

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：34428
 研究種目：基盤研究(C)（一般）
 研究期間：2018～2020
 課題番号：18K11740
 研究課題名（和文）製造サステナビリティ向上のための体積比エネルギーに基づく生産システム最適化

研究課題名（英文）Manufacturing System Optimization Based on Specific Energy Consumption Toward Manufacturing Sustainability

研究代表者
 諏訪 晴彦（Suwa, Haruhiko）
 摂南大学・理工学部・教授

研究者番号：40299029
 交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では「日々のエネルギー高効率な生産設備の操業」を実現すべく、エネルギー効率性向上を指向する生産システムの新たな最適方策を与えることを目的とする。具体的には切削加工において、単位除去体積あたりの消費エネルギーと、除去率（生産能率）の相関に基づいて、生産設備の統一的な消費エネルギーモデルを構築した。また、工作機械に比して消費電力の少ない搬送ロボットの動作に適応性を与えることにより、対象とする生産システム全体の電力ピークシフト（エネルギー負荷の平滑化）を可能とする生産スケジューリング技法を考案した。テストベッドを用いた実証実験により、提案する運用方法の適用可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
 製造現場では、持続可能性の実感が薄いことから、エネルギー効率の問題自体が喫緊課題として認知されていないのが実情である。本研究では生産システムの全体最適化を重視し、生産設備（実行系）物理現象を内包する計画管理系の新たなスケジューリング論を提唱した。その基盤として、被削材の除去体積当たりの電力エネルギーを用いた工作機械の汎用的な消費エネルギーモデルを構築した。省エネの問題を生産スケジューリングへと落とし込むことにより、システムティックなエネルギー高効率な操業への質的転換が可能となる。また、製造現場での「エネルギーを有効利用するための操業」がどういったものを時系列に視覚化することが可能となる。

研究成果の概要（英文）：This study aims to provide a novel manufacturing system optimization policy strengthening the energy efficiency of the system. We focused on the machining process. We built an analytical energy consumption model for manufacturing equipment based on the correlations between specific energy consumption (SEC) and material removal rate (MRR). We first measured electric energy consumed at a machining center, wire-cut electric discharge machine, and material-handling manipulator. Then, an experimental model to describe correlations between SEC and MRR was derived from the measured data. We then investigated the impact of the manipulation task scheduling on the energy efficiency and productivity of the whole manufacturing system through the experiments on a real system. The results demonstrated that manipulation scheduling could enhance the energy efficiency of the entire manufacturing system. It also indicated the importance of a linkage between the planning phase and the execution phase.

研究分野：システム工学・生産工学

キーワード：体積比消費エネルギー 加工能率 最適化 エネルギー効率性 スケジューリング 実証実験

1. 研究開始当初の背景

サステナブル製造に関する研究は非常に広範な分野に渡る。大まかには、

- 1) ライフサイクル評価 (LCA) による環境影響評価システム (図 1①) や工場全体のエネルギー管理システム (図②),
- 2) 生産設備の省エネ技術 (図 1③),
- 3) エネルギー消費を考慮した生産の計画 (図 1④), さらに,
- 4) エネルギー変換におけるコンバインドサイクル発電の導入といったエネルギー再利用技術

に分けられる。本研究は生産実施の段階 (図 1 の点線枠内) を対象領域とし、コンピュータ数値制御 (CNC) 工作機械で構成される高度自動化生産システムの運用論に着目する。その関連研究では、CNC 工作機械の消費電力削減技術を対象とした研究がほとんどである。供給エネルギーの主要因である冷却装置や油圧ユニットなど周辺装置の待機電力を抑制する技術や高速加工の技術が進展している。また、生産システム統制 (図 1 の計画管理系) の面では、エネルギー費用を組み込んだスケジューリング技法が数多く研究されている。

図 1③の実行系 (生産設備) に関連して、われわれの研究グループでは、特定の工作機械を対象として、そのエネルギー効率な使い方を探求することを目的として消費電力予測モデルの構築に取り組んできた。この研究では、材料除去率[mm³/s]と除去体積比エネルギー [J/mm³]の関連性から、消費電力を材料除去率の非線形関数とする精緻な消費電力予測モデルを構築した。様々な材料を対象としたいくつかの切削実験を通じて、材料除去率が相対的に高い場合はモデルによる予測精度が非常に高いことを示している。また、図 1④の計画管理系に関連して、生産システムのエネルギー負荷計画最適化の枠組みと解法を提案している。さらに、不確実な製造環境下での生産計画に対する数理最適化手法をいくつか開発した。

