

博 士 論 文

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

令和 3 年 1 月

摂南大学大学院

17D301

米 本 涼

目次

第1章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
1.3 本論文の構成	3
参考文献	4
第2章 製造のグリーン化とエネルギー効率化スケジューリング	5
2.1 緒論	5
2.2 製造のグリーン化	6
2.3 生産システムにおけるエネルギー効率性尺度	8
2.4 生産スケジューリング問題	10
2.4.1 記号の定義	10
2.4.2 数理モデル	11
2.4.3 評価指標	11
2.5 エネルギー効率化スケジューリング	12
2.6 まとめ	14
参考文献	14
第3章 計測制御プラットフォームの開発	19
3.1 緒論	19
3.2 計測制御プラットフォームの概要	19
3.2.1 ミニチュアフレキシブルトランスファーライン	20
3.2.2 簡易スケジューラ	22
3.3 スケジューリングモデル	23

3.3.1	FTLにおけるスケジューリング	23
3.3.2	パフォーマンスの測定	24
3.4	ケーススタディ	24
3.5	まとめ	25
	参考文献	26
第 4 章	ミニチュア製造システムによるエネルギーを考慮したスケジューリングの特性	
	分析と評価	31
4.1	緒論	31
4.2	物理シミュレータ	31
4.2.1	生産計画	32
4.2.2	結果と考察	34
4.3	まとめ	37
	参考文献	38
第 5 章	搬送マニピュレータの動作スケジュールによる EE の向上	41
5.1	緒論	41
5.2	関連研究	41
5.3	システム構成	42
5.3.1	製造システムのテストベッド	42
5.3.2	消費電力測定	43
5.4	製造テストベッドにおける加工プロセスとスケジューリング	43
5.4.1	加工プロセス	43
5.4.2	マテリアルハンドリングに基づくサイクリックスケジューリング	45
5.5	実験内容	48
5.5.1	物理スケジューリングのシミュレーションと結果	48
5.5.2	計算によるシミュレーション	50
5.5.3	結果と考察	50
5.6	不確実事象に対応するマニピュレータの適応的動作計画	51
5.7	関連研究	52

5.8	実験システム	53
5.8.1	ハードウェア構成	53
5.8.2	シミュレーションシナリオ	53
5.9	マニピュレータ運用計画	55
5.9.1	基本動作	55
5.9.2	適応的動作	56
5.10	シミュレーションと結果	56
5.11	まとめ	58
	参考文献	59
 第 6 章 結論		 63
 謝辞		 67
 本研究に関する発表		 69

第 1 章 緒論

1.1 研究背景

近年、世界人口の増加ペースが早まりつつあり、2000 年時点で 65 億人だった人口は 2019 年には 77 億人を突破した。途上国の発展に伴う人口増加が顕著になるとともに製品需要は増大し、製品供給のためエネルギーおよび資源需要は増加する一方である。特にエネルギーに関しては、代替となるエネルギー源は存在するものの、エネルギーそのものに代替性がなく持続可能な製造を行う上での重要な課題となっている。逼迫したエネルギー事情の中で、環境負荷の低減や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。すなわちグリーン製造とは、計画から製造実行、現場管理の各部門で、更にはシステムレベルから個々の生産設備の各フェーズでの接続可能な生産活動である。生産システムレベルでは生産設備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 (Factory Energy Management System; FEMS) によるエネルギー収支の「見える化」[1]、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 [2]、他にもコージェネレーションシステムによる熱エネルギー再利用などが挙げられる [3]。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、個々のエネルギー効率に注目すると有用であると言えるが、工場全体を対象としたエネルギー効率化の観点では異なる。前述の高速加工を例とすると、総消費電力量は低く抑えられるが、高出力での加工を行うため瞬間的な消費電力は増加している。工場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、全体の最適化を考慮すると各種機械に供給する電力を融通し合う必要がある。こうした状況下で消費エネルギーおよび生産性の「最適化」(エネルギー最適化)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送信しつつ、消費電力量を精緻に予測することが

肝要である [4].

また、総消費電力とピーク電力については、シミュレーション技術を活用した生産計画と最適化手法による最小化が可能であることが確認されていることから [5], このようなエネルギーの高効率運用を行うシステムの構成要素として、エネルギー効率性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, Energy - Efficient Scheduling）の確立が肝要である。エネルギー効率性は、一般に熱力学的観点からエネルギー（電気エネルギーと熱エネルギー）の流入に対する流出量の比で定義される。これは生産システムの設計論に深く関連する。すなわち、エネルギー効率性の最大化とは、エネルギー損失（多くは熱損失）の最小化を目的とした生産プロセスの工業熱力学的検知の最適設計である。生産システム運用の立場からは、エネルギー効率性は生産システムへの供給エネルギーに対する生産量で定義される、供給エネルギーは実際には固定契約電力と時間最小単位の積で置き換えられる。

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 [2]。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、現実に即した技法の研究は不足しており、運用段階における最適化としては不十分である。

1.2 研究目的

グリーン製造の運用段階におけるエネルギー最適化な運用の実現を目指すべく、本研究では、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技法の効用を明らかにすることを目的とする。そこで、複数の CNC（コンピュータ数値制御）工作機械と自動マテリアルハンドリングで構成される柔軟製造システムを対象とし、実システムでの物理実験に基づいてエネルギー効率性と生産性の関係性を明らかにした上で、エネルギー効率を思考するスケジューリングの有効性を検討する。本研究を推進するにあたり、リアルタイムでの計測システムが不可欠である。また、シミュレーション時と運用段階の間にどの程度乖離が存在するかの調査を行う必要がある。そこで、次の三つの方策を定める。

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。ここでは、その端緒として工場を模したミニチュア製造モデルを採用する。ミニチュア製造モデルはプラットフォームによる制御が可能であり、プラットフォーム上にスケジューラを実装することにより、エネルギー効率化スケジューリングの物理シミュレーションを実施する。

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。具体的には、数品種の大量生産を担う柔軟フローラインを対象とし、ジョブ（加工対象物）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（不確定事象）とエネルギー高効率な運用の関係性を明らかにする。複数の CNC 工作機械と搬送用小型マニピュレータの動作に基づく生産スケジュールの動的な修正ポリシーの有効性を検討する。

1.3 本論文の構成

最後に本論文の構成について述べる。第 1 章は緒論、第 2 章では製造業における省エネ技術の現状とエネルギー効率化スケジューリングについて述べる。第 3 章では、リアルタイムでの計測を行うため、柔軟な計測が可能なプラットフォームを構築し、ミニチュアの工場モデルをもとに行った検証について述べる。第 4 章では、前述したミニチュア工場モデルを対象に計測実験を行い、実環境下における生産性とエネルギー効率性にどのような関係性が生じるか考察する。第 5 章では、実際の加工機械とロボットアームを対象とし、シミュレーションと運用段階との乖離、およびエネルギー効率性に配慮しつつ生産性変動に柔軟に対応するシステム構築を行う。

参考文献

- [1] Y. Kawamura, H. Horiguchi, and T. Ono, A framework for optimal planning systems on the EMS platform, *Fuji Electric Journal*, **83**-3 (2013) pp.197–201.
- [2] C. Gahm, F. Denz, M. Dirr, A. Tuma, Energy-efficient scheduling in manufacturing companies: A review and research framework, *European Journal of Operational Research*, **248**-3 (2016) pp.744–757.
- [3] D. J. Marshmana, T. Chmelyk, M. S. Sidhu, R. B. Gopalunia, G. A. Dumont, Energy optimization in a pulp and paper mill cogeneration facility, *Applied Energy*, **87**-11 (2010) pp.3514–3525.
- [4] T. Samukawa, and H. Suwa, An optimization of energyefficiency in machining manufacturing systems based on a framework of multi-mode RCPSP, *International Journal of Automation Technology*, **10**-6 (2016) pp.985-992
- [5] J. R. Dufflou, J. W. Sutherland, D. Dornfeld, C. Herrmann, J. Jeswiet, S. Kara, M. Hauschild, and K. Kellens, Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach, *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, **61**-2 (2012) pp.587–609.

第2章 製造のグリーン化とエネルギー効率化 スケジューリング

本章では、まず最初に製造業を取り巻くエネルギー事情について述べる。次に、エネルギー効率化スケジューリングの概念について述べる。最後に、先行研究におけるエネルギー効率化スケジューリング手法について述べ、本研究との差異を明らかにする。

2.1 緒論

図 2.1 に示す資源エネルギー庁発行のエネルギー白書 2020 [1] によると、2005 年度をピークに最終消費エネルギーは減少傾向となっている。特に産業部門に注目すると、消費エネルギーは 2008 年に 7.0EJ を下回り、2018 年には 6.12EJ となっている。産業部門のピークである 2000 年時と比較すると 1.24EJ が削減されており、着実に省エネルギー化が進展している。全部門を総合して見ると、最終消費エネルギーを削減しつつも、GDP は 2000 年から 2018 年間で 1.14 倍に増加しており、実質 GDP あたりの最終エネルギー消費量は改善していることがわかる。

一方で、産業部門のエネルギー効率は足踏み状態が続いている。資源エネルギー庁発行の省エネルギー政策立案のための調査事業調査報告書 [2] によると、「エネルギーの使用の合理化等に関する法律」（以下、省エネ法）の特定事業者の 34 % は、5 年度間平均で単位生産量あたりの総エネルギー消費量（エネルギー消費原単位）が未改善である。また、省エネ法では 2013 年を基準とし、2030 年までに大幅な消費エネルギーの削減を目標としている。製造業においては原油換算で 1042 万 kl の削減が目標とされている。2016 年時点での進捗率は 18.3 % にとどまっており、依然として製造業における省エネルギー化は急務の課題である。

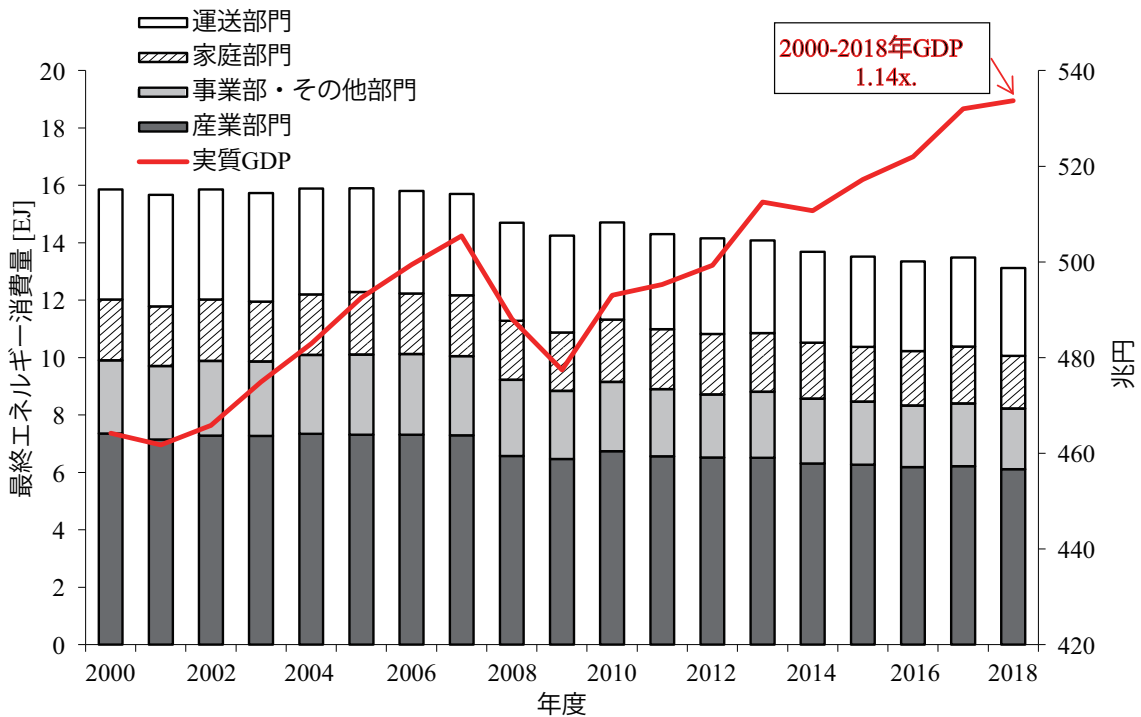


図 2.1: 最終エネルギー消費量と GDP

2.2 製造のグリーン化

前述の理由から製造業では、生産性を維持しつつもサステナビリティや環境への負荷に配慮することが求められており、これらの両立が可能なグリーン化の取り組みに拍車がかかっている [3]。グリーン化の定義は種々存在し、その対象によって異なるが、広義的に環境に優しい活動を達成するという点で共通しており、製造工程やシステムが以前の状態と比較して環境への影響を軽減するプロセスを意味する [4]。最も大きなグリーン化の枠組みとして、Hervani ら (2005) はグリーン購入、グリーン製造、資材管理、グリーン流通・マーケティング、リバース・ロジスティックスを含むグリーン・サプライチェーン・マネジメント (Green Supply Chain Management ; GSCM) の実践は、原材料の抽出から製品設計、製造プロセス、最終製品の消費者への配送、エンド・オブ・ライフ管理に至るまでのサプライチェーン・マネジメントへの環境配慮の関与を意味すると提唱している。個別に注目すると、グリーン購入は環境負荷が可能な限り小さな製品やサービスを優先して購入する、あるいは環境に配慮した活動や取り組みを行っている事業者から購入することを指す [5]。長期使用やリサイクルが可能か、再生材料などを使用しているかという点が該当するが、そもそも購

入前にその必要性を考慮することもグリーン購入の範疇に含まれる。グリーン流通およびグリーンマーケティングは、有益でかつ持続可能な方法で顧客および社会の必要性の識別と予想を行い、満足させるために責任がある全体的な管理プロセスと定義されている [6]。

製造のグリーン化の取り組みは次世代スマート製造や製造レジリエンスとともに図られており [7]，そのアプローチは様々な種類が存在する。特に生産効率とエネルギー消費の効率性の観点から見ると、「プラント」レベルと「プロセス」レベルの2つの視点から見ることができる [8]。工場やプラントレベルでは、工場全体のエネルギーを管理する工場エネルギー管理システム（Factory Energy Management System ; FEMS）がここ 10 年で開発されている。FEMS では、エネルギーの「計測」「見える化」「削減」「管理」の4つのステップを踏み、グリーン化を実現する [9]。各段階別に注目すると、下記に示す特徴がある。

- ▷ 「計測」：対象となる工場のエネルギー消費量，および関連する生産情報を連動して計測する。後のステップで信頼できる評価と分析を行うため，特にエネルギー消費の発生源に関する詳細な情報が不可欠である [10]。
- ▷ 「見える化」：「計測」段階で取得した生産情報およびエネルギー関連の情報を関連付け，IT 技術を駆使し細かに分析を行う。次ステップの準備段階として，問題点などを洗い出すため，エネルギー消費を包括的に分析して特徴づけを行い，理解が容易な形でその結果を提供する必要がある。
- ▷ 「削減」：分析された生産，エネルギー情報をもとに工場内での無駄の削減，および設備や機器の最適化を行うことでエネルギーの削減に繋げる。
- ▷ 「管理」：見える化ステップで取得した生産情報とエネルギー情報をもとに改善を行う。工場内のエネルギー情報や生産情報を監視し，単位製品あたりのエネルギー消費量（エネルギー原単位）を把握することでエネルギー使用効率の改善につなげることができる。

一連のステップを繰り返し，リアルタイムでこれらの PDCA サイクルを循環させることで，生産性とエネルギー使用効率を向上させることが FEMS の主目的である。他にもスマート工場における技術開発も積極的に行われており，IoT（Internet-of-Things）デバイスを搭載したセンサーネットワークでの自動化，サプライチェーンの統合によるデータ標準化などが

