



# 岐阜大学機関リポジトリ

Gifu University Institutional Repository

冷間鍛造におけるリン酸亜鉛潤滑被膜のトライボ特性の温度依存性

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2019-06-27 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 加田, 修 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12099/77932">http://hdl.handle.net/20.500.12099/77932</a>

氏名 (本籍)	加田 修 (千葉県)
学位の種類	博士 (工学)
学位授与番号	甲第545号
学位授与日付	平成31年3月25日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	冷間鍛造におけるリン酸亜鉛潤滑被膜のトライボ特性の温度依存性 (Temperature dependence of tribo-performance of zinc phosphate coating in cold forging)
学位論文審査委員	(主査) 教授 山下 実 (副査) 教授 王 志剛 准教授 吉田 佳典

### 論文内容の要旨

冷間鍛造は切削加工と比較して、低コストで部品を製造可能な方法であり、自動車部品をはじめとする部品製造に広く用いられている。自動車業界においては、近年の地球環境対応の観点から、強度の高い鉄鋼材料を素材として用い、複雑な部品形状へ鍛造する技術が必要とされている。強度の高い鉄鋼材料を複雑形状部品に冷間鍛造する場合、材料強度が高くなること、塑性ひずみ量が大きくなることから、金型の接触圧力や金型と鋼材間の界面温度は高くなる。したがって、金型破損や焼付きなどが生じやすくなるため、ピレット表面に処理された潤滑剤の果たすべき役割は大きい。

冷間鍛造に用いられる潤滑剤としては、近年、環境負荷の小さなものへのニーズが高く、1液型や2液2層型など、多くの潤滑剤が開発されているが、特に耐焼付き能に関しては、従来から冷間鍛造用潤滑剤として多く用いられているリン酸亜鉛潤滑被膜には及ばず、高強度材の冷間鍛造を成立させる上で、その潤滑性能を的確に把握しておくことが重要となる。

また鍛造工程設計に際しては、有限要素法による変形解析を活用して材料流動や工具負荷などを定量的に予測することが一般的となっている。リン酸亜鉛潤滑被膜の摩擦特性には温度依存性が有ることが知られており、成形中の被加工材の温度変化を考慮した解析を行い、界面温度に応じて摩擦特性を変化させた解析を行うことが必要となる。

本研究では、冷間鍛造用潤滑剤の耐焼付き能を簡便に評価可能な方法を提案するとともに、冷間鍛造用潤滑剤として広く用いられているリン酸亜鉛潤滑被膜の潤滑特性を明らかにする。そして温度変化を考慮した冷間鍛造解析を行うために必要なデータを取得し、冷間鍛造解析の高精度化を図ることで、冷間鍛造品の高強度化、複雑形状化に寄与することを目的とする。

まず鍛造用潤滑剤の耐焼付き能の評価法として、鍛造の代表的な加工法である後方押しにおける鍛造荷重によって焼付き限界を検知する手法を検討した。焼付きが生じた場合の押し荷重-ストローク線図には荷重が急増する現象が見られた。押しカップ内面の焼付き状況と押し荷重の対応関係を評価し、押し荷重の増加開始点と焼付き開始位置が対応していることを確認した。これを利用して、1回の実験を行うだけで焼付きが生じる限界押し深さを求められる評価法を提案した。またこの評価法により、リン酸亜鉛潤滑被膜を構成するリン酸亜鉛層、金属石けん層、未反応石けん層のうち、リン酸亜鉛層が耐焼付き能を担保すること、リン酸亜鉛重量の多い方が耐焼付き能に優れることを明らかにした。

次に、押しと摩擦試験を組み合わせた潤滑剤の摩擦特性評価法を検討した。押しにより広範囲にリン酸塩潤滑被膜の残存膜厚を変化させ、摩擦係数に及ぼす残留被膜膜厚、界面温度、金型粗さ、接触面圧、すべり速度の影響を評価した。摩擦係数には界面温度と金型粗さの影響が大きく、残留被膜膜厚や接触面圧、すべり速度の影響は小さいことを明らかにし、摩擦係数を残留被膜膜厚、界面温度、金型粗さの関数で定式化した。

成形中の被加工材の温度変化を考慮した、熱連成の冷間鍛造解析を実施するため、解析に必要なデータについて検討した。素材の流動応力については、異なる初期温度での圧縮試験を行い、実験で得られる見かけの流動応力に含まれる、温度変化の影響、摩擦力の影響を有限要素法解析により定量化し、仮想的な一定温度下における等温流動応力を算出する方法を検討し、流動応力の温度依存性を定式化した。次に、金型と被加工材間の熱伝達係数については、後方押し時のパンチ内部温度を熱電対により実測し、有限要素法解析で熱伝達係数を種々変更して求めた較正曲線と対比することにより、冷間鍛造温度域における熱伝達係数を同定した。

