

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K06090

研究課題名(和文) IoTエネルギー消費モデルによるシミュレーションと数理手法による生産システム最適化

研究課題名(英文) Manufacturing system evaluation based on IoT energy consumption model using simulation and mathematical method

研究代表者

日比野 浩典 (Hibino, Hironori)

東京理科大学・理工学部経営工学科・准教授

研究者番号：70598359

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：産業界では、生産性を一定水準に保ちながらも消費エネルギー量の削減が重要となっている。生産ラインにおける消費エネルギー量を把握し、単位時間の生産量から、製造エネルギー原単位を数値化し、評価する事前評価手法は研究が途上である。また、生産変動要因による製造エネルギー原単位を最適化する生産管理手法は研究されていない。そこで、本研究では、生産ラインにおける製造エネルギー原単位を評価するモデル化とシミュレーション手法を提案し、有効性を検証した。また、提案するシミュレーション手法を活用し、ロットサイズなど生産変動要因による製造エネルギー原単位の傾向分析・評価を実施し、その結果に基づき数理手法を提案し、有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、生産ラインにおける単位製品あたりのエネルギー消費量(製造エネルギー原単位)を評価する手法を提案した。また、ロットサイズなど生産変動要因による製造エネルギー原単位を評価する数理手法を提案した。これらの手法は、生産性を一定水準に保ちながらも消費エネルギー量の削減が重要となっている産業界での応用が可能であると考え、持続可能な社会実現のための技術として寄与できることを期待している。

研究成果の概要(英文)：In the industrial world, it is important to reduce energy consumption while maintaining a certain level of productivity. Research is still in progress on a preliminary evaluation method that grasps the amount of energy consumed on the production line and quantifies and evaluates the energy consumption per unit product based on the amount of production per unit of time. In addition, production control methods to optimize energy consumption per unit product based on production variation factors such as lot size have not been studied. Therefore, this study proposes a modeling and simulation method to evaluate energy consumption per unit product on a production line and verifies its effectiveness. In addition, we used the proposed simulation method to analyze and evaluate trends in energy consumption per unit product due to production fluctuation factors such as lot size, and based on the results, we proposed a mathematical method and verified its validity.

研究分野：生産システム工学

キーワード：生産システム 製造エネルギー原単位 IoT シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

情報技術を活用した製造の高度化により、多品種少量生産、最近では、ドイツ **industrie4.0** で提唱されている **IoT(Internet of Things)**による特注品を低コストで速やかに製造するマスカスタマイゼーションを実現しながらも、高効率な生産システムを構築することが重要になっている。同時に、地球温暖化や資源の有限性に端を発した環境評価に対する社会的な関心が高まり、サステナブルな生産システムを設計・構築する必要性が求められている。特に、国内においてエネルギー消費量全体の内、割合が大きい産業界では、消費電力を考慮した工場管理は早急の課題となっている。2014年4月に施行された改正省エネルギー法により、年平均1%以上の製造エネルギー原単位の削減が制度化され、生産活動における消費エネルギー量の評価と削減がますます重要となっている。これらの課題を解決するために、生産性を一定水準に保ちながらも消費エネルギー量の削減を実現することが望まれている。

生産活動における消費エネルギー量に関しては設備単体設備を対象とした事前評価手法については先行研究がある。工作機械の切削動作に伴うエネルギー消費量の事前評価手法の研究は進展している。産業用ロボットについては、軌道によるエネルギー消費量の事前評価手法の研究は進展している。他方で、生産ラインにおける、ものの流れや情報の流れにおける消費エネルギーを算出し、単位時間の生産量から、製造エネルギー原単位を数値化し、評価する事前評価手法は研究が途上である。また、ロットサイズなど生産変動要因による製造エネルギー原単位を最適化する生産管理手法は研究されていない。

2. 研究の目的

本研究では、生産ラインにおける単位製品あたりのエネルギー消費量（製造エネルギー原単位）を評価するモデル化とシミュレーション手法を開発する。また、生産ラインにおける製造エネルギー原単位を評価する数理手法を開発する。