挙げられる。また、製造実行情報と関連付けての管理が可能な情報連携環境の開発によって解決しようという試みが行われている [11]。

次に「プロセス」レベル，すなわち製造現場レベルに注目する。製造現場，工場内における最も消費電力量が多い機械の一つとして，金属加工を行う工作機械が挙げられる。工作機械の省エネルギー化を図る手法としては，工作機械そのものを省電力タイプになるよう改良する方法と，運用方法を変更することで省エネルギー化を図る方法に大別できる [12]。前者と後者では，工作機械を省エネタイプにする前者の方がエネルギー削減効果が高いが，機材の更新をする必要があるため多大なコストが生じる。後者の運用面での取り組みも積極的に研究されており，加工経路の改善 [13] や，クーラントポンプなどの周辺機器の台数や制御方法の最適化 [14]，高速加工による加工時間の短縮などが挙げられる [15]。また，運用面でのエネルギー消費量削減のためには，エネルギー使用量を製造システムで実行されている操作と相関させる仕組みが必要である [16]。

本項で取り上げた省エネルギー化のための手法は，いずれも非常に有用な手段である。しかしながら，少なからず問題点や導入までに障壁が存在する。FEMS は工場全体を管理し最適化を行うシステムであるが，多くの場合は見える化の段階にとどまり，その次のステップである「削減」や「管理」まで到達していない場合がほとんどである。工作機械の改良については，直接的かつ非常に効果的な手段であるが，新たに工作機械を導入する必要があるため，コスト面でのハードルが存在し，工作機械メーカーに依存する点が大きい。そこで，工作機械そのものに依存しない，これまで述べた手法とは異なる観点からの省エネルギー化手法として，スケジューリングによる消費エネルギー削減の試みが活発化している。

2.3 生産システムにおけるエネルギー効率性尺度

一般的に省エネルギー化の効用は，単純な消費エネルギーの削減量だけではなく，製品製造に要するコストとの比率などにより評価される。具体的な評価指標として，エネルギー原単位，およびエネルギー効率性が用いられている。エネルギー原単位は，一定期間内のエネルギー消費量を同期間内の生産活動量で除算したものと表される。生産活動量は省エネ法で「エネルギーの使用量と密接な関係がある値」と表記されており，事業者が業種や分野ごとに適した指標を選択し使用する。製造業においては，生産量，製品価格，原料・中間製品量などの使用率が高い。消費エネルギーを $V(\text{kJ})$ ，生産活動量を $N(\text{kg})$ とおくと，エネ

ルギー原単位 $E_0(\text{kJ/kg})$ は次の通り表される：

$$E_0 = \frac{V}{N}. \quad (2.1)$$

式 (2.1) によると、エネルギー原単位は単位生産活動量あたりの消費エネルギーを表しており、省エネルギー化を図るにはエネルギー原単位の数値の最小化を目指す必要がある。そのためには消費エネルギーの低減、または生産活動量の増加が必要となる。しかしながら、事業者による省エネルギー化の取り組みの有無にかかわらず、生産活動量の変動によりエネルギー原単位が悪化するケースが存在する [17]。

一方で、エネルギー効率性は、一般的にはシステムに入力したエネルギーに対する出力の比率として定義され、発電や動力など主にエネルギーの変換効率を指し、熱力学的な意味合いで使用される場合が多い。製造業におけるエネルギー効率性は、生産システムに投入した総エネルギー量に対する生産高の比率を意味する。生産高は、生産物の数量や質量、および収益として表され、消費エネルギーを $V(\text{kJ})$ 、生産高を $P(\text{kg})$ とすると、エネルギー効率性 $E(\text{kg/J})$ は次式の通り表される [18]：

$$E = \frac{P}{V}. \quad (2.2)$$

式 (2.2) はエネルギー原単位の逆数に近いが、単位量は消費エネルギーで固定されている、エネルギー効率向上のためには、生産高を維持しながら消費エネルギーの低減、または投入する総エネルギー量を維持しつつ、生産高を増加させることが肝要である。

これらのエネルギーに関連する評価指標を改善する具体的手法はいくつか存在する。ひとつは、前項で取り上げた製造現場レベルでの取り組みである。直接的に工作機械、およびその運用方法を改善することで、上記式の消費エネルギー部分が減少し、評価指標の数値が改善される。もうひとつは、生産計画レベルでの取り組みである。こちらは直接的に消費エネルギーの削減を行うわず、消費エネルギーを維持しつつ生産高を向上させることで、評価指標の数値を改善する手法である。具体的手法はいくつか存在し、ひとつはアイドルングストップや加工速度を落とすなど、需要電力を下げることでピークの低減を図る方法がある。加工速度を落とした場合、製品生産の速度が低下する恐れがあるが、エネルギー効率性の生産高には収益の要素も含まれているため、消費エネルギー量により生じるコストが低減されればその金額に応じてエネルギー効率性は向上する。もうひとつの手法はピークシフトである。生産設備の稼働時間やタイミングを意図的にずらし、消費電力のピークを低減する手

法である。実際に、消費電力量が大きい機械を稼働させる場合には、他の設備を一時停止させ、電力にピーク値に配慮し融通する措置が取られる。このように、生産設備のエネルギー消費量に影響を及ぼすのは、機械そのものの改善により直接消費電力量を削減する技術的な手段、そして、エネルギー消費を意識した生産計画の立案、およびそれに準じた生産設備の制御を行う、管理面での手段である。

2.4 生産スケジューリング問題

本研究では、製造システムのグリーン化を図るために、エネルギー消費を意識した生産計画、スケジューリングによるエネルギー効率化に注目した。生産スケジューリング問題は、機械台数や機械の生産能力にもとづき、与えられたジョブに対して設備、作業者を割り当てジョブの処理順序を決定する、最適な生産計画を決定するための意思決定プロセスである。一般的には、ジョブに対し、複数の目的関数を最適するように、定義された制約条件にしたがい、有限の資源に割り付ける問題である。このとき、ジョブは複数あるいは単一のタスクにより構成される。

2.4.1 記号の定義

本研究では、任意のスケジュール上での要素と属性を下記の通り表すものとする。

J_i : ジョブ i ($i = 1, \dots, N$)

M_k : 機械 k ($k = 1, \dots, N$)

T_{ik} : ジョブ J_i の機械 M_k 上でのタスク

p_{ik} : ジョブ J_i の機械 M_k 上での処理時間

c_{ik} : タスク T_{ik} の完了時刻

c_i : ジョブ J_i の完了時刻

r_i : ジョブ J_i の生産システムへの投入時刻

2.4.2 数理モデル

次に、スケジューリング問題などで用いられる数理最適化、および一般的な数理モデルを示す。数理最適化とは、現実の事象や実際の問題を数式として書き起こすことを経由して、最適解、およびそれに近い解を得るための方法論である [19]。数理モデルは、目的関数となるひとつの数式と、いくつかの満たすべき条件を記載した制約式により構成される。

ここで変数 y_{ij} を操作 (i, j) の開始時刻を表すものとした場合の、基本的なメイクスパンを最小化する数理モデルの例を下記に示す。

▷ 目的関数：

$$c_{\max} \rightarrow \min. \quad (2.3)$$

▷ 制約条件：

$$y_{kj} - y_{ij} \geq p_{ij} \quad ((i, j) \rightarrow (k, j) \in \mathbf{A}). \quad (2.4)$$

$$c_{\max} - y_{ij} \geq p_{ij} \quad ((i, j) \in \mathbf{N}). \quad (2.5)$$

$$y_{kj} - y_{il} \geq p_{il}, \quad y_{il} - y_{ij} \geq p_{ij} \quad ((i, l), (i, j), i = 1, \dots, m). \quad (2.6)$$

$$y_{ij} \geq 0 \quad ((i, j) \in \mathbf{N}). \quad (2.7)$$

集合 \mathbf{N} は全ての操作 (i, j) の集合、集合 \mathbf{A} は、ジョブ j が機械 k で処理される前に機械 i で処理される制約 $(i, j) \rightarrow (k, j)$ の集合である。式 (2.4) は制約集合 \mathbf{A} について、操作 (i, j) が完了する前に操作 (k, j) が開始できないことを表している。次に、式 (2.6) は同機械上で処理される異なるジョブの間に、なんらかの順序が存在することを表している。

2.4.3 評価指標

まず、計画期間で得られる加工中の性能測定値を定義する。ここで $N(t)$ と $V(t) (t > 0)$ をそれぞれ、 t における生産高と消費された電気エネルギーを表すとする。

目標とする製造システムのエネルギー効率は、時刻 t における $E(t)$ で表され、次のように与えられる：

$$E(t) = \frac{N(t)}{V(t)}. \quad (2.8)$$

また、 t における生産速度 $P(t)$ と単位生産高あたりのサイクルタイム $C(t)$ は、 $N(t)$ を用いて次のように定義される：

$$P(t) = \frac{N(t)}{t}. \quad (2.9)$$

$$C(t) = \frac{1}{N(t)} \sum_{i=1}^{N(t)} (c_{i+1} - c_i). \quad (2.10)$$

さらに、生産終了時に得られた情報をもとにした、以下の静的評価指標を考慮する。

▷ 総エネルギー消費量： V 。

▷ エネルギー効率性：

$$E = \frac{N}{V}. \quad (2.11)$$

▷ サイクルタイム：

$$C = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (c_{i+1} - c_i). \quad (2.12)$$

▷ 単位個数あたりの製造リードタイム：

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (c_i - r_i). \quad (2.13)$$

ここで、加工前の準備・段取り時間は加工時間に含まれると仮定する。

2.5 エネルギー効率化スケジューリング

工作機械のアイドリング時には多くのエネルギーが費やされる [3]。この際、アイドリング時間や機械故障により生じるダウンタイムは生産性向上に寄与しない。したがって、生産ラインや工場レベルでは、生産計画およびスケジューリングにより、エネルギー効率を改善することが可能である [20]、すなわち、エネルギー効率を考慮したスケジューリングの意義は、これらの生産性に寄与しない非生産時間を削減することにある。アイドリング時の消費エネルギー削減の観点から見ると、アイドリング時に工作機械のシャットダウンを行うことや、エコモードを含めた機械の適切な利用によって改善できる。また、工作機械や加工工程、生産スケジュール、そして気温などの生産システムが置かれた環境が同一であれば、外的要因がない限りシステム全体のエネルギー消費量は変動しない。

Mouzon らは、多目的および単機スケジューリング問題を解くためのフレームワークを提供している [21]。このフレームワークでは、多様な解が得られることを示した。他にも、Mansouri らはエネルギー効率を意識したスケジューリングとしてグリーンスケジューリングの新しい概念を紹介し、総エネルギー消費量とメイクスパンを目的関数として、可変処理時間を含む多目的数理モデルを提案し、その最適化フレームワークを、シーケンスに依存した 2 台のマシンフローショップのスケジューリング問題に適用した [22]。He らは、計画段階で適切な工作機械を選択し、作業をシーケンス化することで、フレキシブルジョブショップにおける省エネ最適化手法を提案し、エネルギー最適化問題の数理モデルを提供し、メイクスパンとエネルギー消費量のトレードオフを示した [23]。Fang らは、スケジュールの生産性を最大化するだけでなく、カーボンフットプリントとピーク負荷を最小化することを目的としたショップフロアスケジューリング問題を検討し、提案手法を 2 機械ジョブショップ問題に適用することで、これらの基準間のトレードオフの可能性を明らかにした [24]。Bruzzone らは、APS システムにエネルギーを考慮したスケジューリングモジュールを統合することを提案した [25]。

計画立案の観点からは、エネルギー効率の基準を生産計画・スケジューリングの評価・意思決定プロセスに組み込むことを目的とした EnergyBlock の概念を導入した生産計画手法が提案されている。Rahimifard らは EnergyBlocks と同様のフレームワークを提案しており、一つの製品を生産する際のエネルギー使用量の詳細な内訳をモデル化している [26]。Samukawa らは、製造システムにおけるエネルギー効率の高い運転のための概念的なフレームワークを、主に工作機械を用いて提案している [27]。この枠組みでは、実際の加工データをもとに、エネルギー負荷プロファイルと工作機械の加工モードを利用している。また、資源量に変化する資源制約型プロジェクトのスケジューリング問題と多モード加工の問題に基づいて、エネルギー負荷プロファイルを求める概念的な問題を定式化した。

他にも、製造システムのシミュレーションの分野においてもエネルギー消費を考慮したアプローチが存在する。Hibino らは、エネルギー消費量と生産性を評価するための計算機シミュレーションシステムを開発した [28]、この研究では、エネルギー消費量と生産性を評価するためにシミュレーションシステムに実装すべき重要な要件を分析し、また評価システムを半導体製造システムに適用することでその効率性を実証した。エネルギー効率の高いスケジューリングのための様々なモデルや手法が提案されており、そのいくつかは、[3]、[29] に

記載されている。しかしこれらの研究は、製造工程におけるエネルギー消費の物理的な現象を考慮しておらず、スケジューリング決定モデルの構築にのみ焦点を当てている。

2.6 まとめ

本章では、製造業を取り巻くエネルギー事情、そして関連する省エネルギー化を指向する研究や技術について述べた。加工機械の改良などのハードウェア面でのアプローチだけではなく、工場やプラントレベルでエネルギー管理を行うシステムの開発など、ソフトウェア面でのアプローチも積極的に行われている。本研究では、特にスケジューリングによりエネルギー効率化を図る手法に焦点を当てている。スケジューリングによるエネルギー効率化は、生産性に寄与しない非生産時間の削減により可能となる。関連するエネルギー効率を考慮したスケジューリングの研究は種々存在し、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。製造システムのシミュレーション分野においても、エネルギー消費を考慮した研究が存在している。しかしながら、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、現実には則した技法の研究は途上である。

参考文献

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁, 令和 2 年度 エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2020) , pp.108-243, <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2020pdf/>, (2020 年 11 月 5 日最終アクセス) .
- [2] 経済産業省資源エネルギー庁, 平成 30 年度 省エネルギー政策立案のための調査事業 (工場等及び荷主の判断基準遵守状況等分析並びに電子化推進に向けた調査事業) 調査報告書, pp.86-94, https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/enterprise/factory/support-tools/, (2020 年 11 月 5 日最終アクセス) .
- [3] J. R. Duflou, J. W. Sutherland, D. Dornfeld, C. Herrmann, J. Jeswiet, S. Kara, M. Hauschild, and K. Kellens, Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach, *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, **61-2** (2012) pp.587–609.

- [4] D. A. Dornfeld, Green manufacturing – Fundamentals and applications, *Springer*, NY (2013).
- [5] グリーン購入ネットワーク (GPN), グリーン購入基本原則, https://www.gpn.jp/assets/pdf/gpn_kihongensoku20181217.pdf, Performance measurement for green supply chain management (2020 年 11 月 20 日最終アクセス).
- [6] M. J. Baker, The marketing book fifth edition, (2003) pp.726–727.
- [7] W. J, Zhang, C. A. V. Luttervelt, Toward a resilient manufacturing system, *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, **60**-1 (2011) pp. 469–472.
- [8] S. Rahimifard, Y. Seow, T. Childs, Minimising embodied product energy to support energy efficient manufacturing, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **59**-1 (2010) pp.25–28.
- [9] M. Kachi, Y. Yoshimoto, H. Makita, N. Nozue, Y. Shida, S. Kitagami and J. Sawamoto, FEMS: Factory energy management system based on production information, *Recent Advances in Energy and Environment Integrated Systems*, (2013) pp.41–46.
- [10] T. Behrendta, A. Zeinab, S. Min, Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools, *CIRP Annals*, **61**-1 (2012) pp.43–46.
- [11] 小松原宏祐, 佐藤愛美, 木下守克, 木下利明, 生産システムにおける製造実行と機器制御との密な情報統合 (第 6 報) MESX-ORiN ゲートウェイシステムの開発; 2007 年度精密工学会秋季大会学術講演会公園論文集, pp.413-414.
- [12] 藤嶋 誠, 小田 陽平, 森 雅彦, 工作機械の省エネルギー, 精密工学会誌, **78**-9 (2012) pp.752–756.
- [13] A. Rangarajan, D. Dornfeld, Efficient tool paths and part orientation for face milling, *CIRP Annals*, **53**-1 (2004) pp.73–76.
- [14] Y. Oda, Y. Kawamura, M. Fujishima, Energy consumption reduction by machining process improvement, *Procedia CIRP* **4** (2012) pp.120–124.