上記で検討した摩擦係数の温度依存性、流動応力の温度依存性、金型と被加工材の熱伝達係数を有限要素法解析に組み込み、鍛造中の温度変化を考慮した冷間鍛造解析を行い、その有用性の検証を行

った。速度を変更した圧縮試験に対しては、圧縮荷重を良い精度で予測した。金型温度を変更したリング圧縮試験に対しては、摩擦係数によって大きく影響を受ける内径変化比を精度良く予測した。後方押し出し試験に対しては、押し出し定常荷重を良い精度で予測した。

本研究によって明らかにしたリン酸塩潤滑被膜の摩擦性能を十分考慮し、成形中の温度変化を考慮した冷間鍛造解析を活用することにより、高強度材を用いた複雑形状部品の冷間鍛造成形を効率的に実現することが可能となる。

### 論文審査結果の要旨

本論文は、冷間鍛造の数値解析の高精度化を目指すものである。冷間鍛造の解析精度を上げるために、冷間鍛造における被加工材の温度上昇による被加工材と金型との接触界面の摩擦、伝熱挙動の変化および被加工材の流動応力の変化について研究されている。本論文で取り上げた数値解析精度に及ぼす入力データの温度依存性の影響は、冷間鍛造分野の懸案事項であり、その解明が望まれている。これまでの冷間鍛造解析においては、被加工材の静的流動応力を用いて解析を行い、接触界面の摩擦特性を実験結果に合うように変更する手法が一般的であった。この手法は解析精度の保証ができないなどの問題点を有する。そこで本研究では、冷間鍛造の数値解析に必要な入力データである摩擦特性、伝熱特性および被加工材の流動応力の温度依存性をそれぞれに独立に測定する手法を開発し、得られたデータを用いて熱連成変形解析を行い、鍛造実験結果との対比によって解析精度の検証を行った。

まず冷間鍛造用潤滑剤のスタンダードであるリン酸亜鉛潤滑被膜の摩擦特性の温度依存性を押し出しと摩擦試験を組み合わせた独自の試験法を用いて明らかにした。押し出しにより広範囲にリン酸塩潤滑被膜の残存膜厚を変化させ、摩擦係数に及ぼす残留被膜膜厚、界面温度、金型粗さ、接触面圧、すべり速度の影響を評価した結果、摩擦係数を界面温度、金型粗さの関数で定式化した。また、リン酸亜鉛潤滑被膜の耐焼付き能の簡便な評価法として、後方押し出しにおける鍛造荷重によって焼付き限界を検知する手法を提案し、リン酸亜鉛潤滑被膜を構成するリン酸亜鉛層、金属石けん層、未反応石けん層のうち、リン酸亜鉛層が耐焼付き能を担保することを明らかにした。

次に、異なる初期温度の被加工材の圧縮試験を行い、実験で得られる見かけの流動応力に含まれる、温度変化の影響、摩擦力の影響を有限要素法解析により定量化し、仮想的な一定温度下における等温流動応力を算出する方法を検討し、被加工材の流動応力の温度依存性を定式化した。また、後方押し出し時のパンチ内部温度を熱電対により実測し、数値解析で熱伝達係数を種々変更して求めた較正曲線と対比することにより、冷間鍛造温度域における熱伝達係数を同定した。

さらに、得られた摩擦係数の温度依存性、流動応力の温度依存性、金型と被加工材の熱伝達係数を有限要素法解析に組み込み、鍛造中の温度変化を考慮した冷間鍛造解析を行い、その有用性の検証を行った。加工速度を変更した圧縮試験、金型温度を変更したリング圧縮試験および後方押し出し試験の何れにおいても、加工特性を良い精度で予測することに成功した。本研究で得られた知見は、冷間鍛造分野の数値解析技術の進歩に大いに役立つものと思われる。

このように、本論文は斬新な知見を数多く見出しており、独創性、新規性、有用性の点で極めて優れていると評価できることから、学位審査委員会は、この論文を学位論文に値するものと判定した。

### 最終試験結果の要旨

学位審査委員会は、提出論文の基礎となる発表論文（査読付き論文2編）の内容を確認し、平成31年2月8日に開催された学位論文公聴会における論文提出者との質疑応答と口頭試問などに基づいて審査を行い、最終試験に合格と判定した。

---

発表論文（論文名、著者、掲載誌名、巻号、ページ）

1. Lubricating performance of residual zinc phosphate coating on forged specimen in Bowden-Leben sliding test (O. Kada, Z.G. Wang), Key Engineering Materials, 767 (2018), pp.124-130.
2. 円筒後方押し出しによるリン酸塩潤滑被膜の耐焼付き能評価 (加田修, 王志剛, 宮西慶, 柳秀和, 野瀬由香里), 塑性と加工, 60-696 (2019), pp.8-12.