

氏名	オオハタ タカアキ <b>大島 崇昭</b>
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博第1315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1項該当 課程博士
学位論文題目	高強度鋼の冷間据込みにおける荷重低減と高平面精度化に関する研究 (Study on Reduction in Load and Improvement of Flatness Accuracy in Cold Upsetting of High-strength Steel)
論文審査委員	主査 教授 北村 憲彦 教授 糸魚川 文広 准教授 湯川 伸樹 (名古屋大学)

## 論文内容の要旨

近年、自動車の軽量化や信頼性向上のため高強度鋼の鍛造部品が求められている。これまで高強度鋼の鍛造品は、変形抵抗を下げ鍛造性を向上させるために材料を加熱する温熱間鍛造で造られることが多かった。しかし地球規模での環境対応として材料を積極的に加熱しない冷間鍛造で加工するニーズがある。さらに、環境対応の観点から加工時には潤滑剤の量を減らすことが求められている。

これらのニーズから無潤滑に近い条件で高強度鋼を冷間で鍛造加工すると、高面圧で高摩擦となり工具寿命や製品の寸法精度が低下することが予測される。しかしながら、このような高面圧で高摩擦となるような過酷な条件下における加工条件に関する先行研究はほとんどなく有識者の経験や知識に基づいてトライ&エラーを繰り返しているのが現状である。そこで本研究では、高強度鋼の冷間鍛造製品で多用され、比較的潤滑剤の影響を受けにくい据込み加工に着目し、無潤滑下の高強度鋼を低荷重で据え込む、あるいは高い平面精度の製品を得るための加工条件について検討する。

本論文は全5章から構成され、第1章では鉄鋼材料の冷間鍛造における技術の発展と近年のニーズについて述べる。そして近年のニーズである高強度鋼の冷間鍛造における課題を整理し、本研究の目的および論文構成を示す。

第2章では、工具の弾性変形が据込み荷重に及ぼす影響について実験とFEM解析を用いて検討した。実験では、無潤滑下の高強度鋼を高圧縮すると工具の弾性変形による局所的な凹みにより高圧縮時における据込み荷重が上昇することを示した。さらにFEM解析では、工具の弾性的な凹みにより材料の自由な流動が妨げられ、材料内部の静水圧応力が高まることを示した。そして、工具と材料間の摩擦係数が高いほど工具の弾性的な凹みによる荷重の上昇が助長されることを示した。加えて、高ヤング率な型材の使用は高い平面精度の製品が得られるだけでなく、工具の弾性的な凹みによる荷重上昇の抑制にも有用であることを述べた。

第3章では、無潤滑下の高強度鋼を高圧縮する際の据込み荷重をより正確に予測するため、工具と材料間の摩擦係数をリング圧縮試験により推定した。高摩擦時には形状比3:1:1のリング試験片を用いることが提案されているが高圧縮時にはリング内径が極めて小さくなり、圧縮率が50%に達すると穴が完全に閉じるため6:3:2のリング試験片を用い摩擦係数の推定を行った。実験結果は、圧縮の途中で摩擦係数一定と仮定した較正曲線から外れ、摩擦が増大する傾向が見られた。そこで、摩擦係数一定の較正曲線から実験結果が外れた時点での工具や材料の形状を初期モデルとして摩擦係数を切り替えたFEM解析を行い、較正曲線を修正することで高圧縮時における摩擦係数を推定した。工具の表面処理によりブラウリングが生じるような激しい凝着に至らない実用的な範囲では、摩擦係数が増加し続けることはなく、1段階あるいは2段階に摩擦する変化として推定できた。そしてこの方法で推定した摩擦係数を用い、円柱の据込み荷重をFEM解析で予測した結果は実験結果とよく一致しており、無潤滑下で高強度鋼を高圧縮する際の荷重をより正確に予測できた。