- [15] M. Mori, M. Fujishima, Y. Inamasu, Y. Oda, A study on energy efficiency improvement for machine tools, *CIRP Annals*, **60**-1 (2011) pp.145–148.
- [16] A. Vijayaraghavana, D. Dornfeld, Automated energy monitoring of machine tools, *CIRP Annals*, **59**-1 (2010) pp.21–24.
- [17] A. Ogawa, F. Noda, 省エネ法の工場等規制におけるエネルギー原単位評価の分析, エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, **35** (2019) pp.20–4.
- [18] S. Thiede, Energy efficiency in manufacturing system, *Springer*, (2011) pp.30–34.
- [19] 久保 幹雄, J. P. Pedroso, 村松 正和, A. Rais, あたらしい数理最適化 Python 言語と Gurobi で解く, 近代科学社, (2012) pp.2–18.
- [20] A. Fysikopoulos, G. Pastras, T. Alexopoulos, G. Chryssolouris, On a generalized approach to manufacturing energy efficiency, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **73** (2014) pp.1437–1452.
- [21] G. Mouzon, and M. Yildirim, A framework to minimise total energy consumption and total tardiness on a single machine, *International Journal of Sustainable Engineering*, **1**-2 (2008) pp.105–116.
- [22] S. A. Mansouri, E. Aktas, and U. Besikci, Green scheduling of a two-machine flow-shop: Trade-off between makespan and energy consumption, *European Journal of Operational Research*, **248**-3 (2016) pp.772–788.
- [23] Y. He, Y. Li, T. Wu, and J. W. Sutherland, An energy-responsive optimization method for machine tool selection and operation sequence in flexible machining job shops, *Journal of Cleaner Production*, **87** (2015) pp.245–254.
- [24] K. Fang, N. Uhan, F. Zhao, and J. W. Sutherland, A new shop scheduling approach in support of sustainable manufacturing, *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing* (2011) pp.305–310.
- [25] A. A. G. Bruzzone, D. Anghinolfi, M. Paolucci, and F. Tonelli, Energy-aware scheduling for improving manufacturing process sustainability: A mathematical model for

- flexible flow shops, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, **61**-1 (2012) pp.459–462.
- [26] S. Rahimifard, Y. Seow, and T. Childs, Minimising embodied product energy to support energy efficient manufacturing, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, **59**-1 (2010) pp.25–28.
- [27] T. Samukawa, and H. Suwa, An optimization of energy-efficiency in machining manufacturing systems based on a framework of multi-mode RCPSP, *International Journal of Automation Technology*, **10**-6 (2016) pp.985–992.
- [28] H. Hibino, T. Sakuma, and M. Yamaguchi, (2012) Evaluation system for energy consumption and productivity in manufacturing system simulation, *International Journal of Automation Technology*, **6**-3 (2012) pp.279–288.
- [29] C. Gahm, F. Denz, M. Dirr, A. Tuma, Energy-efficient scheduling in manufacturing companies: A review and research framework, *European Journal of Operational Research*, **248**-3 (2016) pp.744–757.

第3章 計測制御プラットフォームの開発

3.1 緒論

2 章にて紹介したが、製造のグリーン化を実現する上で、設備の待ち時間やダウンタイムに由来する無駄なエネルギーを削減するため、エネルギー消費の見える化は必要不可欠な要素である [1]。見える化技術の一つとして、Makita らは実際のエネルギーと生産情報を収集し、生産システムにおけるエネルギーの無駄を把握することで、工場全体の省エネルギー化を実現する e&eco-F@ctory を開発した [2]。

著者は、エネルギー効率化スケジューリング実現の第一段階として見える化技術に注目し、リアルタイムでの消費エネルギー測定が可能な計測制御プラットフォームの開発を行った [4]。本プラットフォームは計測対象を柔軟に切り替えることができ、接続対象となる物理システムとして小型のフレキシブルトランスファーライン (Flexible Transfer Line ; FTL) を使用することで、物理シミュレータとしての運用を行う事が可能である。リアルタイムに計測した消費電力や材料 (ワーク) の流れを根拠とすることで、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えることが期待できる。本項ではミニチュア FTL を接続した計測制御プラットフォームを物理シミュレータとして運用し、その有用性および汎用性について考察する。

3.2 計測制御プラットフォームの概要

図 3.1 は、著者が構築してきた計測制御プラットフォームのフレームワークを示している。計測制御プラットフォーム (図 3.1) は、消費電力データとそれに付随する切削抵抗や熱変位などの物理データを、実製造システムからリアルタイムで同時に直接収集することが可能である。このプラットフォームは、電流や電圧を計測するためのデータ収集モジュール、EtherCAT, USB, あるいは PLC を介して装置を制御するための組み込みリアルタイムコントローラで構成されている。計測オブジェクトや制御オブジェクト用のドライバやソフト

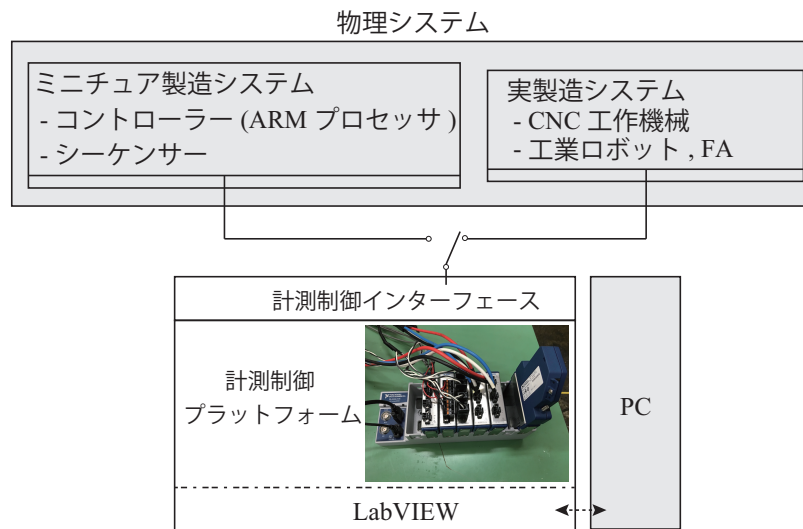


図 3.1: 計測制御プラットフォーム フレームワーク [3]

ウェアライブラリを用意することが前提だが、目的とする製造システムのハードウェアコンポーネント固有の物理特性をプラットフォームに組み込むことで、専用のエネルギー消費モデルがなくとも、エネルギー効率の最適化を目的としたグリーン製造システムのシミュレーションを効率的に開発することが期待できる。またプラットフォームには、各製造コンポーネントのシーケンス/スケジュールを提供するスケジューラを接続することが可能である。

このプラットフォームは、ユーザインタフェースを含むソフトウェア全体が LabVIEW でコーディングされており、追加の測定や制御に関する機能も同様に構築可能である。図 3.2 は LabVIEW プログラムのグラフィカルなソースコードであるブロック図の一部を示している。コード化されたブロック図は、並列に計測や制御を行うデータの流れを記述している。したがって、接続された製造システムのアーキテクチャやレイアウト、マテリアルフローは基本的に独立しており、他の物理システムにも適用可能である。また先述したとおり、本項ではミニチュア FTL モデルと接続し、物理シミュレータとしての運用を行う。

本研究では、共通してこの計測制御プラットフォームを使用して消費エネルギーと生産性の測定を行っている。

3.2.1 ミニチュアフレキシブルトランスファーライン

本項では、接続対象の物理システムとして、Fischertechnik 社製であるミニチュア FTL の工場モデルを採用した。工場の構成内容は、フライス盤とドリル盤（工作機械 1 と 2）、搬

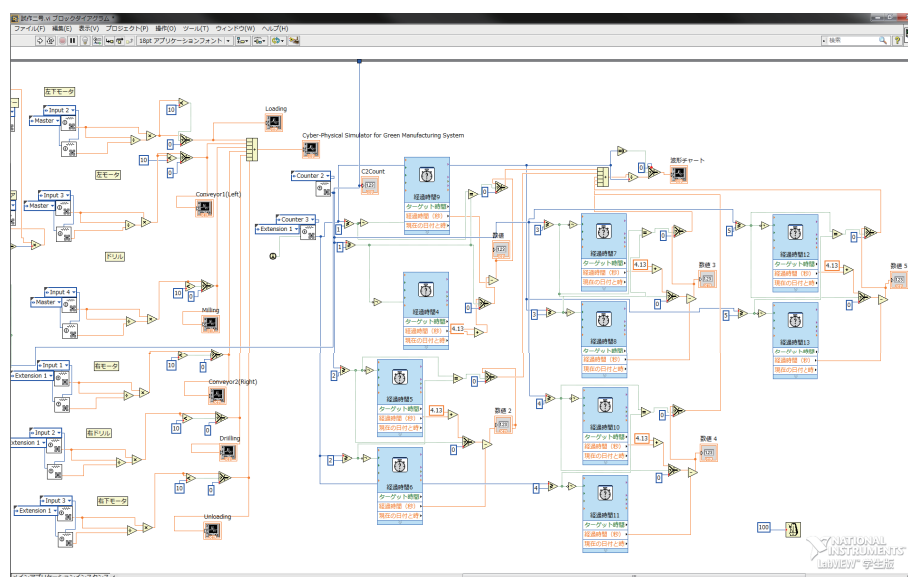


図 3.2: コーディングしたブロック図の例 [4]

入ベルトコンベア，搬出ベルトコンベア，および2つのプッシャーで構成される．ベルトコンベアとフライス盤，およびボール盤のメインスピンドル部分はサーボモータによって駆動し，ミニチュアFTLに搭載されている RoboTX コントローラを介し，LabVIEW システム上で制御および計測することが可能である．また，モータ制御スケジュールを正確に記述することで，実際の工作機械の電力プロファイルをシミュレータで再現することが可能である．

ミニチュア FTL は，図 3.3 のようにプッシャーを制御するための2つのスイッチングセンサ，ワークを検出するための5つの近似センサが搭載されており，数字の3と6はスイッチングセンサの位置を，残りの1，2，4，5，7は近似センサを表している．

図 3.3 の左下からワークがシステムに搬入，センサ1で検出され，搬出コンベアに沿って製品（ワーク）の排出をセンサ7で検出することができる．不確実性に起因する処理遅延により発生するスタックは，スイッチングセンサ3，6でプッシャーの動きのタイミングを制御することで解消が可能である．

図 3.4 は，各コンポーネントとシステム全体の消費電力をリアルタイムで認識し，その変化を監視可能なインタフェースである．消費電力を現す波形は1秒ごとに更新される．製造リードタイムやサイクルタイムなど，生産性に関する情報もセンサから取得した情報をもとに平行してリアルタイムでの計測が可能である．

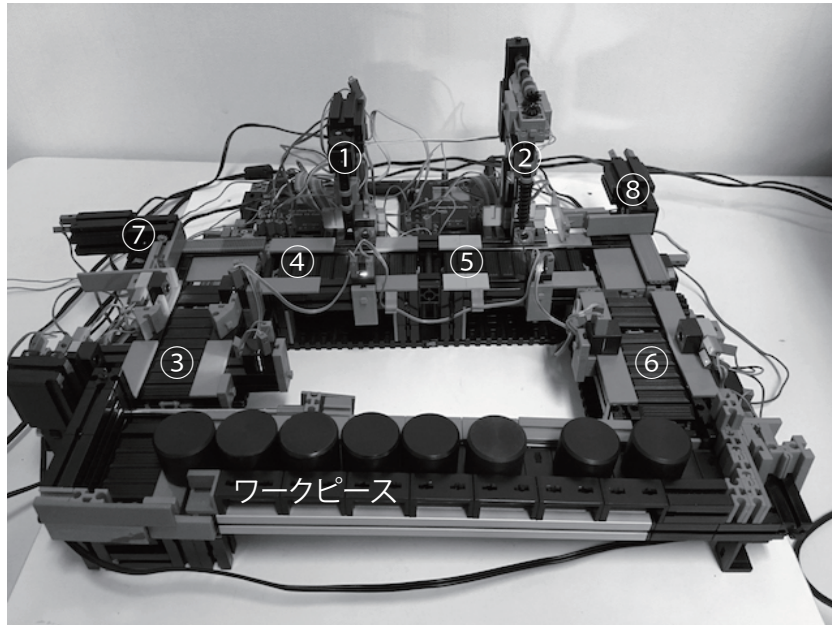


図 3.3: ミニチュア FTL 俯瞰図 [4]

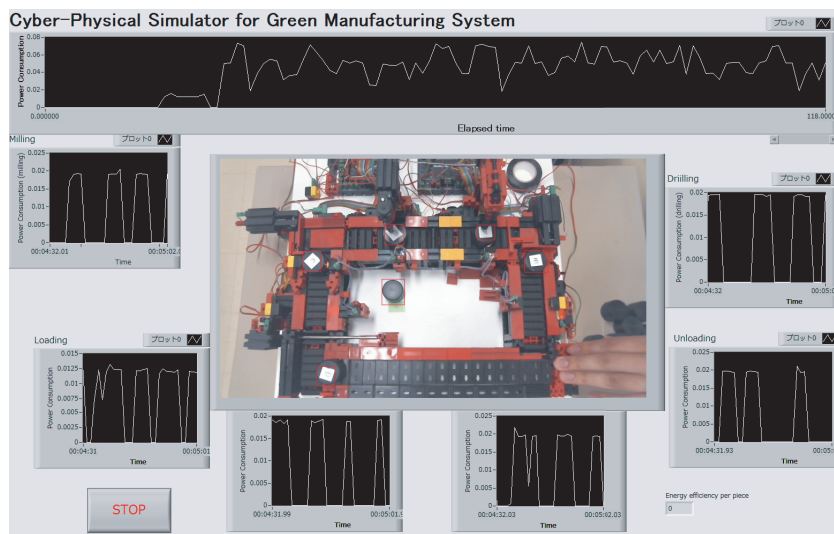


図 3.4: エネルギー消費量および生産性監視 UI [4]

3.2.2 簡易スケジューラ

本研究では、生産システムの生産性とエネルギー効率を運用段階の観点から評価を行うために、簡易的なスケジューリング機能の実装を行った。スケジューラの実装には大きく分けて2つのアプローチが存在する。1つは、既に記述されている C/C++ や Python のコードを呼び出す方法、もう一つは LabVIEW 上で直接ブロック図を記述する方法である。ここで

は後者のアプローチを採用している。

3.3 スケジューリングモデル

3.3.1 FTL におけるスケジューリング

今回対象としたミニチュア FTL のスケジューリングモデルは、中間バッファと輸送時間を持つ 2 マシン順列フローショップスケジューリングモデルに基づいて記述することが可能である。また、時刻 T で N 個のワークが加工され、あらかじめ設定したサイクルタイム $C = T/N$ に従い一定間隔でシステムに搬入される。