生産ラインにおける製造エネルギー原単位を評価するモデル化とシミュレーション手法では、まず、IoT環境下の生産設備の状態をセンシング・モニタリングする際に、生産設備の状態と状態遷移の関係を明らかにし、設備状態と消費エネルギーの関係の把握することで、実設備のエネルギーの取得が容易になると着想した。そこで、生産設備の設備状態と消費エネルギーの関係が定義できる設備モデル（IoTエネルギー消費モデル）を提案する。さらに、時刻の進行に伴って生産設備の状態が変化（状態遷移）の模擬に関して、提案するIoTエネルギー消費モデルを使用し、分散系のシミュレーションシステムへの実装を提案する。

次に、生産ラインにおける製造エネルギー原単位を評価する数理手法では、開発するIoTエネルギー消費モデルのシミュレーションシステムによる生産ラインの様々な条件による製造エネルギー原単位の傾向分析・評価を実施し、製造エネルギー原単位の傾向分析・評価に基づく数理手法を提案する。

3. 研究の方法

(1) 生産ラインにおける製造エネルギー原単位を評価するモデル化とシミュレーション手法として、生産設備の設備状態と消費エネルギーの関係が定義可能な設備モデル（IoTエネルギー消費モデル）を提案する。IoTエネルギー消費モデルは、「設備状態と状態遷移の定義」および「設備状態と消費エネルギーの関係の定義」で分類する。「設備状態と状態遷移の定義」については、代表的な設備である工作機械、産業用ロボット、および、半導体製造工場に導入されているはんだリフロー設備など 主要設備を対象とする。

(2) 生産ラインにおける製造エネルギー原単位を評価するモデル化とシミュレーション手法として、IoTエネルギー消費モデルのシミュレーションシステムへの実装について、提案する。シミュレーションシステムは、時刻の進行に伴う設備状態変化の模擬機能、評価時間分割単位によるスループット量を含む生産性情報を時刻付きでの生成機能、および、評価時間分割単位による消費エネルギー情報を時刻付きでの生成機能を有する構成として提案する。（図1参照）

(3) 生産ラインにおける製造エネルギー原単位を評価する数理手法では、提案するIoTエネルギー消費モデルのシミュレーションシステムを、仮想的実データの生成システムとして捉え、様々な生産変動要因による生産システムの変動の傾向分析・評価する。傾向分析結果を使用して、IoTエネルギー消費モデルの状態や状態遷移に基づく消費エネルギーの定式化、および、生産設備間のものの流れに基づく定式を行い、それらを統合化して生産量と消費エネルギー量を関係させ、単位製品あたりのエネルギー消費量の数理モデルによる定式を提案する。（図2参照）