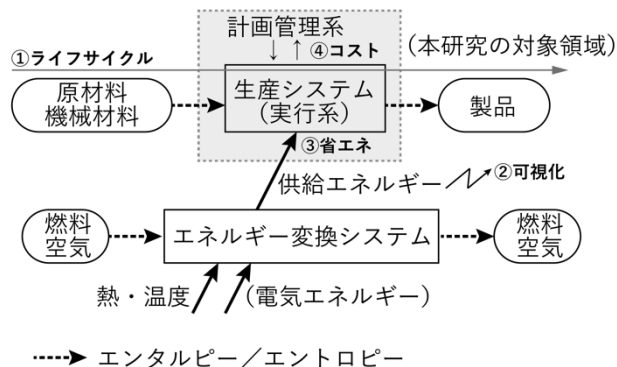


図 1: 研究の位置付け

2. 研究の目的

本研究では「日々のエネルギー高効率な生産設備の操業」を実現すべく、エネルギー効率性を指向した生産システムの新たな最適方策を与えることを目的とする。

目的 1: 体積比エネルギーを用いて、生産設備の普遍的かつ統一的な消費エネルギーモデルを構築する。

目的 2: 消費エネルギーモデルに基づいて、体積比エネルギーを最小化するような処理速度 (加工能率や移動速度) や作業時刻を決定するといった生産システムの新たな最適運用方策を、数理最適化の立場から明らかにする。

コンピュータ数値制御 (CNC) 工作機械と 6 軸アームロボット、およびそれらの周辺装置 (クーラント、油圧ユニット、エアコンプレッサ) で構成される自動化生産システムを具体的な対象とする。

3. 研究の方法

研究期間において、次の研究方策 1~3 にしたがって年次進行で研究を実施した。

[研究方策 1]

ワイヤーカット放電加工機および小型協調ロボットの稼働時消費電力の計測実験を実施した。ワイヤーカット放電加工機では、同じ厚さの 3 種類の被削材 (S45C, S50C, および SDK11) に対して、異なる 3 種類の基本工具経路 (直線(X), 斜線(XY), 円弧(XY))を組み合わせた経路について消費電力計測を行った。ワイヤカット放電加工機および搬送ロボット (6 軸小型協調ロボット)

における生産性に関わる消費エネルギー特性を明らかにする。

〔研究方策 2〕

ワイヤカット放電加工機を対象とした消費電力特性の分析を行った。また、製造システムテストベッドを構成しシステム運用時の消費電力特性の観察及びエネルギー効率化スケジューリングの実効性に関する基礎的な検討を行った。

〔研究方策 3〕

製造システムテストベッドでの物理実験を軸として、体積比エネルギーの最小化が処理効率の最大化と等価であることを仮定した上で、対象システムのエネルギー最適化問題の枠組みを構築する。また問題を記述する数理モデルの構築を試みた。具体的には、同種の切削加工が可能な能力差のある並列機械システムにおいて、8種類の工具とドリル加工及びフライス加工(溝加工)を組み合わせたベンチマーク加工を対象とした。消費電力ピークの平滑化を目的とした加工順序生成の可能性を探った。

4. 研究成果

〔方策 1〕

ワイヤカット放電加工の被削材切削時における消費電力計測 (KYORITSU KeW6350) の結果、いずれの工具経路においても加工開始から 180s までは、3.5kW から 6.7kW の範囲で消費電力が推移し、180s 以降ではほぼ一定の値を取ることがわかった。直線および円弧の切削における消費電力は 6.2kW、斜線の切削でのそれは 6.0kW であった。また、斜線加工は、直線および円弧加工よりも加工時間が 20s から 30s ほど長くなることもわかった。全般的に、CNC 旋盤 (切削) やマシニングセンター (転削やドリル加工) に比して、消費電力時系列のランドスケープは複雑であることがわかった (図 2 左)。そこで、材料除去率(MRR)と体積比消費エネルギー(SEC)の平面に実験結果をプロットしたところ、MRR が 0.2 ~ 0.3mm³/s、SEC は 18~25kJ/mm³ 程度に集中することがわかった (図 2 右)。これは、選定した被削材の導電性が比較的類似していることに起因する。ワイヤカット放電加工機の体積比消費エネルギーの汎化モデルを構築するには、導電性の異なる材料での実験(結果)が必要である。既往研究のアルミ合金のほか、クロムモリブデン系ステンレス鋼の採用を検討している。