以下の様に表記する：

J_i : ジョブ i ($i = 1, \dots, N$)

r_i : ジョブ J_i の投入時刻

p_{ik} : ジョブ J_i の機械 M_k 上での処理時間

s_1 : ベルトコンベア 3, 4 を介した、工作機械 1 までの搬送時間 (図 3.3 参照)

s_{12} : 工作機械 1, 2 間のベルトコンベア 5 上の搬送時間

s_2 : 工作機械 2 の工程終了後の、ベルトコンベア 6 上の搬送時間

c_{ik} : ジョブ J_i の機械 M_k でのタスク T_{ik} の完了時刻

c_i : ジョブ J_i の完了時刻

ワークの投入時間はサイクルタイムにより固定されており、ここでは $r_i = (i - 1)C$ ($i = 1, \dots, N$) と考える。ワークの加工開始予測時間は、 $r_i + s_1$ とする。工作機械 k におけるワーク i の加工完了時間 c_{ik} は、その直前のワーク $i - 1$ を用いて表すことができる。

$$c_{i1} = \max(r_i + s_1, c_{i-1,1}) + p_{i1}, \quad (3.1)$$

$$c_{i2} = \max(c_{i-1,2}, c_{i1} + s_{12}) + p_{i2}, \quad (3.2)$$

ここで、 $c_{01} = c_{02} = 0$ となる。 i 番目のワークは、 $c_i = c_{i2} + s_2$ でシステムから搬出される。本研究で考えるスケジューリングでは、次節で説明する性能を最小化 (または最大化) するため、ワーク N のシーケンスを決定する。

3.3.2 パフォーマンスの測定

本章では，生産終了時に得られた情報をもとに，前章 (2.4.3) 項で示した評価指標，総エネルギー消費量 V ，エネルギー効率性 E ，サイクルタイム C および製造リードタイム L について，静的な性能指標を算出し評価する．また， V , c_i , r_i はシミュレータ上のプラットフォームによって測定される．

3.4 ケーススタディ

40 個のワーク ($N = 40$) を FTL で加工し，計画期間 $T = 240$ sec の間に 2 つの製品 A, B, およびそれらの派生製品 a, b を生成するとすると，図 3.1 に示すように，各ワークは 6 秒ごとに 1 回目の加工工程に入る．このことから，各ワークは予測サイクルタイム $C = 6$ sec に基づいて，6 秒ごとに第 1 加工工程に入るものとする．また，ここでは次に示すサイクリックな 4 パターンの配列を考慮する： $A \rightarrow a \rightarrow B \rightarrow b \rightarrow A \rightarrow a \rightarrow \dots$ (単純化のため AaBb と表記)，ABab, BbAa, AbaB. A, B のいずれかが完了するまでは，シーケンスは A, B となる．図 3.5 は，コンベア上の搬送時間を 1 とした場合の各シーケンスのガントチャートであり， $s_1 = s_{12} = s_2 = 1$ 秒である．このシーケンスを用いることにより，工作機械における各ワークの加工時間が変更され，対応する各モータの回転数が変更される．

物理シミュレータを用いたシミュレーションをシーケンス毎に 3 回実施し，3.2.2 で紹介した性能指標を算出した．なお，シミュレーションのウォームアップ時間を考慮したため，最初の 10 ワークの結果は省略している．

シミュレーション結果を表 3.2 にまとめた．総生産時間は BbAa が最も優れた結果となり，次に AaBb, Abab そして AbaB が続く．

製造リードタイムについては AaBb のシーケンスが最も優れており，総生産時間とは異なる結果が得られた．実際のサイクルタイムは 6.2 から 6.6 と若干のばらつきがあり，予測サイクルタイム $c = 6$ に比べて大きくなっている．これは，ベルトコンベア間の開口部でワー

表 3.1: シミュレーション詳細 [4]

製品	A	B	a	b
生産量	14	16	6	4
p_{i1}	1	3	2	3
p_{i2}	4	2	4	1

表 3.2: シミュレーション結果 [4]

評価指標	シーケンス			
	AaBb	ABab	BbAa	AbaB
総生産時間 \tilde{T} [sec]	280.4	290.3	275.9	292.1
製造リードタイム L [sec]	20.8	21.3	21.5	22.3
サイクルタイム $C(\tilde{T})$ [sec]	6.3	6.6	6.2	6.6
総消費電力 $V(\tilde{T})$ [J]	60.0	76.5	75.3	116.7
エネルギー効率性 $E(\tilde{T})$ [pcs/J]	0.68	0.51	0.54	0.33

クがランダムに停止，または工作機械にワークが装填されたためであり，実際の製造システムではよく見られる事象だが，実際のサイクルタイムは6.2，6.6と予測値よりも大きくなっている．エネルギー消費量は，システム内での滞留時間に関しては製造リードタイムと相関があることが伺える．ジュール単位での実現エネルギー消費量及びジュール当たりの製品量でのエネルギー効率は，上記の生産性に関連する他の性能指標よりも有意に変動する．また，総合して見たときのエネルギー効率は，総エネルギー消費量と強い負の相関があることがわかる．

図 3.6 は，工程内性能指標であるワーク 1 個当たりのサイクルタイム $C(t)$ と生産速度 $P(t)$ の変化を示している．実際のサイクルタイムは 3 から 10 まで変動しており，シーケンス間で大きな差があるようだ．秒間の生産数で定義される生産速度は，総生産時間の結果と同様にシーケンスの影響を受けている．最後に，時間経過に伴うエネルギー効率を図 3.7 に示す．26 個目のワークが完成した後，エネルギー効率は一定の値に収束していることがわかる．また，ある時点を境にエネルギー効率が悪化しており，予期せず発生したダウンタイム（主に短時間の停止）が実際に起こったことを示している．

これまで観測された事象はミニチュア FTL で生じた物理現象に基づいたものであり，いくつかの事象は実際の製造システムにおいても十分起こりうるものであると考えられる．

3.5 まとめ

本項では，物理システムと接続した計測制御プラットフォームを物理シミュレータとして用い，リアルタイムでの計測と評価が可能なプラットフォームとしての有用性と汎用性について検討した．ここではミニチュア FTL を物理システムとして運用し，消費エネルギーや材料の流れ，生産性などをリアルタイムでの監視を行いつつ簡易的なスケジューリングシ

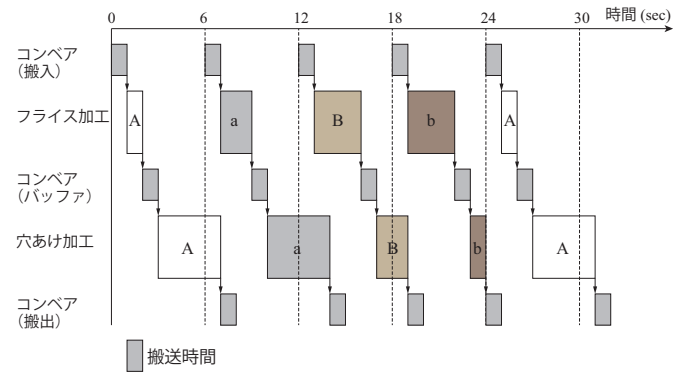
ミュレーションを行った。結果として以下の点が明らかになった。

- ▷ スケジュール/シーケンスがシステム全体のエネルギー効率に影響を与えていることが確認できた。
- ▷ 予期せず発生した物理的事象を、エネルギー効率、および生産性の観点から観測された。

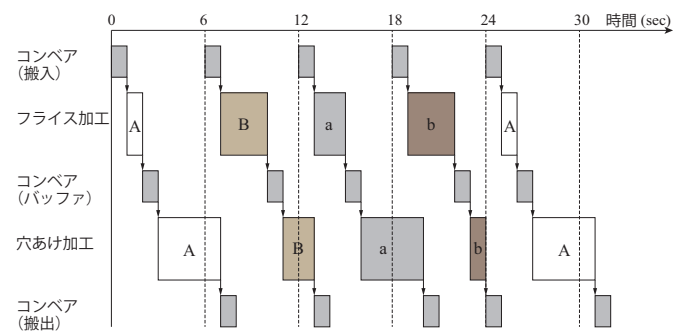
上記の結果をふまえると、リアルタイムでの消費エネルギー、生産性の計測が行えており、またそれに準ずる評価が行えたと言える。さらに、実システムを対象としたシミュレーションにおいて重要な要素として、予期していない物理的事象を計測し、結果として評価という形で反映されている。これらのことから、本プラットフォームはエネルギー効率化スケジューリングを行うに当たり、不可欠となる性能を有していると言える。

参考文献

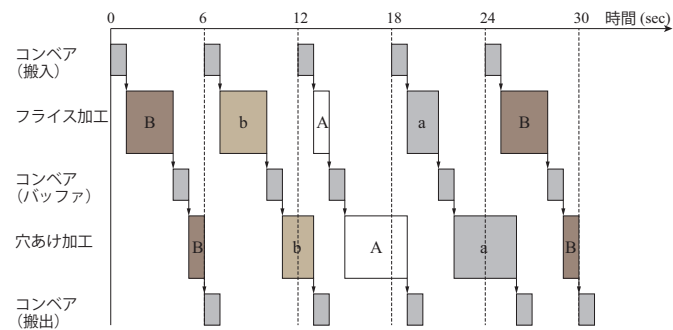
- [1] M. Kachi, Y. Yoshimoto, H. Makita, N. Nozue, Y. Shida, S. Kitagami, and J. Sawamoto, FEMS: Factory energy management system based on production information, *Proceedings of the 2nd International Conference on Integrated Systems and Management for Energy, Development, Environment and Health*, **50-4** (2012) pp.41–46.
- [2] H. Makita, Y. Shida, and N. Nozue, Factory energy management system using production information, *Mitsubishi Electric Advance*, **140** (2012) pp.7–11.
- [3] T. Samukawa, and H. Suwa, An optimization of energy-efficiency in machining manufacturing systems based on a framework of multi-mode RCPSP, *International Journal of Automation Technology*, **10-6** (2016) pp.985–992.
- [4] R. Yonemoto, H. Suwa, T. Samukawa, Evaluation of energy efficiency in scheduling by using cyber-physical manufacturing simulator, *International Symposium on Scheduling 2017*, (2017) pp.111–116.



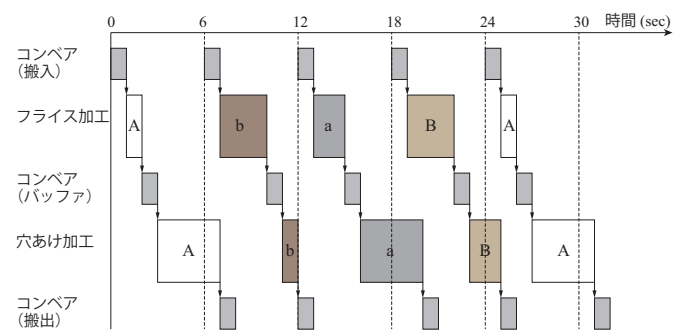
(i) $A \rightarrow a \rightarrow B \rightarrow b$



(ii) $A \rightarrow B \rightarrow a \rightarrow b$

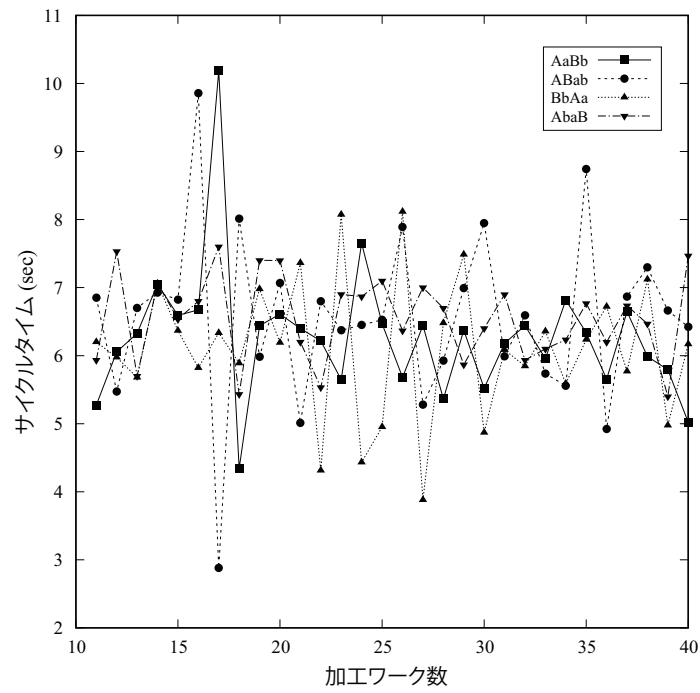


(iii) $B \rightarrow b \rightarrow A \rightarrow a$

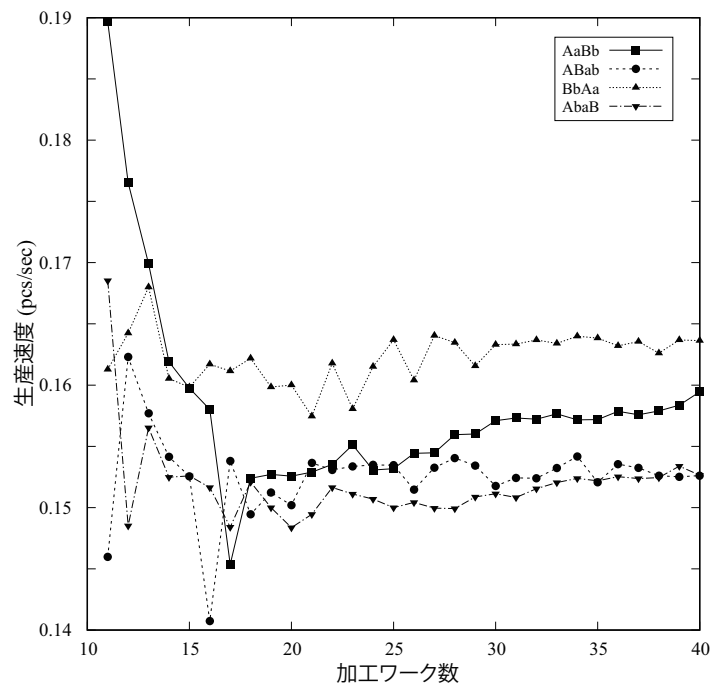


(vi) $A \rightarrow b \rightarrow a \rightarrow B$

図 3.5: 各シーケンスのガントチャート [4]



(a) サイクルタイム



(b) 生産速度

図 3.6: サイクルタイムと生産速度の経時変化 [4]

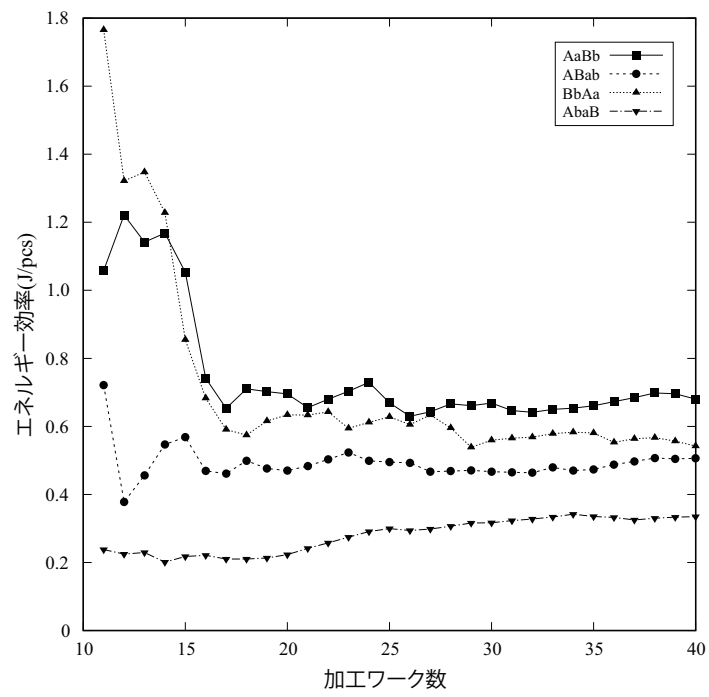


図 3.7: エネルギー効率のシミュレーション結果 [4]

