

氏名	サワムラ マサトシ 澤村 政敏
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博第317号
学位授与の日付	2024年3月31日
学位授与の条件	学位規則第4条第2項該当 論文博士
学位論文題目	冷間鍛造および温・熱間鍛造における摩擦係数と型表面温度の測定に関する研究 (Study on Measurement of Friction Coefficient and Die Surface Temperature in Cold Forging and Warm/Hot Forging)
論文審査委員	主査 教授 糸魚川 文広 教授 北村 憲彦 准教授 湯川 伸樹 (名古屋大学)

## 論文内容の要旨

自動車の車体を構成する足回り部品、エンジン部品、駆動部品など、強度が必要な部品は、型を用いて高面圧下で素材を変形させて成形する「鍛造」で成形されている。鍛造型には高い面圧が生じるため、型割れや型摩耗などの型損傷が実生産時にしばしば発生する。そこで、鍛造工程の設計段階でCAE解析を行い、成形品に割れや形状不良がなく、型割れ、型摩耗などの型損傷が抑えられる型設計を行っている。しかし、材料流動や型損傷に影響する金型への機械的負荷(面圧, 摩擦抵抗(面圧×摩擦係数)), 熱的負荷(型温)を精度よく算出することは未だ難しい。それは、CAE解析に必要な変形抵抗, 摩擦係数, 熱伝熱係数などの物性値が実際の鍛造状態とは異なることが主要因と考えられる。特に摩擦係数は材料流れや摩擦発熱による型表面温度上昇に影響するため重要である。その摩擦係数に強く影響する潤滑剤は、材料流動の促進、型損傷の抑制に重要な鍛造条件の1つである。

本研究では、成形対象とする強度部品(コンロッド, 等速ジョイントなど)を型内で鍛造する際の、素材と型との間で発生する摩擦の厳しさを再現した摩擦条件下において、摩擦の定量評価値である摩擦係数の実測と、摩擦の評価には重要な情報である型表面温度を型内部温度の実測値から推定可能な、摩擦の厳しさが異なる3種類の摩擦試験法を提案した。摩擦係数は上型を回転させながら押し込むことにより得られるトルクと荷重から求めた。

それらの摩擦試験法を用いて、素材温度、型温度、潤滑剤の種類、素材の表面積拡大比などの摩擦条件が摩擦係数や型表面温度に及ぼす影響を定量的に評価、考察した。

第1章では、鋼の鍛造における摩擦評価の重要性および今までに提案された摩擦試験法を示した。そして、摩擦評価の考え方と摩擦を評価する試験法に必要な条件を示した。

第2章では、実際の塑性加工に近い多数回の間欠・繰り返し摩擦条件の下において、回転円筒押し込み形の摩擦試験により、冷間・温間加工域での繰り返し摩擦に伴う冷間鍛造油剤や型材による摩擦状態変化、型温上昇に及ぼす潤滑剤・冷却条件の影響、及び型表面損傷(焼付き、軟化)の違いを、摩擦係数の変化などから明瞭に捕らえることができた。

第3章、第4章では、コンロッドなどの比較的摩擦条件としては厳しくない部品の鍛造を想定とした、回転リング圧縮形の摩擦試験法を提案し、冷間鍛造温度域(第3章)、温・熱間鍛造温度域(第4章)において、代表的な鍛造用潤滑剤を用いた時の摩擦係数と型表面温度の測定を行った。その結果、冷間鍛造用潤滑剤の摩擦係数は型表面温度によって大きく変化すること、熱間鍛造用潤滑剤の摩擦係数には試験片初期温度、型表面温度、潤滑剤の燃焼温度、試験片酸化膜が強く影響することを定量的に明らかにした。

第5章、第6章、第7章では、等速ジョイントなどの比較的摩擦条件が厳しい部品の鍛造を想定とした、回転後方せん孔形の摩擦試験法を提案し、冷間鍛造温度域(第5章)、温・熱間鍛造温度域(第6章、第7章)において、代表的な鍛造用潤滑剤を用いた時の摩擦係数と型表面温度の測定を行った。その結果、環境に優しい冷間鍛造用潤滑剤である1液潤滑剤は従来のボンデ潤滑剤よりも摩擦係数が大きいことを定量的に明らかにした。また、温・熱間鍛造用潤滑剤の摩擦係数には、ビレットコーティング剤、潤滑剤スプレー圧力、ビレット初期温度が影響することを定量的に明らかにした。さらに、リング圧縮形の試験結果(第3章、第4章)と比較することにより、鍛造条件と型表面温度や摩擦係数の関係を総合的に考察した結果(第7章)、冷間、温・熱間鍛造によらず、摩擦係数には試験開始から終了までの間における潤滑剤の最高到達温度の影響が支配的であることを明らかにした。

