

鍛造シミュレーションに基づく評価手法に関する研究

高橋 和仁 (情報・生産技術部設計試作グループ)

前野 智美 (横浜国立大学)

大橋 健人 (横浜国立大学)

1. はじめに

近年、中小製造業では、多品種少量生産への対応や開発期間の短縮、試作回数の削減が求められており、設計開発の効率化が重要な課題となっている。一方で冷間鍛造は高精度かつ高生産性な加工法であるが、高荷重条件や複雑形状への対応が必要であり、金型設計や加工条件の決定には経験やノウハウへの依存が大きい。そのため、CAEを活用した鍛造シミュレーションが利用されているが、成形荷重、金型応力、型充填率、成形性などの解析結果を総合的かつ定量的に評価する手法は十分に確立されていない。

本研究では、中小企業への適用を見据え、鍛造CAE解析で得られる工程データを活用し、品質工学の考え方を導入した鍛造加工の評価手法の構築および検証を目的とした。具体的には、鍛造工程の解析結果を統計的に処理して加工工程を定量評価する評価システムを構築する。また、トライボシミュレータを用いて摩擦状態を把握し、実際に即した評価の実現を目指した。これにより、鍛造設計の高度化および効率化を図る。

2. 研究内容及び結果

2.1 鍛造シミュレーションの評価手法の構築

図1に示すように、本研究ではCAE解析で得られる鍛造加工データを活用し、加工の良否を定量的に評価する鍛造シミュレーション評価手法を構築した。まず①CAE鍛造解析により、成形荷重、表面拡大率、金型応力、型充填率および成形形状データを取得した。次に②評価指標算出部において、各評価項目に対して統計処理を行うとともに、加工条件の変動に対する安定性およびロバスト性を考慮し、品質工学に基づくSN比を用いて定量指標化した。さらに、トライボシミュレータを用いて摩擦係数や摩擦状態を評価し、その結果を摩擦特性として評価に組み込む。③総合評価部では、各評価項目のSN比および摩擦特性を

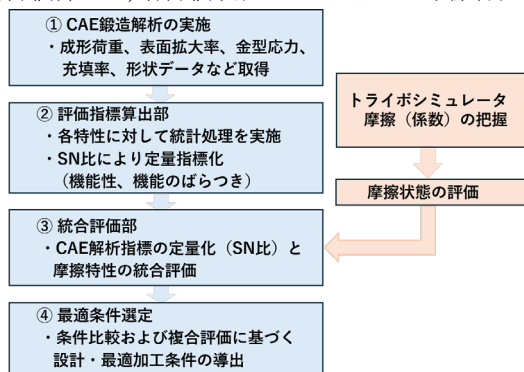


図1 鍛造シミュレーションの評価フロー

総合的に評価し、④最適条件選定部では条件比較に基づき最適な設計条件および加工条件を選定できる評価システムの構築を行った。

前方押し出しのケースとして、図2にCase AおよびCase Bの解析結果の比較評価を示す。荷重特性(仕事量)のSN比 η_F はCase AがCase Bより約4.0 dB高く、荷重変動に対するロバスト性の向上が確認された。また、金型最大主応力のSN比 η_{σ_1} は約23.1 dB高く、金型応力に対するロバスト性が大幅に向上する条件であることが確認された。一方、形状精度のSN比 η_s は約0.7 dB低かったが、その差は小さい。Case Aは形状精度をほぼ維持しながら、成形荷重および金型応力のロバスト性を向上できる条件であることが確認された。