第4章 ミニチュア製造システムによるエネルギーを考慮したスケジューリングの特性分析と評価

4.1 緒論

前章では、製造のグリーン化の第一段階として、著者が開発した柔軟に計測対象の切り替えが可能な計測制御プラットフォームの紹介、およびその有用性を示すためにケーススタディを行い、エネルギー効率化スケジューリングに必要な計測器としての要件を満たしていることを確認した。一般的には、「見える化」に際し生産性およびエネルギーに関する性能指標を関連付けて管理するため、製造実行システム (Manufacturing Execution System ; MES) とエネルギー管理システム (Energy Management System ; EMS) を連携、または Web サーバーを介したエネルギー関連データの収集、蓄積および分析することにより実現している [1]。

本章では次の「見える化」ステップとして、特定の物理システムで観測される消費エネルギー、および不確実な要素を含む物理的な計測データに基づき分析を行い、実際の製造環境に近い状況において、エネルギー効率と生産性にどのような関係性が生じるか検討する。

4.2 物理シミュレータ

前章で示した計測制御プラットフォームにミニチュア FTL を接続したものを物理シミュレータとして運用し、これを計測対象として実験を行い、実製造システムを使用した際に生じる計測結果への影響について述べる。本実験を行うに際し、計測制御プラットフォームおよびミニチュア FTL に対し変更を加えた。それぞれの変更点を図 4.1 と図 4.2 に示す。プラットフォームは、メイクスパン、サイクルタイム、製造リードタイムといった生産性に関する情報をリアルタイムで表示するように改良、さらに総消費電力を積み上げグラフで表示し、各モーターの消費電力の内訳をリアルタイムで観察可能にする機能を追加した。この他

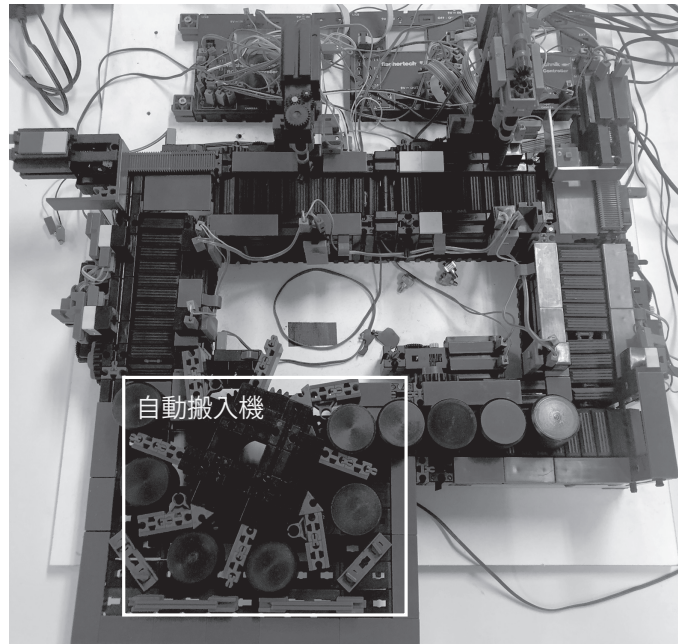


図 4.1: 改装物理モデル

の点に関しては、レイアウトの変化はあるものの、基本的な機能に変更はない。ミニチュア FTL については、より厳密に搬入操作を行うため、自動的にワークの搬入を行う自動搬入機を増設した。この自動搬入機は、予め搬入する時間間隔を設定しておくことで、システム起動後設定した通りの間隔で搬入操作を行う。また、その他の構造や機能については手を加えていないため、各種サーボモータや工作機械を呼称する際、前章 3.2.1 項、および図 3.3 を参照する。

本節では、開発したシミュレータを用いて、ワークの順序がエネルギー効率にどのような影響を与えるかを検討する。なお本実験では、可能な限りのパターンを観察するため、ブルーフォース方式のスケジューリング（シーケンス）を採用しており、ここでは性能指標の最適化は考慮していない。

4.2.1 生産計画

本研究では以下のような状況を考慮する：

- ▷ 60 個のワーク ($N = 60$) を FTL で加工し、4 つの異なる機械部品 A, B, C, D を計画期間 ($T = 360 \text{ sec}$) 上で生産する。
- ▷ 各部の量は均等に 15 とした。

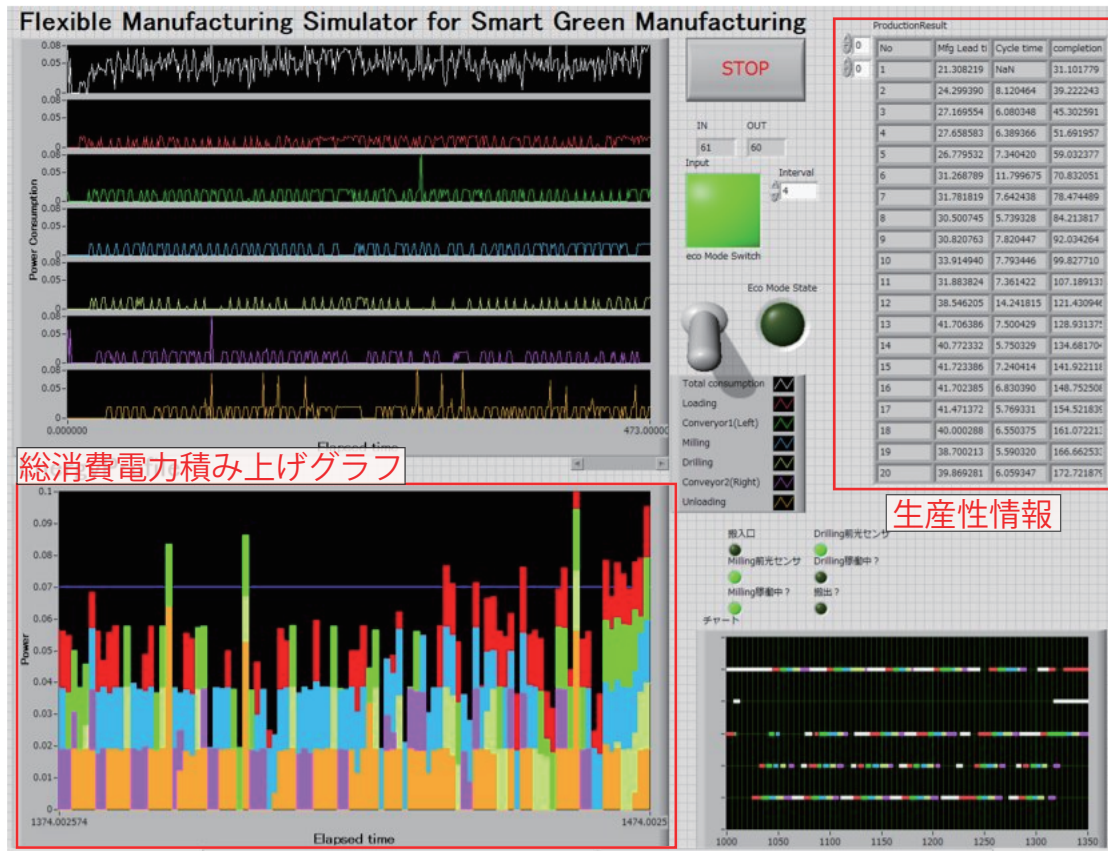


図 4.2: 計測制御プラットフォーム 改良インターフェース

- ▷ パート ● のマシン k 上での処理時間 p_k^\bullet : $(p_1^A, p_2^A) = (3, 6)$, $(p_1^B, p_2^B) = (4, 3)$, $(p_1^C, p_2^C) = (6, 3)$, $(p_1^D, p_2^D) = (3, 4)$.
- ▷ 測定値とその平均値から求めた輸送時間 $s_1 = 5$, $s_{12} = 3$, $s_2 = 5$.
- ▷ 図 3.3 のプッシャー 7 の移動時間は 6 sec に設定されている．コンベア 4 に待機しているワークを 3 sec で押し，3 sec で元の位置に戻る．
- ▷ また，図 3.3 中のプッシャー 8 の移動時間も 6 sec とした．
- ▷ 予測サイクルタイム $\hat{C} = T/N = 6$ sec.

部品の配列の影響を調べるために，合計 24 パターンすべての配列を検討した．シーケンスが決定されると，ワークはサイクリックに投入される．図 4.3 は，シーケンス ABCD で生成されたスケジュールの一例である．このシーケンスをシミュレータで読み込むことで，工作機械での各ワークの加工時間および各モータの回転数を変更される．

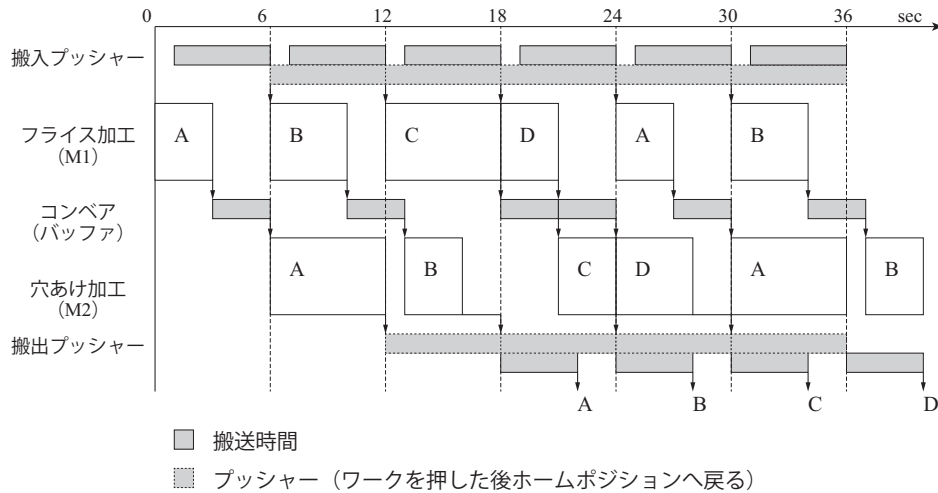


図 4.3: 予測スケジュール ABCD の例 [2].

4.2.2 結果と考察

物理シミュレータを用いたシミュレーションを 24 シーケンスごとに実施し、各ワークの消費電力と起動時間、搬送時間、加工時間、仕上時間の実測値に応じて、2 章 2.4.3 項で示した性能指標を算出した。

得られた動的性能、すなわちエネルギー消費量 $E(t)$ 、生産速度 $P(t)$ 、サイクルタイム $C(t)$ 、および $V(t)$ の全 24 シーケンスの値を、図 4.4 に示す。シミュレーションの実行中には、実際の自動化ラインでよく見られるように、ランダムなコンベアの混雑や予期せぬコンベアの停止が発生することがある。このようなトラブルは、当然ながらワークの処理完了が遅れ、生産性を低下させる原因となる。

各シミュレーションの実際のサイクルタイムは、理想的なサイクルタイム (\hat{C}) よりも大幅に大きく、7sec から 8sec に収束する傾向がある。また、生産速度もある値に収束する傾向がある。エネルギー関連性能 $E(t)$ と $V(t)$ は、シーケンスに応じて相対的に変化する。

全体的には、シミュレーションの初期段階での生産性やエネルギー効率の影響が大きいと考えられるため、最初の 2 回のシミュレーション実行結果（最初の 8 個のワークの処理）は、シミュレーションのウォームアップ期間とし考慮していない。

表 4.1 に、物理シミュレーションの結果を平均値、標準偏差 (SD)、変動係数 (CV)、二乗平均誤差 (RMSE) の順にまとめた。なおここで調査した条件では、平均でワーク 1 個当たりの電気エネルギーは 0.34 J であり、これは平均での全エネルギー効率の逆数でも計算可能である点に注意する必要がある。

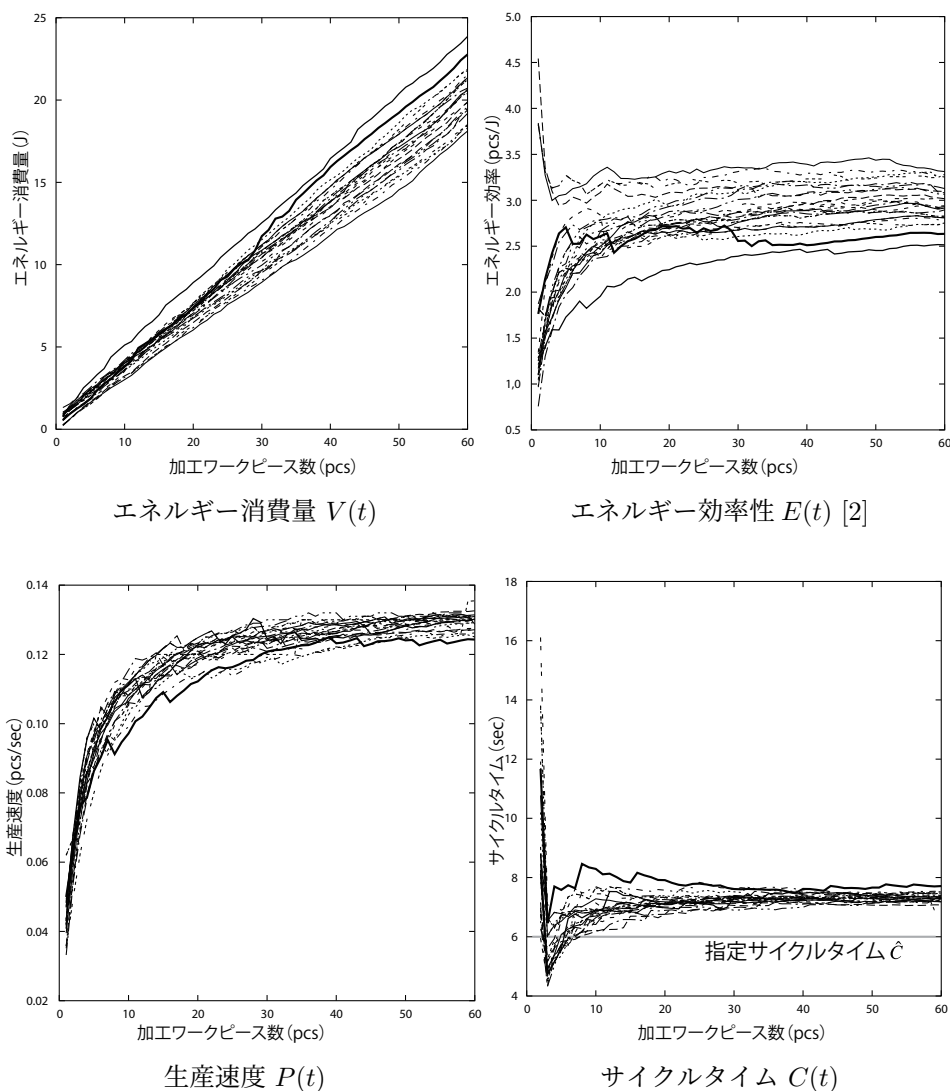


図 4.4: 全 24 シーケンスの動的性能評価の結果 [2].