本研究において提案した摩擦の厳しさが異なる3種類の摩擦試験法を用いることにより、成形対象とする強度部品を鍛造する際の、素材と型との間で発生する摩擦の厳しさを再現した摩擦条件下における正確な摩擦係数が得られる。すなわち、鍛造における代表的な成形様式である据え込み成形、押し出し成形での冷間、温・熱間鍛造温度域ごとの最適な潤滑剤の選定が可能となる。その選定された潤滑剤を実生産に採用することにより、型損傷が抑制され、成形品コストに影響する型寿命の向上に寄与できる。また、得られた正確な摩擦係数を鍛造工程設計段階でのCAE解析に用いることにより、CAE解析精度の向上に寄与できる。CAE解析精度の向上により、型への機械的負荷、熱的負荷が小さく、型寿命が長い最適な鍛造工程設計が可能となる。さらに、提案した摩擦試験法を活用することにより、環境に優しい高性能な潤滑剤の開発に寄与する。

## 論文審査結果の要旨

鋼の鍛造は強度や信頼性の必要な輸送機器、特に自動車で多く利用される加工法である。形状や大きさも多種多様で、材料の温度範囲も広く、室温から1200℃に及ぶ。鍛造では生産効率よく大量に精度の高い製品が量産できる。それだけに高圧、高温、繰り返すすべり距離による金型へのトライボロジー（潤滑・摩擦・摩耗の科学と技術分野）的な負荷は非常に高い。高価で作製に時間を要する型の寿命延長は長年の課題である。

澤村政敏氏は、長年にわたり鍛造の型寿命やトライボロジー負荷の評価の研究に従事した。この分野で型と変形する材料との間の摩擦と熱移動については、シミュレーション解析が盛んである。しかし、物理的な実測が困難であるため、摩擦係数や型表面温度を特定された例がほとんどなかった。澤村氏の一連の研究によって、鍛造で問題となる温度域として、冷間、温間、熱間を網羅する貴重なデータが整理された。

第1章では、以上のような本研究の背景と必要性、目的を示している。第2章では実機の鍛造に近い繰り返し鍛造で、冷間と温間での摩擦係数測定と型負荷への影響を明らかにした。鍛造は主に変形については、据込み鍛造と押出し鍛造に大分類される。第3章、4章では据込み鍛造について、回転リング圧摩擦試験法を考案し、それぞれ冷間や温熱間領域での摩擦係数の変化を調べ、その原因についても潤滑剤の機械的な物性変化と対応して考察している。第5章～7章にかけて、押出し鍛造については回転後方せん孔形摩擦試験機を製作し、冷間・温間・熱間のそれぞれで特徴的な現象とともに定量的に摩擦係数および型表面温度を測定できた。これらは、この分野では初めての成果で、シミュレーションなどの検証にも有用で、今後の他の研究者への影響も大きい。また、それぞれの実験で得られた潤滑剤の挙動、潤滑条件の影響についても言及しており、最適な潤滑方法なども検討されている。学術的に摩擦や温度の実測やそのための方法の開発だけでなく、実務的にも参考になる情報も得られている。

これらの成果は、現在盛んにおこなわれているコンピューターを活用した設計でも活用され、予想精度を上げることが、結果として金型の改良、開発、加工方法の開発などにも貢献しうると言える。これからは益々、コンピューターを活用したシミュレーション技術が有効に使われることは間違いない。その結果の確からしさや入力のための正確な境界条件の提供という観点からも、今の時代に必要な貴重な成果と言える。実務で自らの手と頭で考えた経験は、後進への指導などでも役立ち、大いに期待できる。

以上のことから、当審査委員会は一致して、澤村政敏氏の論文審査及び学力の確認の結果を合するとともに、同氏への博士（工学）の学位授与を可とすることが適当であるとの結論に至った。