第4章では、無潤滑下での高強度鋼の冷間据込みにおいて低荷重で加工する、あるいは高い平面精度の製品を得るための条件として、経済的な工具鋼製の凸面工具による最適な工具加圧面形状を簡便に推定する方法を提案した。具体的には、従来のスラブ法と等分布圧力を受ける半無限体の弾性変位の理論式から与えられる荷重と製品端面の凹凸量をFEM解析から求めた補正係数のノモグラムを用い補正することで圧縮中の工具加圧面形状の影響を考慮した荷重と製品の平面度を簡易に予測した。さらに、高圧縮時における荷重の上昇や平面精度の悪化に繋がる工具加圧面の弾性的な凹みを相殺する最適な円錐状工具の初期傾斜角を簡便に推定した。また、工具材質や製品寸法に対する工具寸法の大きさが本章で求めた各補正係数に与える影響を考察した。冷間鍛造において高面圧下で使用される工具材質や経済的で実用的な工具寸法では工具の弾性的な凹みが軽減される。そのため、本章で示した各補正係数のノモグラムは実用的な範囲における据込み荷重や製品の平面精度を簡便に推定できることを述べた。

最後に、第5章は総括であり各章で得られた結果をまとめている。

## 論文審査結果の要旨

当審査委員会は、大畠崇昭氏の学位授与に関し、提出された博士論文、論文目録、論文内容の要旨などの書類について審査するとともに、学力の確認を行い、以下の結論を得た：

自動車の軽量化や信頼性向上を目的に、高強度鋼の鍛造部品へのニーズの高まり、さらにそれを冷間成形できる範囲を広げて加熱エネルギーの低減や潤滑油を減らして環境負荷の低減に生産方法が大きくシフトしつつある。大畠崇昭氏は、このような現状の中で、冷間鍛造の最も基本的な据込み加工において、無潤滑に近い条件で、高強度鋼の一種である軸受鋼を対象に、高い平面精度かつ低荷重に成形することを目標に研究に取り組み、研究成果を全5章からなる学位論文にまとめた。

第1章では鉄鋼材料の冷間鍛造における技術の発展と近年のニーズについて述べる。そして近年のニーズである高強度鋼の冷間鍛造における課題を整理し、本研究の目的および論文構成を示す。

第2章では、工具の弾性変形が据込み荷重に及ぼす影響について実験とFEM解析を用いて検討した。無潤滑下の高強度鋼を高圧縮すると工具の弾性変形による局所的な凹みが据込み荷重の上昇を助長することが分かり、またこの弾性的な凹みが材料流動を阻害し、材料内部の静水圧応力を高め荷重を急増させることを明らかにした。これは無潤滑のような高い摩擦条件はこの荷重の急増をさらに助長させた。

第3章では、この時の摩擦係数の変化（増加）をより高精度なリング圧縮試験を工夫した。従来の方法では、摩擦係数一定で計算されたノモグラフを用いるが、圧縮中に摩擦係数が上昇することを考慮できるような再計算を繰り返す手法を組み入れ、実現象を参照できる新たなノモグラフを作成した。これによって、より実際的な摩擦係数を把握することができるようにした。

第4章では、荷重低減のためのアイデアとして材料流動を促進できるような少し凸面で据込む工具を提案する。その効果を実験と計算で確かめた。この工具が簡易に設計できるように、型の弾性変形も考慮できる推定法を整理した。その方法で設計した工具で荷重が低減されることも実験的に実証した。さらに、これと同時に実用上に許容される範囲の高い平面精度となる工具形状を提案した。

第5章に以上を総括している。

このように大畠崇昭氏は、今後に必要な高まりと予想される新しい冷間鍛造を省エネルギーで高精度に実現するための設計方法を考案し、それをこの論文に集約し、まとめている。かつては不可能と思えた高強度鋼の無潤滑冷間鍛造の分野に対して、工学的に粘り強く挑んだ資質は、研究者として今後も大いに期待できる。

以上のことから、当審査委員会は一致して、大畠崇昭氏の論文審査及び学力の確認の結果を合とするとともに、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。