総エネルギー消費量 V とエネルギー効率 E は部品の並びに応じて変動し、CV の結果、 V と E の変動は製造リードタイム L の変動とほぼ同じであることがわかった。

RMS 誤差によると、実際のサイクルタイムは 1.48 sec 遅れ、実際の製造リードタイムは 7.10 sec 長くなった。

また、スケジュール遅延の原因となる不確実性がない場合の全予測スケジュールの総エネルギー消費量の SD と CV を、シミュレーションで得られた機械 1, 2, コンベア, プッシャーの平均エネルギー消費量から算出した結果、 $SD = 0.049$, $CV = 0.0025$ となった。表 4.1 に示す実際の総エネルギー消費量よりも大幅に小さくなっており、これらの結果は、不確実性がエネルギー消費量に影響を与え、エネルギー効率にも影響を与えていることを示

表 4.1: 物理シミュレーションの結果：総エネルギー消費量 (V)，総エネルギー効率 (E)，
サイクルタイム (C)，製造リードタイム (L : 実績, \hat{L} : 予測) [2].

シーケンス	V [J]	E [pcs/J]	C [sec]	L (\hat{L}) [sec]
ABCD	17.68	2.69	7.44	26.39 (23.21)
ABDC	17.78	2.79	7.50	25.25 (23.00)
ACBD	18.40	2.64	7.55	25.11 (23.00)
ACDB	18.00	2.85	7.35	25.22 (23.00)
ADBC	19.66	2.60	7.88	36.85 (23.00)
ADCB	19.79	2.35	7.44	27.06 (23.21)
BACD	18.50	2.67	7.35	27.65 (23.50)
BADC	18.01	2.70	7.47	28.17 (23.29)
BCAD	16.81	2.91	7.51	30.58 (23.50)
BCDA	16.90	2.82	7.56	30.45 (23.29)
BDAC	17.17	2.81	7.42	31.16 (23.29)
BDCA	16.34	2.96	7.33	29.10 (23.29)
CABD	15.56	3.04	7.59	31.10 (23.00)
CADB	15.93	3.07	7.38	31.18 (23.00)
CBAD	16.57	3.09	7.60	30.00 (23.21)
CBDA	15.89	3.21	7.40	31.06 (23.00)
CDAB	15.62	3.27	7.65	30.59 (23.21)
CDBA	15.39	3.35	7.31	32.66 (23.00)
DABC	17.26	2.83	7.57	29.98 (23.29)
DACB	15.11	3.11	7.65	31.58 (23.50)
DBAC	16.72	2.79	7.30	29.55 (23.50)
DBCA	16.12	2.98	7.39	31.68 (23.29)
DCAB	16.53	2.87	7.20	31.85 (23.50)
DCBA	16.88	2.82	7.53	31.10 (23.29)
平均	16.991	2.917	7.473	29.804
SD	1.203	0.247	0.144	2.660
CV	0.0708	0.0846	0.0193	0.0892
RMSE	—	—	1.480	7.096

している。

表 4.1 の結果を見ると，生産性の高いシーケンスほどエネルギー効率が良いものと，生産性の高いシーケンスがあるように見える，この傾向は，パレート最適化によって調べることが可能である．図 4.5 に，エネルギー関連の性能指標に対する製造リードタイムを示す．図中の黒い四角は，24 個のシーケンスのうちパレート最適シーケンスを表しており，加えて比較的最適に近いシーケンスである下線部も参考として図 4.5 に示している．表 4.1 では，エネルギー効率が向上するシーケンスと，生産性が向上するシーケンスが存在することがわかる．

製造リードタイムに関しては，部分シーケンス AB または AC から始まる 4 つのシーケンスが有効である．これらのシーケンスのうち 3 つのシーケンスが，最もリードタイムの予測

に有用であることから明らかである。

一方、部分シーケンス D または C から始まるシーケンスは、図 4.5(a) に示すようにエネルギー消費量に効果があることがわかる。B の部分から始まるシーケンスは、中間的なものであると考えられる。部分シーケンス AB と AC については、図 4.5(b) でも同じ傾向が見られる。

図 4.5 の結果は、AB または AC で始まるシーケンスが生産性優先のスケジュールとみなされ、CDAB と CDBA、DACB はここで調査した状況下においてはエネルギーを意識したスケジュールであると言える。

以上のことから、生産性、エネルギー関連の性能指標が完全に劣るシーケンスを考慮しなかった場合、製造作業にスケジューリングの最適化を適用すると、選択したシーケンスに応じて製造リードタイムとエネルギー関連の性能指標との間でトレードオフになることがわかる。

4.3 まとめ

本章では、エネルギー効率化スケジューリングの第一段階として、グリーン製造における見える化技術に注目し開発した、リアルタイムでの消費エネルギーおよび物理データの測定が可能な計測制御プラットフォームを紹介した。また、計測制御プラットフォームの有用性を示すため、対象とする物理シミュレータを用いたシミュレーションを行い、生産スケジューリングにおける生産性とエネルギー効率の関係を検討した。

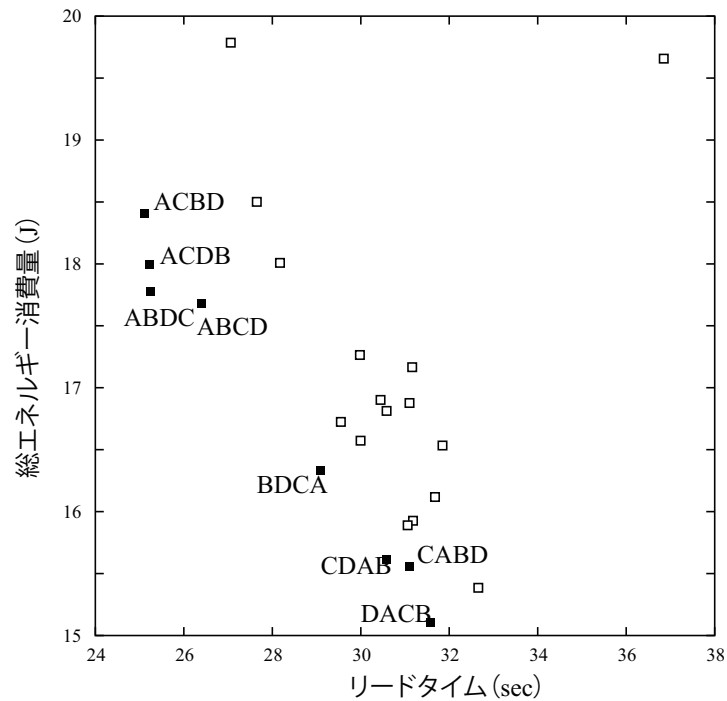
その結果、以下のような結論が得られた。

- ▷ 結論は以下の通りである。
- ▷ 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の間にはトレードオフが存在する。
- ▷ 開発した物理シミュレータは、本章で検討した条件でのスケジューリングにおけるエネルギー効率と生産性を評価することが可能である。
- ▷ 物理システムの物理データを用いた製造システムのシミュレーションが可能であることを示しており、合理的な結果が得られたと言える。

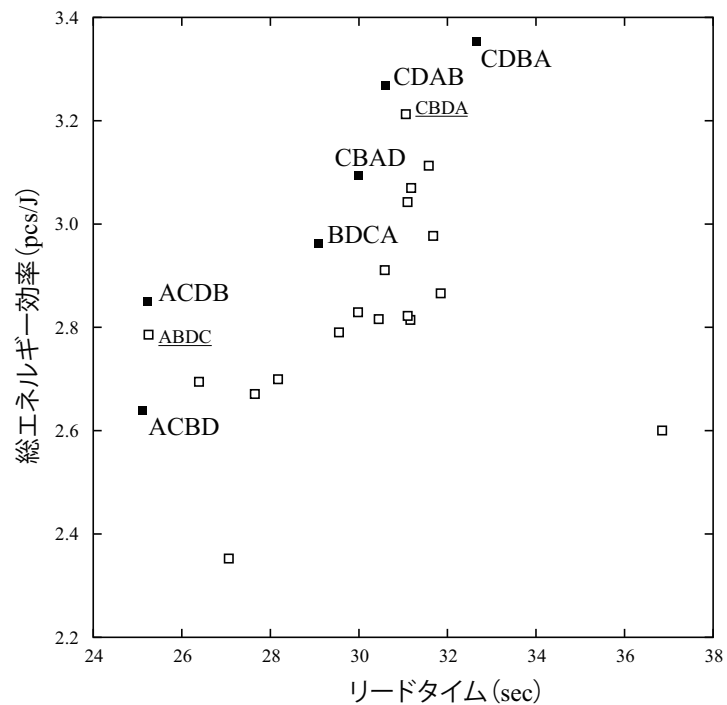
．上記の結果を踏まえると，開発を行った計測制御プラットフォームは，製造のグリーン化において不可欠となる見える化技術の要件を満たしているといえる．しかし，5 で述べたようなスケジューリングの最適化の問題は考慮されておらず，議論もされていないためエネルギーを考慮したスケジュールや生産性の高いスケジュールなど，好ましいスケジュールをリリースするように制御できる高性能スケジューリングオプティマイザの実装や接続が必要である．また，開発したシミュレータを実際の製造テストベッドに接続し，実用的なシミュレータとしての適用性と有効性を検討することも必要である．

参考文献

- [1] M. Kachi, Y. Yoshimoto, H. Makita, N. Nozue, Y. Shida, S. Kitagami and J. Sawamoto, FEMS: Factory energy management system based on production information, *Recent Advances in Energy and Environment Integrated Systems*, (2013) pp.41–46.
- [2] R.Yonemoto, H. Suwa , Evaluation of energy efficiency and productivity in scheduling by using physical simulator, *Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers*, **32**-5 (2019) pp.185–191.



(a) リードタイム (L) vs 総消費電力 (V) [2]



(b) リードタイム (L) vs 総消費電力 (E) [2]

図 4.5: 生産性とエネルギー効率

第 5 章 搬送マニピュレータの動作スケジュールによる EE の向上

5.1 緒論

本章では、これまでの研究の延長線上に、開発した計測制御プラットフォームを実際の製造システムに接続し、スケジューリングが製造業のエネルギー効率向上に及ぼす影響を検討する。対象とする製造システムのテストベッドは、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シンプルなフロー型フレキシブル製造システム（FMS）である。本研究では、典型的な機械スケジューリング（ジョブ処理の順序）に直接影響を与えるマテリアルハンドリングマニピュレータのタスクスケジューリングに着目し、開発した計測プラットフォームを用いて得られた電力消費量データをもとに、マニピュレータのタスクスケジューリングが製造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検討した。

さらにこの結果をもとに、エネルギー効率化スケジューリングへのアプローチとして、機械故障に対応するハンドリングマニピュレータの動作計画による、不確実な事象の発生に柔軟に対応する適応的動作を提案する。

5.2 関連研究

2 章にて取り上げたが、エネルギー消費量や生産量に関連する情報が見える化する、FEMS の開発が積極的に行われている。グリーン製造を端緒とするエネルギー消費量の見える化は、省エネや持続可能性を意識することを促す。しかしながら、製造業がより高いエネルギー効率と柔軟性を確立するならば、製造現場レベルで得られたエネルギー関連情報を上位の意思決定プロセスにフィードバックし、エネルギー効率と生産性の向上を両立させるシステムの構築が必要となる。このようなフィードバック手法を製造システムに実装する手法の一つとして、計算シミュレーションがその候補としてあげられる。Hibino らは、製造システムのエ

エネルギー消費量を評価するための計算シミュレーション手法を提案している [1-3]。他にも、シミュレーションを用いたエネルギー効率化へのアプローチは複数存在し、Herrmann らは AnyLogic を利用したエネルギー指向の製造システムシミュレーションツールを開発した [4]。Kohl らはプラントシミュレーション上でマテリアルフローの離散事象を強化し、個々の製品とその変種のエネルギー消費量を予測する方法論を提案した [5]。Garwood らは、機械・プロセス・工場構築の観点から、製造業における多層的な要素を組み合わせたモデリングアプローチとシミュレーションツールをレビューしている [6]。

5.3 システム構成

5.3.1 製造システムのテストベッド

本研究で試験した物理製造システムは、図 5.1 に示すように、CNC 旋盤 (Dura Turn 2550, DMG MORI)、3 軸マシニングセンタ (ROBODRILL α -T14iES, FANUC)、材料ハンドリングマニピュレータ (CR-7iA/L, FANUC) によりフロー型フレキシブル製造システムを構成している。

最初の加工工程である旋削加工は、図 5.2 に示すように、2 軸の CNC 旋盤 (M_1) と、3 つの爪を持つグリッパを備えた 6 軸のマテリアルハンドリングマニピュレータシステム (H_1) で構成された自動旋削セルによる旋削加工である。CNC 旋盤は材料加工用マニピュレータと連動しており、マニピュレータから CNC 旋盤への要求信号、またはその逆の要求信号により、ワークの着脱、NC プログラムの実行、旋盤のスライドドアの開閉操作が行われる。

マテリアルハンドリングシステムは、マニピュレータの両側に部品 (ワーク) 搬入テーブルと搬出テーブルの 2 つのワークテーブルで構成されており、ローディングバッファーには、ワークを反転させるための固定治具 (FJ) が付いている。

第 2 工程では、3 軸の立形マシニングセンタ (M_2) を使用する。人間の作業員 (H_2) が UB と M_2 の間でワークを管理し、 M_2 にワークをマウントした時点から、マウント解除したものとする。

5.3.2 消費電力測定

本章では、第 3 章で紹介した計測制御プラットフォーム [7–9]（以下計測システム）に拡張モジュールを追加したものを使用する。4ch アナログ電流入力モジュール (NI9227), 3ch アナログ 300 V 電圧入力モジュール (NI9225), 8ch アナログ 10 V 電圧入力モジュール (NI9201), 32ch デジタル 24 V 電圧入出力モジュール (NI9375) をメインプラットフォーム (cRIO-9064 または cDAQ-9178) に搭載した。計測システムの制御には LabVIEW を使用している。

図 5.3 は、3.1 節で紹介した計測システムと物理製造システムとの接続を示している。計測システムには工作機械を 3P3W で接続して電源ケーブルに入力し、電流はクランプセンサを用いて 3 点、電圧は圧着端子を用いて 2 点の計測点を設けた。

マテリアルハンドリングマニピュレータは単相 200 V を必要とするため、計測システムは 1P2W 接続で接続されている。製造システムのテストベッドからのアナログ電圧・電流データは全てメインプラットフォーム上で同期させ、USB デバイス（図の下の方）を経由して PC に取り込むことが可能である。アナログ電圧・電流データをサンプリングレートで測定した後、有効電力を算出している。測定システムは、平均電力を秒単位で計算している。

5.4 製造テストベッドにおける加工プロセスとスケジューリング

5.4.1 加工プロセス

3.1 節で紹介した製造システムのテストベッドにおいて、直径が 60 mm、高さが 20 mm の円柱状の A2024 合金を切削加工し、所定の部品を製造する加工工程を検討した。

加工工程は、旋削加工 (第 1 工程) とミーリング加工 (第 2 工程) の 2 つの副工程から構成

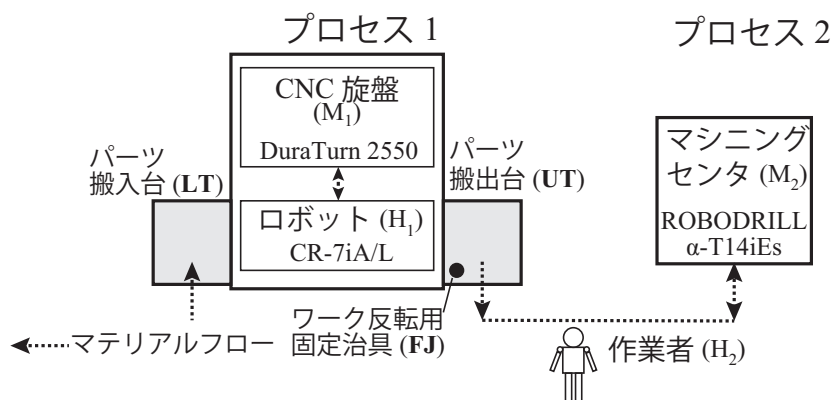


図 5.1: 2 工程生産システムのテストベッド [10]