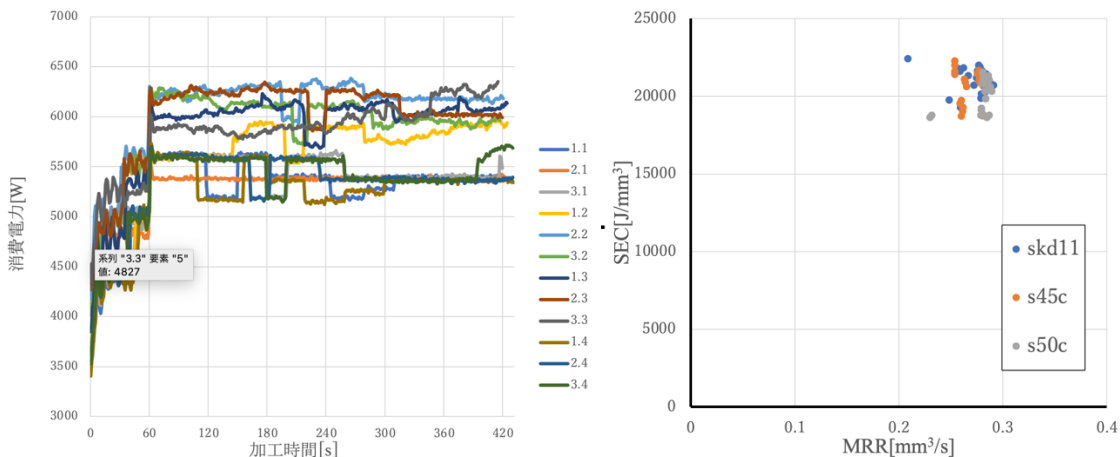


図 2 : 実験結果 (左:消費電力の一例(S50C/円弧加工), 右:MRR-SEC)

次に、搬送ロボットの消費電力傾向を把握するために、搬入・搬出の基本動作に対する消費電力の計測実験を実施した。なお、電力計測装置は従前研究で開発した LabVIEW 言語をベースとする計測制御プラットフォームを利用した (図 3)。動作ごとにピーク消費電力や消費エネルギーは異なることが明らかとなったが、消費電力は最大でも 300W を越えることはなく、工作機械のそれに比べると非常に小さい。生産システムのエネルギー効率性の観点からは、搬送ロボットの消費電力の低減に注力するよりは、ロボットの動作スケジューリングをうまく利用して、生産システム全体の消費電力低減ないしは電力ピークシフトによる電力負荷平滑化を図ることが効果的であろうという知見を得た。



図 3: 計測制御プラットフォームによるシステム消費電力計測

[方策 2]

ワイヤーカット放電加工機は、その加工原理の特性上、被削材の導電性および熱伝導性が消費電力に影響を及ぼすと考えられる。そこで、とくに熱伝導率による影響を明らかにするため、消費電力特性の分析を行った。5種類の被削材（A5052、S50C、SKS3、SKD11 および NAK55）の加工実験において放電加工機全体で消費する電力を測定した。その結果、(1)熱伝導率が高いほど総消費電力が少なく加工時間が短い、(2)伝導率と消費電力に相関はなく、熱伝導率と消費電力には強い負の相関があることがわかった。この結果を踏まえて、熱伝導率と体積比エネルギーを算出すると図 3 左のような結果が得られた。また同様に、材料除去率を測定し、体積比エネルギーとの関係を調べたところ、図 3 右の結果が得られた。実験数が限定的ではあるものの、転削や旋削と同様の傾向が得られたことは興味深い。目的 1 について、材料除去率と体積比エネルギーに基づく分析（回帰）モデルの構築の可能性を示唆している。実際には、従前研究で得られた体積比エネルギーが除去率のべき乗関数とする分析モデルである。

