

学位申請者氏名 米本 涼

論文題目 グリーン製造におけるエネルギー効率化スケジューリングの  
実装とその効用に関する研究

## 論文の内容の要旨

環境負荷の低減や脱炭素化、資源の持続可能性を目標とする製造活動の生産技術および方法論は、総称して「グリーン製造」と呼ばれている。生産システムレベルでは、生産設備の改良による省エネ化や、スマート製造に代表される工場エネルギー管理システムによるエネルギー収支の可視化、生産統制フェーズではエネルギー消費を意識した生産計画、他にもコージェネレーションシステムを用いた熱エネルギーの再利用などが挙げられる。また、生産現場レベルでは、加工経路の改善や高速加工による処理時間の短縮などが行われている。製造のグリーン化の取り組みは、生産設備個々の消費エネルギー削減への対応が最も有用であると言えるが、生産システム全体を対象としたエネルギー効率化の観点では異なる。生産システム全体での電力供給量には制限があるため、常にすべての機械で高速加工を行うことは困難であり、全体のエネルギー最適化を考慮すると各種生産設備に供給する電力エネルギーを融通し合う必要がある。

こうした状況下で生産システムの消費エネルギーおよび生産性の最適化を図るには、実行系である各工作機械の消費電力や生産性などの情報を、生産システム全体の管理を行う計画管理系へとシームレスに集約しつつ、消費電力量を精緻にかつリアルタイムに予測することが重要である。さらに、エネルギーの高効率運用を行う生産現場の意思決定プロセスとして、エネルギー効率を指向するスケジューリング技法（エネルギー効率化スケジューリング）の確立が肝要である。エネルギー効率化スケジューリング技法の研究は、スケジューリング理論の枠組みで、概念的なエネルギーコストを導入することにより議論されている。しかし、その検証は数値シミュレーションの段階にとどまっている場合が多く、故障や想定外のトラブルといった不確実性や、現実に則した技法の研究は途上である。

以上の背景から、本研究ではグリーン製造のエネルギー最適な運用の実現を目指すべく、実証検討に立脚したエネルギー効率化スケジューリングの効用を明らかにすることを目的とする。研究を推進するにあたり、次の三つの研究方策を定めた。

方策1) 運用段階におけるエネルギー最適化を図る上で、リアルタイムでの消費電力と

計画系の生産情報を取得する計測制御プラットフォームの構築を行う。本プラットフォームと物理システムを接続し製造実行シミュレータを開発し、実証検討に基づくエネルギー効率化スケジューリングの評価基盤を構築する。

方策2) 生産システムのエネルギー最適化運用に対するエネルギー効率化スケジューリングの効用を明らかにする。ジョブの投入順序が生産システム全体の消費電力量に与える影響を観察し、エネルギー最適な生産スケジュールの特性を分析する。

方策3) エネルギー効率化スケジューリングのシステム化・自動化を実現するための一つのアプローチとして、マテリアルハンドリングシステムの動作計画によるジョブの工作機械への投入制御を提案する。また、エネルギー損失の直接的要因の一つである生産環境の変動とエネルギー高率な運用の関係性を明らかにする。

本論文ではまず、方策1)において、CNC工作機械や搬送マニピュレータでの消費エネルギーの視覚化技術を導入可能とする汎用計測制御プラットフォームと製造実行シミュレータの開発を行った。本プラットフォームは、リアルタイムでの消費エネルギーと生産情報の計測が可能であり、計測対象のシステムを柔軟に切り替えることができる。モデルケースとしてミニチュアのフレキシブルトランスファーライン (FTL) を使用することで、高度なコンピュータシミュレーション技術を用いずに、工程内におけるエネルギー効率性や生産性の運用評価を行うことも期待できる。

ここでは、ミニチュアFTLを接続したプラットフォームを物理シミュレータとして運用し、リアルタイムに計測した消費電力や生産情報を根拠とすることで、その有用性と汎用性について示した。複数品種の大量生産を想定し、繰り返し処理におけるスケジューリング (サイクリック・スケジューリング) の物理シミュレーションを行い、時間経過に伴うエネルギー効率性および生産速度といった生産システムの評価指標をリアルタイムに算出した。結果として、以下の知見を得た。

- ジョブのサイクリックな投入順序が、生産システム全体のエネルギー効率性に影響を与え得る。
- 現実の工場で頻発するいわゆる「チョコ停」といった予期せぬ生産性阻害事象を、エネルギー効率性、および生産性の時間変化に伴う劣化から判断することが可能である。

さらに方策1) について、現実に則した環境下でエネルギー性を考慮したスケジューリングを行った場合、エネルギー効率性と生産性にどのような関係性が生じるかについて調査した。計測制御プラットフォームとミニチュア製造モデルを用い、全数探索によるスケジューリングを考え、エネルギー消費量、エネルギー効率性、生産速度、およびサイクルタイムの計4種の性能指標について評価した。その結果として、以下のことがわかった。

- スケジューリングの最適化を考慮した場合、製造リードタイムと総エネルギー消費量、及びリードタイムとエネルギー効率性の間にはトレードオフが存在する。

- 物理システムの物理およびエネルギー関連の性能指標を用いたシミュレーションが可能であることを示している。

方策2) について、工作機械の消費電力傾向の計測結果をもとに、マニピュレータの動作計画が、生産システム全体のエネルギー効率と生産性に与える影響を調査するため研究を行った。本研究では、計測制御プラットフォームを実システムに接続し、消費エネルギーおよび生産性時間系列情報を計測した。対象システムは、6軸マテハンマニピュレータを搭載した2軸CNC旋盤と3軸立形マシニングセンタから構成されるフロー型フレキシブル製造システムである。通常のマテハン作業を含む旋削と添削の二つの工程からなるサイクル・スケジューリングを対象とした実験を行ったところ、次の結果が得られた。

- マニピュレータ動作時に増加する消費電力は、製造システム全体の0.9%から3%程度であり、消費電力への影響は非常に小さい。
- マニピュレータの稼働率を高めることを図ったスケジューリング方式は、エネルギー効率の点で有用である。

マニピュレータの動作が全体の消費電力にあまり影響を与えない要因としては、マニピュレータの消費電力が稼働中の工作機械の消費電力を大幅に下回った点が挙げられる。このことから、製造時のシステムの生産性を維持しつつ、マニピュレータのエネルギー効率を向上させることが可能であることが示された。

以上の成果と知見を踏まえ、マニピュレータの動作如何により生産システムのエネルギー効率を向上させることが可能なのではないかとこの着想を得た。そこで、方策3) として、エネルギー効率化スケジューリングの一端として、不確定的事象の発生に柔軟に対応する適応的動作を考察した。本動作は、マニピュレータのハンドに装備されたカメラと画像認識機能を用いて自律的な操作手順を実装することにより実現した。工作機械のランダムなダウンタイムを伴う物理シミュレーションを実施し、適応的動作の効用を検証した。その結果は次のとおりである。

- ダウンタイムが大きいほど、適応的動作によるダウンタイム低減の効果が高く、シミュレーション全体の平均で約38%低減された。
- 基本動作の場合はサイクルタイムが故障発生前の水準に回復するには、故障の終了を待つ必要があるため時間を要する。一方、適応的動作の場合は故障発生後から徐々に回復し始め、比較対象の汎用的動作よりも短時間で定常製造へと回復する。

以上、実証検討を根拠として、エネルギー効率化スケジューリングが生産システム全体のエネルギー効率性向上に一定の効果があることを示した。