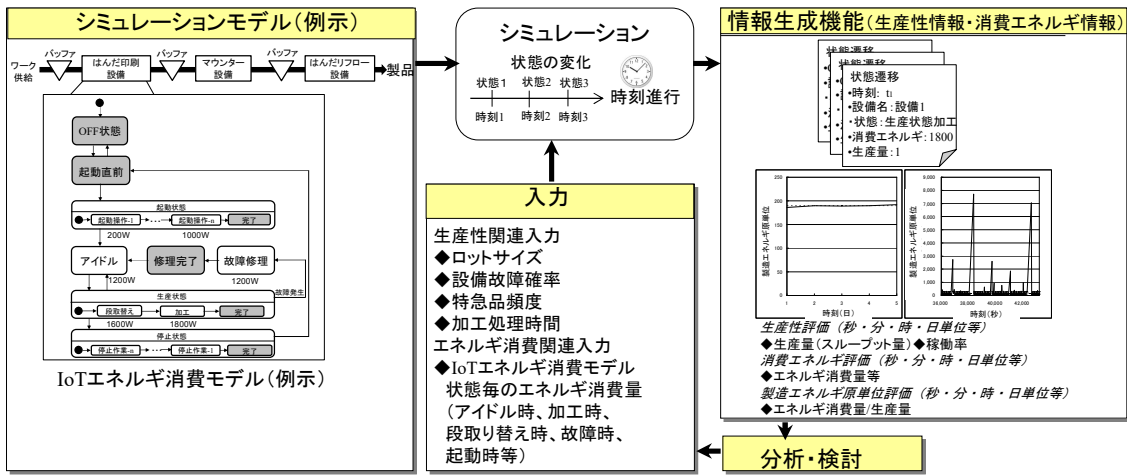


図1 提案するIoTエネルギー消費モデルとシミュレーションシステムの概要

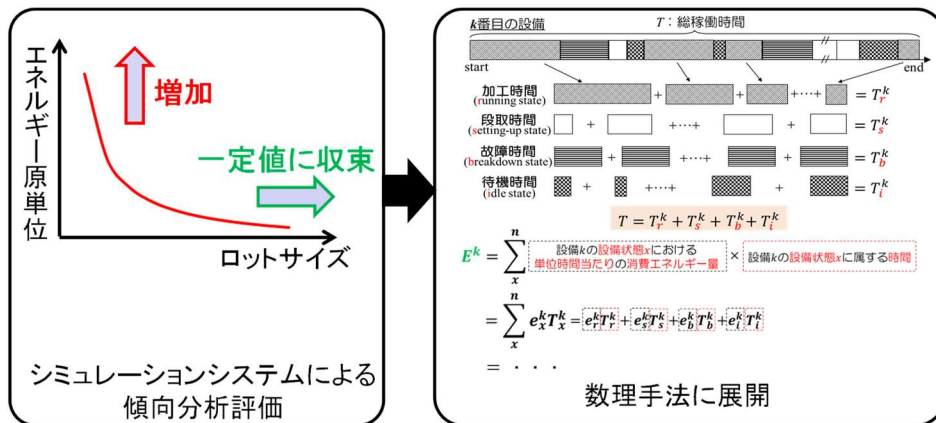


図2 シミュレーションシステムによる傾向分析評価と数理手法展開の概要

4. 研究成果

本研究では、生産ラインにおける単位製品あたりのエネルギー消費量（製造エネルギー原単位）を評価するモデル化とシミュレーション手法を開発した。具体的には、生産設備の設備状態と消費エネルギーの関係が定義可能な設備モデル（IoTエネルギー消費モデル）を提案した。また、IoTエネルギー消費モデルのシミュレーションシステムへの実装について、提案した。開発したシミュレーションシステムにより、プリント基板製造ライン等のケーススタディを実施し、その有効性を検証した。また、生産ラインにおける製造エネルギー原単位を評価する数理手法を開発し、提案を行った。プリント基板製造ライン等のケーススタディを実施し、その有効性を検証した。上記の研究成果の概要を以下に記載する。

(1) 生産ラインにおける製造エネルギー原単位を評価するモデル化とシミュレーション手法として、生産設備の設備状態と消費エネルギーの関係が定義可能な設備モデル（IoTエネルギー消費モデル）を提案した。IoTエネルギー消費モデルは、「設備状態と状態遷移の定義」および「設備状態と消費エネルギーの関係の定義」で分類した。「設備状態と状態遷移の定義」については、代表的な設備である工作機械、産業用ロボット、および、半導体製造工場に導入されているはんだリフロー設備など主要設備を対象とした。生産設備の状態は、起動状態、アイドル状態、生産状態、故障修理状態、停止状態の5つの状態で分類した。それぞれの状態はサブ状態を保有する。例えば、生産状態では、加工状態、段取替え状態がサブ状態になる。「設備状態と消費エネルギーの関係の定義」については、実機の5つの状態の消費エネルギー量についてのセンシング・モニタリング情報を用いて、その設備状態における消費エネルギー量を算出可能になるように、開発した。プリント基板製造ラインを対象として、ケーススタディを行い、有効性を検証した。