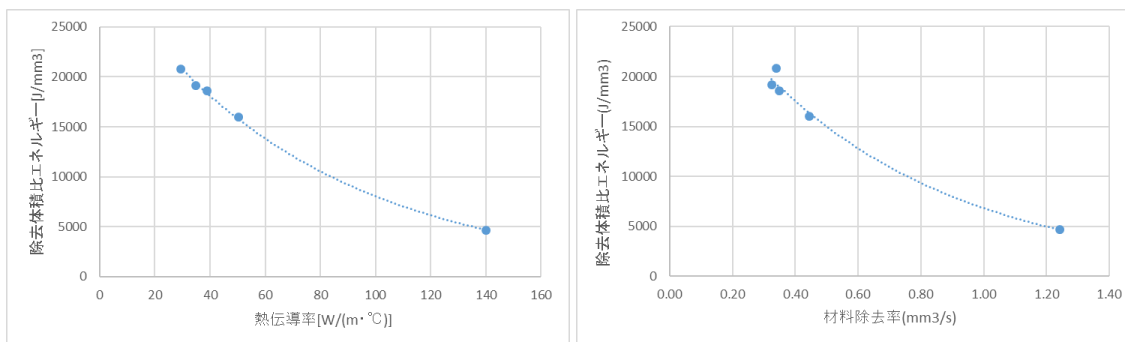


図 3: 材料除去率および熱伝導率と体積比エネルギーの関係

以上の結果は、ワイヤーカット放電加工機の消費電力やピーク電力などの予測精度向上、工場内でのエネルギーの効率的利用につながる。マシニングセンターと CNC 旋盤およびマテリアルハンドリング・マニピュレータ(搬送ロボット)を組み合わせた「製造システムテストベッド」を新たに構成し、システム全体の消費電力特性の観察とともに、エネルギー効率な運用スケジュールを立案するための基本指針を考察した。とくに、搬送ロボットの動作スケジュールが製造システム全体のエネルギー効率性と生産性に与える影響に着目した。実用性を考慮したスケジュールをいくつか取り上げ、それらにしたがう加工実験を実施したところ、製造リードタイムが短いほど消費電力量が低減するわけではないことがわかった。また、搬送ロボットの消費電力はシステム全体の消費電力に比して小さく、搬送ロボットにより工作機械の加工タイミングを決定し、システムの消費電力量を御することの可能性を示した。

[方策 3]

切削実験及びガントチャートモデルに基づいて、エネルギー重視(同一の NC コードで加工する場合)と、電力ピークシフト重視 (NC コードと切削タイミングを変更し加工する場合)の加工を実現で

きることを示した。また、切削時の消費電力計測実験に基づいて、体積比 エネルギー(SEC)と材料除去率(MRR)を算出し、SEC-MRR 分布に基づいて、ある加工順序における消費電力の時変化予測を試みた。実験の種類と規模は限定的であるが、加工順序に応じた総消費電力予測の可能性を示すことはできた。しかしながら、客観性を示すためのさらなる実験と、予測に関する最適化モデルの構築が年度内に実施できなかった。さらに、柔軟製造システムにおける搬送ロボットによる加工タイミングを制御するようなスケジューリング方策に着目し、実証実験を軸とした研究を進めた。2 台のマシニングセンタと一台の搬送ロボットで構成される柔軟製造システム (Flexible Manufacturing System) を想定し、通常の(システムインテグレーションで実装される)搬送動作に対し、機械故障時の 搬送計画の変更を考慮した適応的動作を新たに考案した (図 4)。さらに実証実験により、適応的動作(ワーク投入タイミングの動的な変更)の有用性を示した。本成果と前年度の成果を踏まえると、搬送ロボットによる生産状況に応じた電力ピークシフトが可能であることを示している。ワイヤーカット放電加工機での体積比エネルギーのモデリングについては、新型コロナ感染拡大に伴う実験施設の利用制限から当初計画どおり遂行することができなかった。

