

## 論文審査の結果の要旨

ものづくり分野の低炭素化から脱炭素化への要請が急速に高まり、今後、製造プロセスにおいてエネルギー効率評価の導入が確実視されている。工場エネルギー管理システムに見られるように、従来からいわゆるグリーン製造の取り組みは推進されてきたものの、多くの場合、消費電力量の「見える化」と、その情報により統制される生産現場での節電活動にとどまるのが実情である。学術面では、グリーン製造の概念論やフレームワークの議論が中心であり、実用的な意思決定モデルの構築や方法論の確立が課題である。また、今後加速するであろう工場の省人化・自動化を実現する上で、グリーン製造のシステム技術の開発が肝要である。

学位申請者の研究では、特に生産システムの中核をなす工作機械に注目し、そのエネルギー高効率な運用を実現するための消費電力予測モデルの構築を目的とする。その端緒として、電力エネルギー（消費エネルギー）を考慮した生産計画としてのエネルギー負荷計画を立案し、システム運用の視点から供給電力の制約下における消費エネルギーと生産性の関係を明らかにし、消費電力モデルの必要性を明らかにした。次に、工作機械に着目し、エネルギー密度（体積比消費エネルギー）と材料除去能率に基づく工作機械の消費電力モデルを提唱し、多様な切削実験および計測実験を通じて、その予測精度の良さと実用性および汎化性を示した。これらの研究は、次のとおり要約できる。

まず、エネルギー負荷計画のモデリングにあたって、新たに作業の処理モードを導入し、生産システム内のエネルギー消費状況に合わせて処理モードを選択することで、生産性の維持とエネルギーの有効利用を図ることを考えた。このような複数の処理モードを考慮したエネルギー負荷計画問題を、マルチモード及び資源制約付きプロジェクトスケジューリング問題の枠組みで数理的に定式化した。複数台のマシニングセンターで構成される自動化生産システムを想定し、切削実験および消費電力測定実験に基づく処理モードの設定と、エネルギー負荷計画の最適化シミュレーションを通じて、ピーク電力制約下での平均消費電力量と平均製造リードタイムとのトレードオフを明らかにした。また、本研究を通じて、エネルギー負荷計画生成時での（工作機械の）消費電力予測の重要性を考察した。

次に、工作機械の消費電力予測のためのモデル構築の研究に取り組み、エネルギー密度と材料除去率の相関に基づいて、回帰分析アプローチによる回帰モデルを新たに提案した。二種のマシニングセンタと11種の被削材料の組合せで多種多様な切削実験および消費電力測定実験を実施し、モデルの汎用性を確保するとともに、モデルの予測精度の高さを示している。具体的には、提案モデルによる予測精度は90%から99%の予測精度となり、同じくエネルギー密度に基づいた先行研究による消費電力モデルと比較しても、同等の精度が得られた。さらにモデル構築時に必要になる情報量が少ない場合でも提案モデルは高い予測精度を維持し、ロバスト性においては先行研究に比べて優位な結果も得られている。

上記の消費電力モデルや先行研究によるエネルギー密度に基づく消費電力モデルは、簡易な切削に基づいて構築されている。生産現場での複雑な加工を想定し、送り駆動系での消費電力を考慮した現実的な加工時の消費電力モデルの構築を試みた。この研究では、3軸立形マシニングセンタにおいてよく用いられる X 軸および Y 軸方向の送りに注目し、軸ごと、あるいは2軸を統括した消費電力予測のための回帰モデルを導出した。切削実験を通じて、被削性と予測精度の関連性を新たに見出した。このことから、精緻な消費電力予測を講じる場合、被削材の特性を考慮しなければならないことを示した。

学位申請者の研究では、エネルギー高効率な生産システム運用を意図して、工作機械の実用的な消費電力モデルを構築した。消費電力予測モデルを用いて消費電力プロファイルを生成することで、計測実験の手間を削減でき、時間と消費エネルギーの低減が期待できる。また、エネルギー負荷計画のような、省エネ指向の生産システム運用を可能にする。FEMS のようなエネルギー管理システムでの意思決定の自動化を伴う高度なグリーン化につなげることができるといえる。

以上の研究成果は、査読付学术论文 3 編および査読付国際会議論文 2 編において公表されている。学位申請者の一連の研究は、工作機械のエネルギー高効率利用のための工学的技法として、関連学術分野に新たな知見をもたらすものである。さらに、グリーン製造はもとより、工場の IoT 化に伴うスマート製造の技術開発にも十分資する。よって本論文は、博士（工学）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。