(2) 生産ラインにおける製造エネルギー原単位を評価するモデル化とシミュレーション手法として、IoTエネルギー消費モデルのシミュレーションシステムへの実装について、提案した。シミュレーションシステムは、時刻の進行に伴う設備状態変化の模擬機能、評価時間分割単位によるスループット量を含む生産性情報を時刻付きでの生成機能、および、評価時間分割単位による消費エネルギー情報を時刻付きでの生成機能の3つの機能を有する構成として提案した。時刻の進行に伴う設備状態変化の模擬機能は、時刻の進行に伴う設備状態変化をイベントとして捉え、そのイベントを離散的に時刻を進めながら擬似実現する離散系のシミュレーション処理を実施する。評価時間分割単位によるスループット量を含む生産性情報を時刻付きでの生成機能は、時刻の進行に伴って変化するスループット量を含む生産性情報を、評価時間分割単位に伴い進行するシミュレーション内部時刻と関連付けて生成を実施する。評価時間分割単位による消費エネ

ルギ情報を時刻付きでの生成機能は、時刻の進行に伴って変化する設備状態における消費エネルギー情報を、評価時間分割単位に伴い進行するシミュレーション内部時刻と関連付けて生成を実施する。時刻の進行に伴う設備状態変化の模擬機能は、離散的な時刻の進行を評価時間分割単位で実施し、提案する状態遷移モデルを仮想モデルとしてプログラム化し、時刻の進行に伴い設備状態の遷移を実現するように実装した。プリント基板製造ラインを対象として、ケーススタディを行い、有効性を検証した。

(3) 生産ラインにおける製造エネルギー原単位を評価する数理手法では、IoT エネルギー消費モデルの状態や状態遷移に基づく消費エネルギーの定式化、および、生産設備間のものの流れに基づく定式を行い、それらを統合化して生産量と消費エネルギー量を関係させる単位製品あたりのエネルギー消費量の数理モデルによる定式を実施した。

まず、開発したシミュレーションシステムを、仮想的実データの生成システムとして捉え、様々な生産変動要因による生産システムの変動の傾向分析・評価を行った。

最初に、ロットサイズの変化と製造エネルギー原単位との関係性について、開発したシミュレーションシステムにより、傾向分析・評価を行った。ロットサイズを大きくすると製造エネルギー原単位は下がり、ロットサイズを小さくすると製造エネルギー原単位は高まることはこれまで定性的には理解できているが、その関係性を定量的に評価されていなかった。開発したシミュレーションシステムにより、ロットサイズと製造エネルギー原単位との定量的な関係性について明確にできた。そこで、IoT エネルギー消費モデルで提案した5つの生産設備の状態（起動状態、アイドル状態、生産状態、故障修理状態、停止状態）、および、生産設備間のものの流れを基礎として、製造エネルギー原単位を算出可能な数理モデルを提案した。プリント基板製造ラインを対象として、ケーススタディを行い、有効性および最適値の導出を検証した。

次に、不良品発生、特急ジョブ受付等による生産変動と製造エネルギー原単位との関係性について、開発したシミュレーションシステムにより、傾向分析・評価を行った。不良品発生、特急ジョブ受付等による生産変動と製造エネルギー原単位の定量的な関係性について明確にできた。そこで、不良品発生、特急ジョブ受付等による生産変動と製造エネルギー原単位との定量的な関係性について、数理モデルを提案した。プリント基板製造ラインを対象として、ケーススタディを行い、有効性および最適値の導出を検証した。