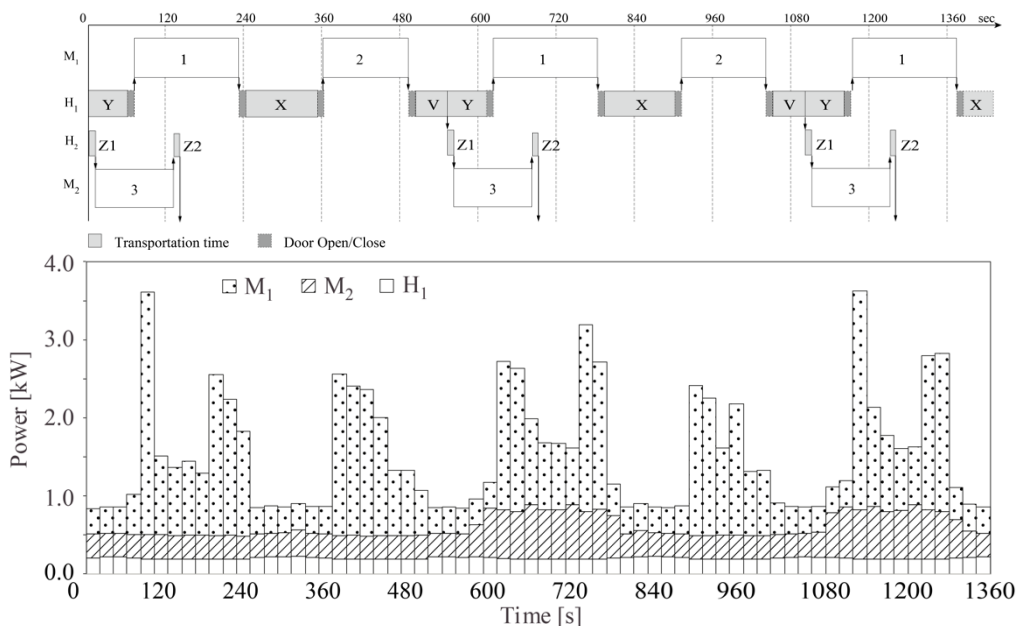


図 4：搬送ロボットを軸とするスケジュールとエネルギー負荷計測結果の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Yonemoto Ryo, Suwa Haruhiko	4. 巻 14
2. 論文標題 Task Scheduling of Material-Handling Manipulator for Enhancing Energy Efficiency in Flow-Type FMS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 943-950
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2020.p0943	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Samukawa Tetsuo, Shimomoto Kazuki, Suwa Haruhiko	4. 巻 14
2. 論文標題 Estimation of In-Process Power Consumption in Face Milling by Specific Energy Consumption Models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 951-958
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/ijat.2020.p0951	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yonemoto Ryo, Suwa Haruhiko	4. 巻 -
2. 論文標題 Scheduling-Based Adaptive Operations of Handling Manipulators to Reduce Downtime in Manufacturing Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 2020 International Symposium on Flexible Automation	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/ISFA2020-9639	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yonemoto, R. and Suwa, H.	4. 巻 32
2. 論文標題 Evaluation of Energy Efficiency and Productivity in Scheduling by Using Physical Simulator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 システム制御情報学会論文誌	6. 最初と最後の頁 185-191
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5687/iscie.32.185	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 寒川 哲夫, 下元 一輝, 諏訪 晴彦	4. 巻 19
2. 論文標題 生産システム全体のエネルギー高効率化に関する研究 (工作機械における消費電力モデルを用いた切削条件の決定)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 実験力学	6. 最初と最後の頁 293-299
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11395/jjsem.19.293	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yonemoto, R. and Suwa, H.	4. 巻 32
2. 論文標題 Evaluation of Energy Efficiency and Productivity in Scheduling by Using Physical Simulator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 寒川哲夫・下元一輝・諏訪晴彦	4. 巻 4
2. 論文標題 工作機械の切削時における消費電力モデル (ワイヤ放電加工機とCNC旋盤への適用)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 摂南大学融合科学研究所論文集	6. 最初と最後の頁 73-83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 米本涼, 諏訪晴彦
2. 発表標題 生産システムのグリーン運用のためのエネルギー効率化スケジューリング (マテハンロボットの作業計画とその消費電力への影響)
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寒川哲夫, 諏訪晴彦
2. 発表標題 エネルギー負荷計画のための消費電力モデルに関する研究
3. 学会等名 日本機械工学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 米本涼, 寒川哲夫, 諏訪晴彦
2. 発表標題 生産システムのエネルギー高効率運用における右シフトスケジューリングの効用
3. 学会等名 日本機械工学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 米本涼, 家谷友也, 諏訪晴彦
2. 発表標題 製造ダウンタイム削減のための搬送マニピュレータの適応的動作計画に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Samukawa, T., Shimamoto, K. and Suwa, H.
2. 発表標題 Capability of In-Process Specific Energy Consumption Model in Face Milling
3. 学会等名 2018 International Symposium on Flexible Automation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 米本涼・寒川哲夫・諏訪晴彦
2. 発表標題 自動化生産セルのグリーン運用のための消費電力分析
3. 学会等名 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	寒川 哲夫 (Samukawa Tetsuo)		
研究協力者	米本 涼 (Yonemoto Ryo)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------