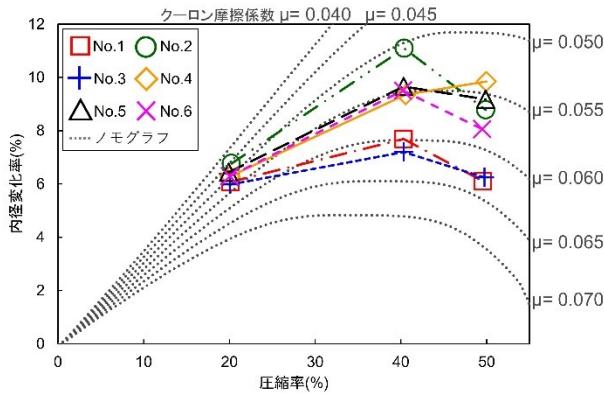


図1 ノモグラフおよびリング圧縮試験結果

リング圧縮試験では、圧縮率にかかわらず摩擦係数が一定であることを前提としており、実験結果はノモグラフ上の単一の曲線に沿ってプロットされるはずである。しかしながら、境界潤滑条件下における本実験では、摩擦係数は圧縮率に対して一定ではなく、圧縮率の増加に伴い上昇する傾向が確認された。この傾向は、圧縮により供試体表面積が拡大し、それに伴って境界潤滑膜が破壊されたことによると考えられる。さらに、図2に示すように圧縮後の供試体には外周部に金属光沢が現れ、金型との焼付きが生じていた。焼付きは圧縮面の表面積拡大に対する大きな抵抗となり、摩擦係数の上昇に影響していると推察される。以上の結果から、加工面内における

摩擦係数は一様ではなく、リング圧縮試験で得られる平均摩擦係数では潤滑状態を十分に表現できていないことがわかる。したがって、今後のCAE解析精度の向上には、潤滑状態の変化を反映可能な摩擦モデルの導入が不可欠であり、前川らによるモデルの適用可能性について、今後さらなる検証が必要である。

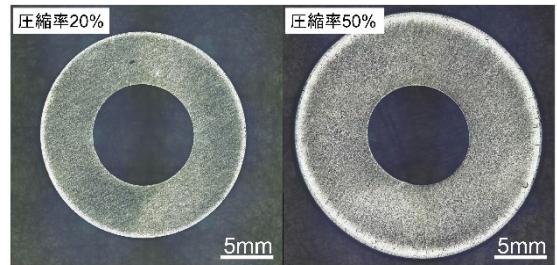


図2 潤滑油 No.1 を用いて圧縮したリング

4. 結び

本研究の結果は、以下のとおりである。

- (1) 境界潤滑条件下におけるリング圧縮試験の結果、添加剤の種類により摩擦係数は異なり、オレイン酸は加工初期に安定した潤滑膜を形成して効果を発揮し、極圧剤の効果は加工後半で発現し始めた。
- (2) 圧縮率の増加に伴い摩擦係数が上昇する傾向が確認され、加工中の潤滑膜の破壊や金型との焼付きの発生が、潤滑状態の不均一性として現れることが明らかとなった。これにより、リング圧縮試験で得られる平均摩擦係数だけでは、実際の潤滑挙動を十分に評価することが困難であることが示された。
- (3) 潤滑状態の変化を的確に反映するためには、加工進行に応じた摩擦挙動を動的に表現できるモデルの導入が重要である。特に、前川らが提案した表面積拡大率に基づく摩擦モデルの適用性については、今後より詳細に検証していく必要がある。

付記

本研究は、「知の拠点あいち重点研究プロジェクトIV期」で行った研究の一部である。

文献

- 1) 久能木真人: 科学研究所報告, 30(2), 63-92(1954)
- 2) 前川覚, 小嶋裕, 劉曉旭, 糸魚川文広: トライボロジ 一 会議 2024 秋名護 予稿集