本研究は、生産ラインにおける製造エネルギー原単位を評価し、最適化することで、サステナブルな生産システム的设计・構築に貢献することを目指している。ここでは、生産ラインを対象としたが、本研究のアプローチは対象を拡大できると考えている。この研究アプローチが、多くの生産システムで活用され、製造エネルギー原単位の削減に、貢献できることを期待している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 堀川貴正, 日比野浩典, 新井俊悟, 山口誠	4. 巻 Vol.8巻 No.5号
2. 論文標題 不良率がエネルギー原単位に及ぼす影響の評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 スマートプロセス学会誌	6. 最初と最後の頁 190-197
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 Hironori HIBINO, Takamasa HORIKAWA, Makoto YAMAGUCHI	4. 巻 13巻 3号
2. 論文標題 A study on lot-size dependence of the energy consumption per unit of production throughput concerning variable lot-size	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jamdsm.2019jamdsm0062	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 山本将大, 日比野浩典, 堀川貴正, 山口誠	4. 巻 7巻3号
2. 論文標題 多品種少量生産におけるエネルギー原単位の定式化	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 スマートプロセス学会誌	6. 最初と最後の頁 94-105
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 Takayuki Kobayashi, Makoto Yamaguchi, Hironori Hibino	4. 巻 50-1
2. 論文標題 Lot Size Dependence for Energy Consumption per Unit of Production Throughput Considering Rush Orders in Manufacturing Lines	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IFAC PaperOnLine	6. 最初と最後の頁 5000-5005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2017.08.904	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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 日比野浩典
2. 発表標題 IoT技術環境下のCyber Physical Production System (CPPS) による ものづくりの変化
3. 学会等名 MATE2021 27th Symposium on Microjoining and Assembly Technology in Electronics (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shungo ARAI, Munehiro SUGIYAMA, Hironori HIBINO, Takamasa HORIKAWA, Shoutarou MIURA and Makoto YAMAGUCHI
2. 発表標題 Manufacturing system simulation to evaluate energy productivity, formulation of specific energy consumption under parallel production line
3. 学会等名 JSME (Japan Society of Mechanical Engineers) IDECON/MS (International Conference on Design and Concurrent Engineering & Manufacturing System Conference) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shungo Arai, Hironori Hibino, Takamasa Horikawa and Makoto Yamaguchi
2. 発表標題 Formalising Specific-Energy Consumption Under a Production-Management Form Where Rush Orders Are Added in Time Slots
3. 学会等名 IFIP WG5.7 International Conference, APMS2018 IFIP Advances in Production Management Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hironori Hibino, Makoto Yamaguchi, Takamasa Horikawa, Shungo Arai
2. 発表標題 Simulation to Evaluate Specific Energy Consumption in Production Line Based on IoT
3. 学会等名 Proceeding of the 18th International Machine Tool Engineers Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀川貴正, 日比野浩典, 新井俊悟, 山口誠
2. 発表標題 不良品を考慮する場合の生産ラインのエネルギー原単位の定式化に関する研究
3. 学会等名 Proceedings of 25th Symposium on MATE(Microjoining and Assemble Rechnology in Electronics)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新井俊悟, 松本華子, 日比野浩典, 堀川貴正, 山口誠
2. 発表標題 エネルギー生産性評価のための生産シミュレーション 第8報 品種毎のエネルギー原単位の算出方法の提案
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

1. 発表者名 Hironori HIBINO, Takamasa HORIKAWA, Takayuki KOBAYASHI, and Makoto YAMAGUCHI
2. 発表標題 Formularization of Relationship between Energy Consumption Per Production Throughput and Lot size Concerning Variable Lot size in Manufacturing Line
3. 学会等名 LEM21 (The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masahiro YAMAMOTO, Hironori HIBINO, Takamasa HORIKAWA, Makoto YAMAGUCHI
2. 発表標題 Formulation of Relationship between Production Conditions and Energy Consumption per Production Throughput in High-mix Low-volume Production Line
3. 学会等名 24th Symposium MATE(Microjoining and Assemble Rechnology in Electronics) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新井俊悟, 日比野浩典, 山本将大, 堀川貴正, 山口誠
2. 発表標題 エネルギー生産性評価のための生産シミュレーション 第7報 特急ジョブを考慮するエネルギー原単位の定式化
3. 学会等名 日本機械学会生産システム門研究発表講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi. Nagasawa, Hironori. Hibino, Motonobu. Hashimoto, Norifumi. Kase
2. 発表標題 Hybrid Simulation Method by Cooperating Between Manufacturing System Simulation and Computational Fluid Dynamics Simulation
3. 学会等名 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM2017) (国際学会)
4. 発表年 2017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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------