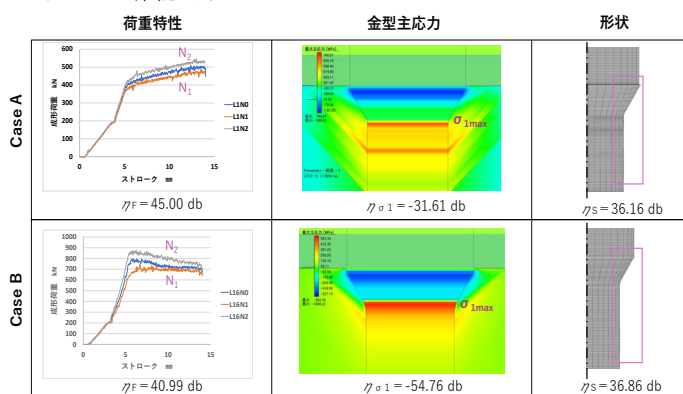


図2 鍛造解析の評価解析結果

設計適正化に向けた検討として、図3に示す前方押し出しモデルに対し、仕事量を評価特性としたSN比によるパラメータ設計を適用した。仕事量は成形荷重-変位線図の面積から算出される加工エネルギーであり、鍛造機能を表す指標として評価した。また、成形性については品質特性として捉え、寸法精度を望目特性のSN比により評価した。誤差因子には摩擦、温度およびクランク速度の±10%変動を設定し、制御因子には金型材料、金型形状および摩擦係数等を割り付けた。

その結果、仕事量のSN比は初期条件44.51 dBに対し最適条件51.02 dBとなり、利得6.51 dBが得られた。確認実験との差は1.71 dBであり、解析結果の再現性を確認した。また、金型最大主応力のSN比は約27 dB高く、金型負荷に対するロバスト性の高い条件が選定された。さらに、縮径部の寸法精度SN比は初期条件58.90 dB、最適条件59.93 dBとなり、寸法ばらつきの小さい条件が選定された。

