

氏名（本籍）	<small>さむかわ</small> 寒川 <small>てつお</small> 哲夫（大阪府）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	理工博乙第1号
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当者
学位授与の年月日	平成30年3月24日
学位論文題目	エネルギー密度に基づく工作機械の消費電力予測に関する研究
論文審査委員	（主査）教授 諏訪 晴彦 教授 久保 司郎 教授 井上 雅彦

論文の内容の要旨

最終エネルギー消費の約 40%を占めるとされる製造業は、法による規制と経済的コスト、そして企業イメージの向上のために積極的に省エネに取り組んできた。地域レベルで企業群が連携する産業共生や、熱を効率的に利用する工場の建築、省エネ技術が導入された新しい機械の導入など、その規模や手段は多岐にわたる。

最近 5 年の間、IoT (Internet-of-Things)や情報通信技術の進展と、各種センサーの導入コスト低減に後押しされ、エネルギーを管理することで省エネを目指す動きが活発となっている。その代表的な仕組みとして工場エネルギー管理システム (Factory Energy Management System; FEMS)があげられる。FEMS はシステムを構築する企業によって多少の差異は存在するものの、工場内のエネルギーの流れをセンサーで集積し「見える化」することで、ムダの発見とエネルギー高効率な生産システム運用を支援することが主な役目となっている。しかしながら、現行システムでは、こういった消費エネルギー抑制策をとるかなどの判断は自動化されていない。すなわち、意思決定は生産システム管理者の手に委ねられており、たとえばエアコンの温度設定を変更する、消灯する、優先度が低い機械の電源を落とす、といった大雑把な省エネ策がとられているのが実情である。一方、FEMS の研究開発段階では省エネに関する意思決定の自動化や、そのための理論に関する研究がいくつか報告されている。しかしながら、これらは概念論の提唱にとどまるものが多く、実際の製造プロセスの物理特性を考慮していないなど、実用化に向け課題が残されている。

以上の背景から、本研究では生産システムの中核をなす工作機械に注目し、エネルギー高効率な運用を実現するための消費電力モデル構築を目指す。その端緒としてエネルギーを考慮した生産計画を立案し、システム運用の視点からエネルギー効率性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する。次に、工作機械に着目し、エネルギー密度 (Specific Energy Consumption; SEC) と材料除去能率 (Material Removal Rate; MRR) に基づく工作機械の消費電力モデルを提唱する。多様な切削および計測実験を通じて、その精度の良さと実用性、汎化性を示す。

本論文ではまず、エネルギー負荷計画の立案手法を提案した。ここでは、時間あたりの消費電力であるピークデマンドを考慮しつつ、生産性を最適化するような生産計画としてエネルギー負荷計画を定義した。この立案過程を、資源制約付きプロジェクトスケジューリング問題 (Resource Constrained Project Scheduling Problems; RCPSP) の枠組みにおいて、生産システム全体で消費可能な電力を資源とし、その利用可能量を制約としつつ生産性を最大化するように各作業の開始時刻を決定する問題に帰着した。ただし、本研究ではエネ効果を期待し、各作業を処理するモードを複数用意した。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

利用に効果が発揮される。実際の工作機械の消費電力プロファイルに基づきエネルギー負荷計画を作成した。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 利用可能な電力容量と生産性にトレードオフの関係がある。
- 2) ピークデマンドの強い制約下では、個別に見ると最適であると考えられていた処理モード以外を選択することで、生産性が向上することがある。

以上の結果から、エネルギー負荷計画が生産システム全体の省エネに効果的であることがわかった。このような計画段階から省エネの程度を予測する手法は、生産システムの自動化をとまなう高度なグリーン化に寄与する。

次に、エネルギー負荷計画の立案に必要となる、生産システム内の個々の機械で消費されるエネルギーを表すエネルギープロファイルを生成するための研究を行った。本論文では、生産システムの中核をなす工作機械に着目し、マシニングセンタにおける消費電力モデルを構築した。提案モデルは消費電力を SEC と MRR の観点から回帰分析した結果から得られた近似モデルであり、MRR を説明変数とした累乗関数の形をとる。この近似モデルを根拠とし、MRR に応じた消費電力が予測可能な消費電力モデルを提案した。提案モデルを用いて、アルミニウム合金切削における消費電力予測実験を行ったところ、次のような結果が得られた：

- 1) 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。
- 2) 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となった。

また、モデルの汎化性を検討するため、異なるマシニングセンタや被削材による検証実験を行った。2種のマシニングセンタを用い、それぞれ11種の被削材で66通りの簡易な切削を行い、消費電力を計測した。そして、SEC と MRR の観点から消費電力を分析した。その結果、マシニングセンタや被削材が異なる場合でも SEC は MRR を説明変数とした累乗関数により表現できることがわかった。これにより、提案モデルの汎用性も確認できた。このような汎用性の高さや高い予測精度、そして累乗関数による簡単な構造の消費電力モデルは、エネルギー負荷計画の効率的な立案に貢献できると考えられる。

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多用される X 軸および Y 軸方向の送りに注目した。まず、X 軸のみ使用、Y 軸のみ使用、X 軸と Y 軸を同時使用、という三つのパターンで同一形状切削時の消費電力を計測した。これを2種のマシニングセンタおよび5種の被削材に対し行った。その結果、次のことが明らかとなった。

- 切削性が良いとされる A7075, S45C, FC250 においては使用するマシニングセンタ

に関わらず送り駆動系の違いによる消費電力の違いはほとんど見られなかった。

- 逆に切削性が比較的悪く、切削負荷が大きくなる SK3 と SUS304 においては、XY 軸同時駆動させる切削で、X 軸のみ駆動と Y 軸のみ駆動時の切削に比べ消費電力の増加量は大きくなった。
- 主軸モータ部の切削時消費電力と工作機械全体の空切削時消費電力を、工作機械全体の切削時消費電力と比較した結果、切削負荷により増加した消費電力は、主軸モータ部だけでなく送り駆動系でも無視できないほど費やされている。

さらに、消費電力モデルを送り駆動系ごとに作成し、モデルによる消費電力の予測値と実際の消費電力計測値を比較したところ、以下の結果が得られた。

- X 軸のみ駆動および Y 軸のみ駆動時の切削時消費電力は、X 軸または Y 軸の一方のみを用いた切削実験から消費電力モデル構築することで、96%以上の予測精度が得られる。
- XY 軸を同時に用いた切削時消費電力については X 軸のみ、あるいは Y 軸のみ使用した切削実験から得られたモデルでは、切削性の悪い被削材において予測精度が 85%ほどにまで低下する。
- XY 軸を同時に用いた切削においては XY 軸同時駆動時消費電力をもとにモデルを構築することで、92%ほどの予測精度を得られる。

以上から、より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がわかった。より精緻な消費電力予測によりエネルギー負荷計画の信頼性をより高めることができる。

本論文ではエネルギー高効率な生産システム運用のために工作機械の消費電力モデルを構築した。消費電力モデルを用いて消費プロファイルを構築することで、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。