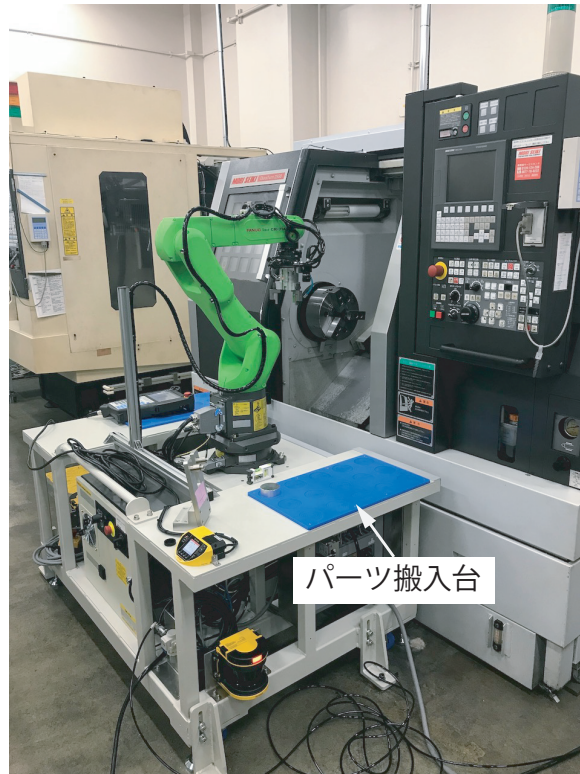


図 5.2: CNC と連動するマテリアルハンドリングマニピュレータ [10]

されている。図 5.4 に示すように、工程 1 では、 M_1 で中ぐり加工と外周加工を行い、工程 2 では、 M_2 で 4 つの円弧加工を行った。製造部品には、様々な内・外・穴の設計案を作成した。しかし、マニピュレータのタスクスケジューリングがシステム全体のエネルギー効率に与える影響に着目し、図 5.4 に示すような設計のみを採用した。

表 5.1 は、目標生産の製品スケジュールを計画するための識別可能なタスクをまとめたものである。工作機械で実行されるタスク 1,2,3 は切削加工に相当し、材料加工マニピュレータで処理されるタスク V,W,X,Y はワークの装着・取外し・搬送に相当する。人間作業員 (H_2) は、2 つの作業を行う。Z1 が工程 1 から工程 2 へワークを搬送する作業と、Z2 がワークの着脱を行う作業の 2 つを行わなければならない。表 5.1 では、演算子 \rightarrow は、位置変換を表現し、例えば、 $LT \rightarrow M_1$ は、ローディングテーブル上に置かれたワークを工程 1 の CNC 旋盤に移すことである。表 5.1 の記号 p_k は、タスク k の加工時間又は操作時間の推定値を示す。なお、 p_k の最小単位を「10 s」としたことは、生産計画と実際の生産スケジュールに乖離がある可能性があることを示している。

全てのタスクは、指定された機械的原点で始まり、終わる。タスク V の軌跡の例は、 $O \rightarrow$

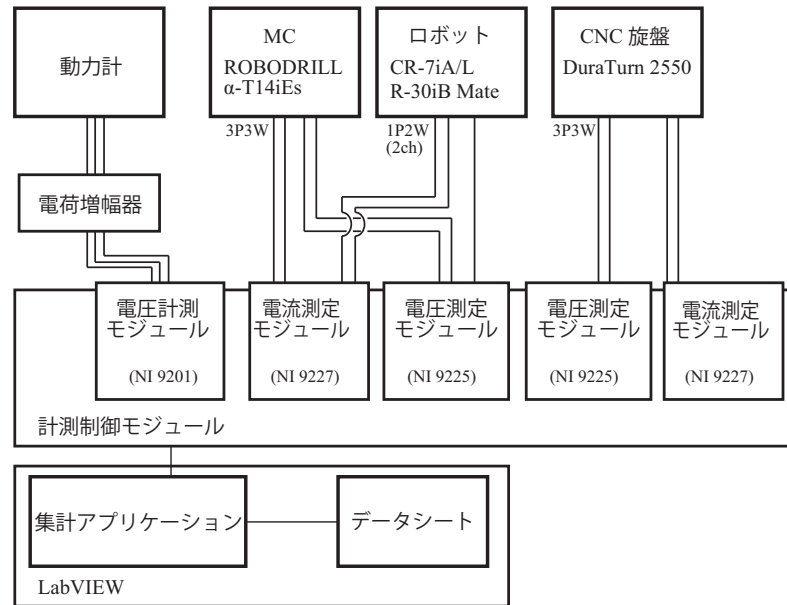


図 5.3: プラットフォームと物理システムの接続 [10]

$M_1 \rightarrow UT \rightarrow O$ と表されるが、表現の簡易化のため、ホームポジションからの移動を除外している。

5.4.2 マテリアルハンドリングに基づくサイクリックスケジューリング

4 つのアルミ合金部品（図 5.4）の製造が、2 つの最終製品を決められた回数繰り返すとする。タスク間の優先順位関係と、タスクの連続処理を表すために、 \prec と \Rightarrow という記号を導入した。例えば、 $A \prec B$ は、タスク A が完了する前にタスク B が処理されないことを意味し、 $A \Rightarrow B$ は、タスク A が完了した直後にタスク B が処理されることを意味する（タスク A と B の間にはタスクが割り当てられていない）。

4.1 節で紹介した製造システムを 2 台のマシンフローショップシステムと考え、 $T_{j1} \prec T_{j2}$ を満たす必要がある。

本章では、まず、実際に実装されている通常のマテハン作業を含む通常のサイクリックスケジュール (S1) を考え、次に、特定のタスクを 2 つに分割してマニピュレータの稼働率を高め、より高いエネルギー効率を実現するための拡張サイクリックスケジュール (S2) を提案する。

▷ 通常スケジュール S1: 各部品は、図 5.4 に示すシーケンスに従い処理され、 M_1 上の

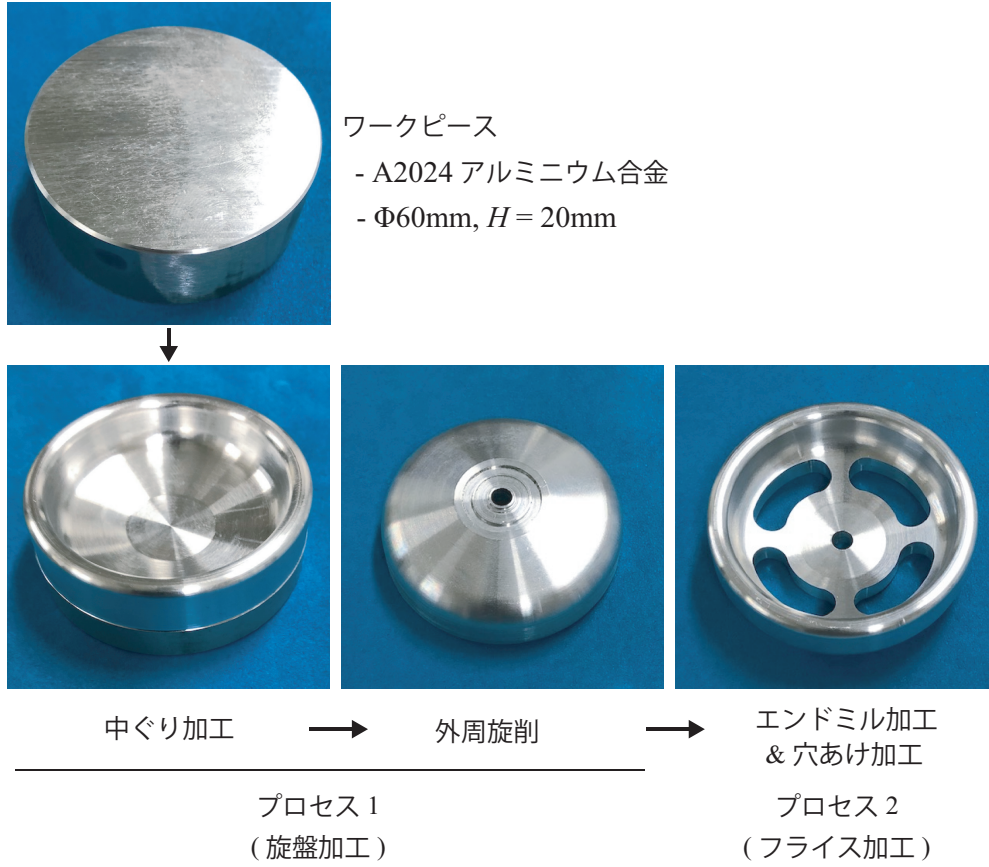


図 5.4: 被削材と加工工程 [10]

タスク処理順序は,

$$T_{11} \prec T_{12} \prec T_{21} \prec T_{22} \prec T_{31} \prec T_{32} \dots$$

マニピュレータ上のジョブは X, Y, V, の 3 つのタスクで構成されており, ジョブ j ($1 \leq j \leq 4$) の場合は以下のような順序で処理される:

$$T_{jY} \Rightarrow T_{j1} \Rightarrow T_{jX} \Rightarrow T_{j2} \Rightarrow T_{jV},$$

マニピュレータ上のジョブ j' および $j' + 1$ ($j' = 1, 2, 3$) の一連のタスクは次の様に表される:

$$T_{j'V} \Rightarrow T_{j'+1,Y}.$$

- ▷ 改善スケジュール S2: タスク X は H_1 による $M_1 \rightarrow FJ \rightarrow M_1$ の一連の処理を表す。また, タスク X は表 5.2 に表すように X1 と X2 に処理内容を分割している: タスク X に代わりタスク X1, X2 を導入することで, マテリアルハンドリングマニピュレータの

表 5.1: 機械加工および搬送タスク [10]

タスク	p_k	詳細
機械加工:		
1	160	中ぐり加工 M_1
2	130	外周切削 M_1
3	120	エンドミル, およびドリル加工 M_2
マテリアルハンドリング:		
V	40	$M_1 \rightarrow UT$ by H_1 (取り外し)
W	30	$UT \rightarrow FJ$ by H_1 (チャッキング)
X	110	$M_1 \rightarrow FJ \rightarrow M_1$ by H_1 (表裏入れ替えとチャッキング)
Y	60	$LT \rightarrow M_1$ by H_1 (ピックとチャッキング)
Z1	30	$UT \rightarrow M_2$ by H_2 (ピックとチャッキング)
Z2	10	$M_2 \rightarrow UT$ by H_2

表 5.2: 先行タスク X1 および X2 [10]

タスク	p_k	詳細
X1	60	$M_1 \rightarrow FJ$ (取り外しと搬出)
X2	50	$FJ \rightarrow M_1$ (ピックとチャッキング)

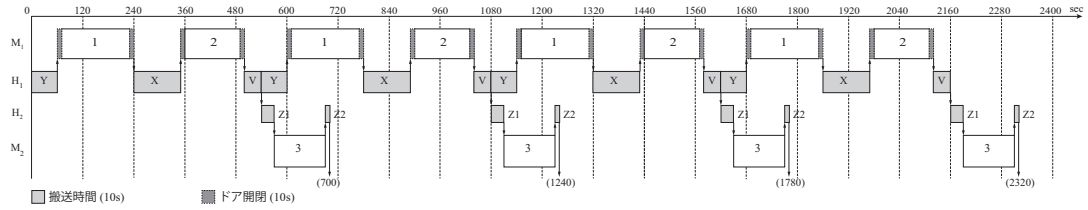
稼働率を向上させ、エネルギー消費量の削減を図ることができる。このとき M_1 上でのタスク順序は:

$$T_{11} \prec T_{21} \prec T_{12} \prec T_{22} \prec T_{31} \prec T_{41} \cdots,$$

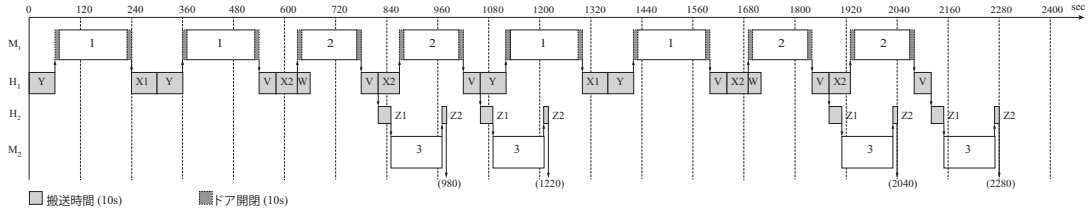
これはタスク 1 に属する 2 つのタスク (T_{*1} of job $*$) が連続して処理され、その後タスク 2 に属する 2 つのタスク (T_{*2}) が連続して処理されることを示している。被削材の処理について、ジョブ j ($j = 1, 3$) の順序は

$$\begin{aligned} T_{jY} &\Rightarrow T_{j1} \Rightarrow T_{jX1} \Rightarrow T_{j+1,Y} \Rightarrow T_{j+1,1} \\ &\Rightarrow T_{j+1,V} \Rightarrow T_{jX2} \Rightarrow T_{j2} \Rightarrow T_{jV} \\ &\Rightarrow T_{j+1,X2} \Rightarrow T_{j+1,2} \Rightarrow T_{j+1,V} T_{j+1,X2} \prec T_{j,W} \prec T_{j+1,V} \end{aligned}$$

図 5.5 は、スケジュール S1 と S2 のガントチャートの例で、濃い灰色の四角は、 M_1 のタスクの開始時と終了時のドアの開閉に要する時間を表している。S1 で切削を行っている時



(a) スケジュール S1



(b) スケジュール S2

図 5.5: 予測スケジュール [10]

は、常にアイドル状態であるのに対し、S2では T_{12} と同時にタスク W が発生していることに注目する必要がある。スケジュール S 1 および S 2 は、不確実性のない理想的な環境下での生産性性能として、次のような特徴を示す：

- ▷ メイクスパン，すなわち S1 のスケジュールの長さは 2320 s であり，S2(2280 s) よりも長い。
- ▷ S1 と S2 のマテリアルハンドリングマニピュレータの稼働率は，それぞれ 37.0 %，40.6 % である。
- ▷ S1 の平均フロータイム（製造リードタイム）は 1510 s であり，S2 の平均フロータイム（1630 s）よりも小さく，かつ製造実行の開始時には，全てのジョブの加工準備が完了した状態で待機している。

5.5 実験内容

5.5.1 物理スケジューリングのシミュレーションと結果

4 つの部品を製造する際に，製造システムのテストベッドで消費される電力を，2 つのスケジュールに基づいて測定した。得られた経時的なエネルギー分布を図 5.6 に示す。横軸は経過時間，縦軸は 20 秒ごとに集計した M_1 ， M_2 ， H_1 の平均消費電力を示している。