以上より、本手法により加工性能とロバスト性を定量評価し、複数の設計条件を比較しながら最適条件を効率的に

選定できることを示した。一方、本結果は解析モデルに基づく最適化結果であるため、実機工程データとの比較による妥当性検証が重要であり、現在その一致性評価を進める。

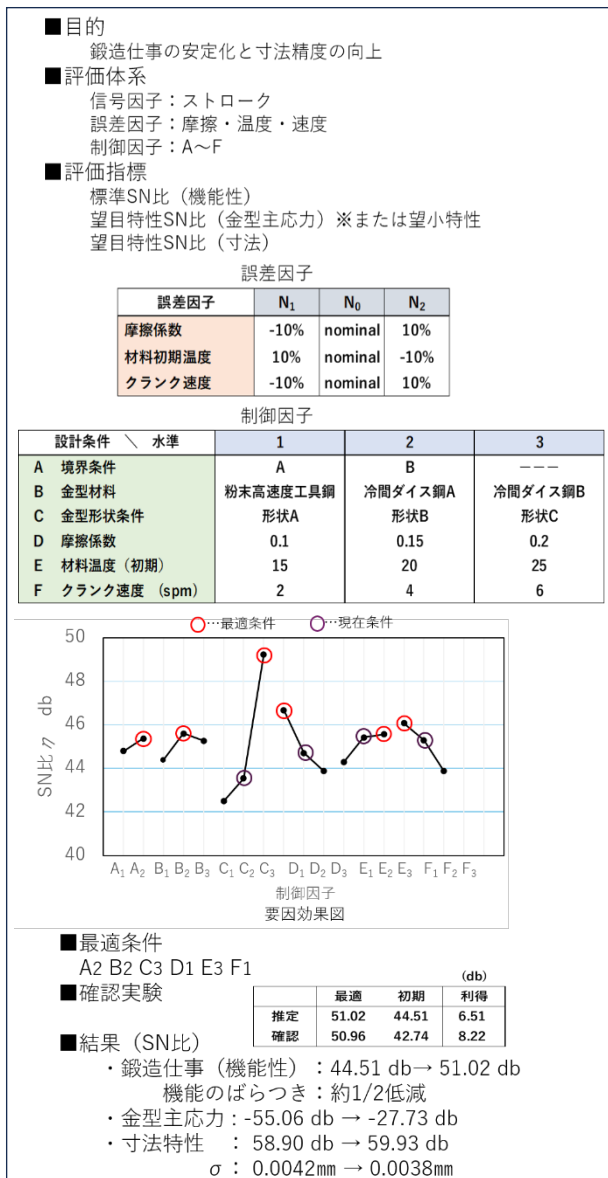


図3 鍛造設計・成形条件の最適化

2.2 スパイクテストによるトライボシミュレータの開発

鍛造解析の評価精度に大きく影響する摩擦状態の把握を目的として、スパイクテストに基づくトライボシミュレータを構築した。スパイクテストは、面圧および表面拡大率が実際の鍛造条件に近く、かつ一般的な変形状態が得られる試験手法である。図4に示すように、スパイクテストのシミュレーションを実施し、試験用金型を含めたトライボ試験条件の設計適正化を行い、実機試験を実施した。図5に示す解析結果と実験結果を対応付けたノモグラフを用いることで、摩擦係数の推定を行った。その結果、未知材料に対しても摩擦係数を推定可能となり、実際の鍛造における摩擦状態を定量的に把握できることを確認した。さらに、図6に示すように、非正常摩

擦係数を考慮した評価にも対応可能とした。これにより、シミュレーションに実際の摩擦挙動を反映させることが可能となり、スパイクテストに基づく実験結果と解析結果を統合的に比較することで、より包括的な摩擦状態の評価が可能となった。

【トライボシミュレータ】
スパイクテストのシミュレーションと試験

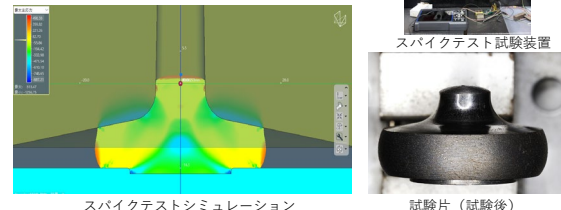


図4 スパイクテストのシミュレーションと試験

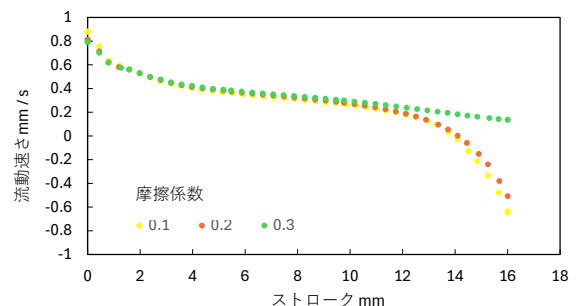


図5 平均摩擦係数のノモグラフ

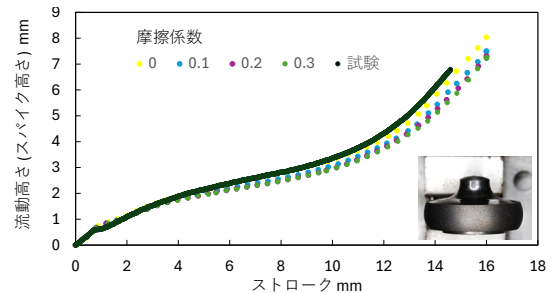


図6 非正常摩擦係数のノモグラフ

3. 考察及び今後の展開

本研究で構築したSN比による評価手法は、鍛造加工における複数の評価項目を定量的かつ統合的に評価でき、CAE解析と連携することで設計段階における加工条件の事前評価および最適化に活用できる。これにより、試作回数の削減、設計期間の短縮、開発コストの低減および生産性向上が期待される。

また、本手法を中小企業向けの設計支援ツールとして展開することで、設計判断の定量化・標準化による品質の安定化や技術継承への活用が期待される。さらに、トライボシミュレータによる摩擦状態の定量評価を組み合わせることで解析精度の向上が図られ、より信頼性の高い設計支援技術としての展開が期待される。

【謝辞】

本研究は、公益財団法人 JKA の 2025 年度機械振興補助事業「公設工業試験研究所等が主体的に取り組む共同研究」の助成を受けて実施した。ここに深く感謝の意を表す。