S1,S2 の結果は，不確実性のない理想的な環境下での予測値とは異なる結果となった。S1，

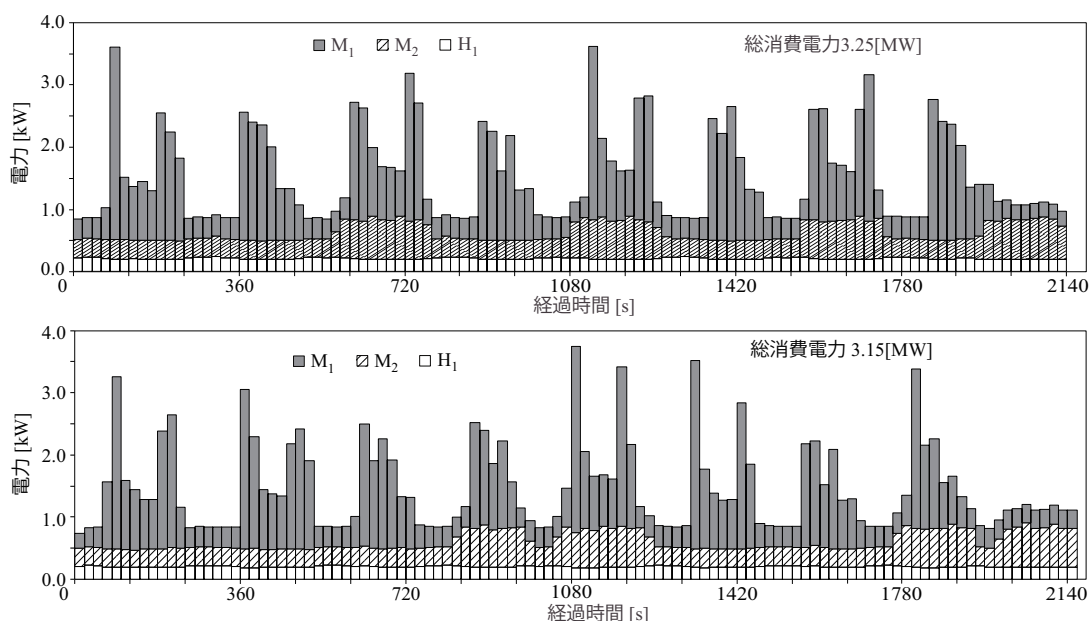


図 5.6: スケジュール S1,S2 に基づく製造時の消費電力量の実測値 [10]

S2で測定した総消費電力量は、それぞれ3.24,3.16 MJであり、S2の方が比較的消費電力量が少なかった。また、 M_1 の消費電力量は、システム全体ではCNC旋盤が最も多くを占めていた。図5.6に示すように、どちらのエネルギー分布も、 M_1 による加工により、複数のピーク電力を示している。図5.7は、S1とS2の製造実績の中で、最大10個のピーク電力を示している。工程内状態での電力ピークを回避するためには、スケジュールS1の方が優れていると考えられるが、S1とS2の電力ピークの分布に有意な差は見られなかった。

表5.3は、S1とS2を用いた製造工程における操作・加工作業とアイドル時の平均消費電力(kW)をまとめたものである。S2では工作機械のアイドル時の消費電力を削減したが、マニピュレータのアイドル時の消費電力は2つのスケジュール間で同じであった。マニピュレータ H_1 で測定した消費電力は、工作機械で測定した消費電力よりもかなり低い値であった。また、マニピュレータ動作時に増加した消費電力を算出したところ、製造システム全体の0.9%から3%程度であった。

全体として、マテリアルハンドリングマニピュレータの動作ではなく、その動作スケジュールがシステム全体のエネルギー節約に影響を与える可能性があると言える。

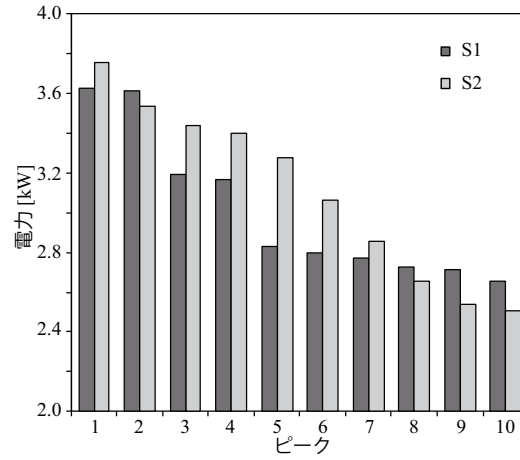


図 5.7: ピーク電力の上位 10 項 [10]

表 5.3: 機械加工/操作タスクおよびアイドル時間の 20 s ごとの平均消費電力 [10]

スケジュール	実行中				アイドル状態		
	H ₁ タスク	T _{j1}	T _{j2}	T _{j3}	H ₁	M ₁	M ₂
S1	0.217	0.338	1.355	1.361	0.194	0.306	0.622
S2	0.218	0.329	1.442	1.152	0.194	0.304	0.616

5.5.2 計算によるシミュレーション

上記の観察は、2つの製品の製造における消費電力の測定値に基づいている。製造業は周期的な製造業であるため、システムのエネルギー消費量の挙動が周期的な性質を示すことは容易に予測可能である。そこで、対象とする製造システムの生産性とエネルギー効率を調べるために、実測値を基に計算スケジューリングシミュレーションを実施した。スケジューリングシミュレーションでは、100 ジョブ（200 タスク）を考慮した。

エネルギー効率と生産率の計算結果を図に示します。強化スケジュール S2 に基づいて生産量効率を検討した。その結果、本研究で検討した状況下では、マテハンマニピュレータのタスクスケジューリングにより、製造システム全体のエネルギー効率を高めることができることがわかった。

5.5.3 結果と考察

本章では、これまでの研究の延長線上に、開発した計測制御プラットフォームを実際の製造システムに接続し、スケジューリングが製造業のエネルギー効率向上に及ぼす影響を検討した。開発した計測システムを用いて得られた消費電力の実測値をもとに、マテリアルハン

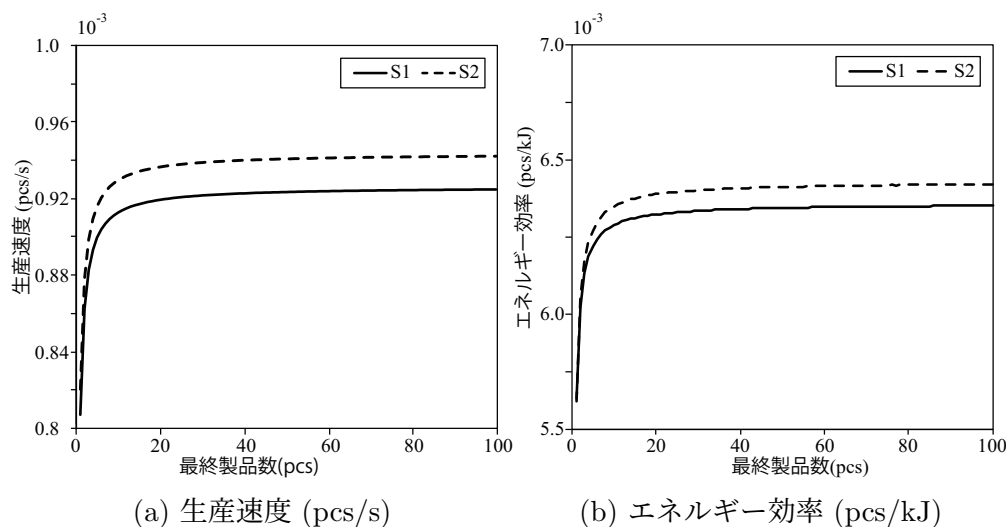


図 5.8: 測定した消費電力をもとに、スケジュール S1 および S2 に基づいて 100 個の製品を生産したシミュレーション結果 [10]

ドリングマニピュレータのタスクスケジューリングが製造システムのエネルギー効率と生産性に与える影響の調査を行った。その結果と考察を以下にまとめる：

- ▷ マニピュレータの操作（物理的な動き）が製造システム全体の消費電力に影響を与えない。
- ▷ 数値シミュレーションの結果、提案したマニピュレータの稼働率を高めることを目的とした拡張スケジュールは、単純なジョブシーケンスを実行することで、一般的に実装されているスケジュールよりもエネルギー効率の点で優れていた。

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のは予想通りであり、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。このことは、製造業における計画段階と製造実行段階のスムーズな連携が重要であることを示唆している。以上の結果を踏まえると、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。

5.6 不確実事象に対応するマニピュレータの適応的動作計画

前節では、見える化技術を活用した計測制御プラットフォームを実際の製造システムに接続し、スケジューリングがエネルギー効率に及ぼす影響について考察した。その結果として、

ハンドリングマニピュレータの物理的動作が製造システム全体の消費電力へ大きな影響を与えないこと、そして生産システムの生産性を維持しつつ、マニピュレータ自体のエネルギー効率化が可能であることがわかった。加えて、工作機械における加工開始のタイミングなどは、マニピュレータの動作に依存している事がわかった。

2 章で述べたように、生産システムは置かれた環境が同一であれば、外的要因がなければエネルギー消費量は変動しない。このことから、エネルギー損失の発生は予期しない外的要因によるものであると言える。そこで、前節の結果から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の着想を得て、エネルギー効率化スケジューリングの一端として、機械の故障に対するハンドリングマニピュレータの適応動作により、不確実な事象の発生に柔軟に対応する適応的動作を提案する。

5.7 関連研究

消費エネルギーの観点によらず、機械加工工程ではシステムのダウンタイムの短縮と回避が重要な課題となっている。しかし、故障や予期せぬダウンタイムを完全に防ぐことは困難であり、生産性の低下に迅速に対応し、製造業が元の定常状態に戻るような回復力のある自動スケジューリング手法を確立することが重要である [11]。

現代のスマートマニュファクチャリングでは、中小メーカーでもマテリアルハンドリングマニピュレータを組み込んだ、フレキシブルな CNC 機械加工製造システムの導入が進んでおり、上記の問題が再認識されてきている。一方でマテハンロボットを搭載した製造システムの研究では、ロボットの移動や機械スケジューリング問題の解析が多く [12]、いわゆるロボットセル問題が取り上げられてきた。ロボットセル問題は、古典的な順列フローショップの一般化であり [13]、Akturk らはロボットセルの速度制御問題を検討している [14]。他にも、Ham らはジョブショップ構成下での、生産機械と材料搬送ロボットの同時スケジューリングを行う手法を提供している [15]。

本実験では、静的・理想的なスケジューリング状況を仮定した上記研究とは異なり、製造実装時の不確実性に対応した適応的なスケジュール修正に焦点を当てた。工作機械の運転スケジュールではなく、機械の故障に対するマテリアルハンドリングマニピュレータの適応動作により、不確実な事象の発生に柔軟に対応する自動スケジューリング技術を確立することを目的としている。この適応動作は、スケジュール修正ポリシーから導き出される。ここで

は、6 軸小型協調ロボットを用いた一連の物理的なハンドリング動作シミュレーションを行い、スケジューリングに基づくハンドリングマニピュレータの適応動作の有効性を示す。

5.8 実験システム

5.8.1 ハードウェア構成

図 5.9 に本実験で検討した実験用マニピュレータステーションを示す。6 軸ロボットマニピュレータ (FANUC CR-7iA/L) を用いて、ワークの搬入と搬出を行う。マニピュレータハンドには力覚センサと CCD カメラが搭載されており、画像認識に基づいた柔軟な操作が可能である。マニピュレータの操作は全て所定の待機位置（通常位置）から開始する。ハンドリングステーションには、マニピュレータの両側にワークの搬入、搬出を行うワークテーブルが設置されている。また、各ワークテーブルには最大 15 個のワークを収納することができ、2つのエリアに分割して2つの異なるワークインプロセスに対応することが可能である。

図 5.9 中、 M_1 と M_2 は CNC 工作機械を示しているが、本実験ではマニピュレータの適応的な運転計画の有効性を調べることに重点を置いているため、物理的な工作機械ではない。物理的な工作機械の代わりに 2 枚の小さなプレートを設置した。プレート上にワークがある場合は、その加工（ワークの切削）は終了しており、取り外し可能な状態になっていると考える。工作機械は対応するプレート上にワークがない場合、加工中またはアイドル状態と判断される。

工作機械上での加工時間は、(1) 工作機械にワークを装填した直後に手でワークを取り出し、(2) 次項で紹介するジョブ加工時間に相当する所定時間経過後に板に戻す、というように、意図的に所定時間を代用している。この時間帯は、ストップウォッチを用いて物理的にカウントを行った。このような人間による手動操作は、ワークが M_1 または M_2 に移動する度に行われる。

5.8.2 シミュレーションシナリオ

ジョブの詳細:

J_i ($i = 1, \dots, 4$) で表される 4 つの異なるタイプの製品が製造されているものとする。表 5.4 は、利用した問題インスタンスを示している。ジョブタイプごとに 6 つのジョブがあ

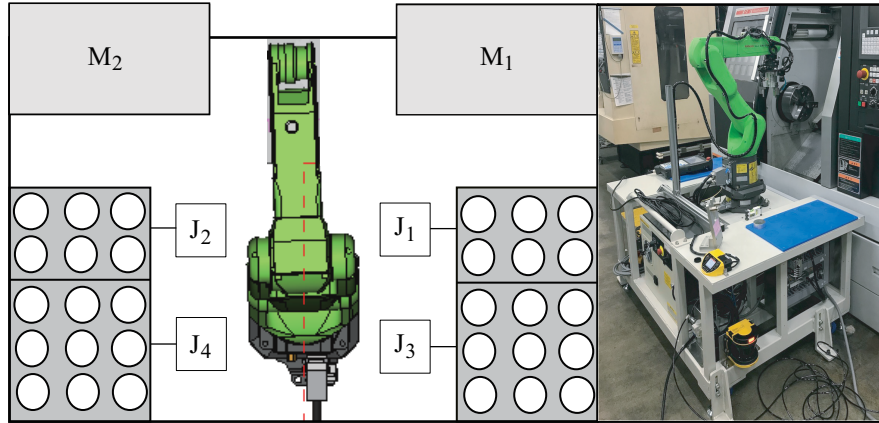


図 5.9: 実験用マニピュレータステーション [16]

り、ジョブのルーティングや処理時間が異なる。ジョブタイプ J_1 と J_2 では、それぞれ 1 つのタスクのみ処理される。

J_3 にはタスクが 2 つあり、1 つ目のタスクは M_1 、2 つ目のタスクは M_2 の順で処理される。同様に、 J_4 の最初のタスクは、 M_2 上で処理され、その後、 M_1 上で処理される。

ジョブタイプ J_i の 4 つの異なるジョブの実現可能なスケジュール J_i を、メイクスパンを最小化した 2 機械ジョブショップスケジューリング問題の最適スケジュールを生成する、いわゆるジャクソンルールを適用して生成し、現在のスケジュールに同じシーケンスを 1 つずつ 5 回追加することで、次のような周期的な計画スケジュール S を生成することができる。

$$M_1 : J_3 \rightarrow J_1 \rightarrow J_4 \rightarrow J_3 \rightarrow J_1 \rightarrow \dots$$

$$M_2 : J_4 \rightarrow J_2 \rightarrow J_3 \rightarrow J_4 \rightarrow J_2 \rightarrow \dots$$

s はセミアクティブでなければならない点に注意が必要である。

機械故障:

工作機械のいずれかが故障した場合を考える。 D_1, \dots, D_N を故障シナリオとする。故障シナリオ $D_k (k = 1, \dots, N)$ では、ある時点 t_k で、ダウンタイム b_k を見積もり、 M_1 または M_2 のいずれかが故障することを想定している。後述の物理シミュレーションでは、表 5.5 にまとめた 5 種類の故障シナリオ ($N = 5$) を考慮し、 b_k は平均値 $1/\lambda = 180, s$ の指数分布に従い、 t_k は無作為に与えた。

表 5.4: 問題例 [16]

ジョブ	N_i	加工プロセス	加工時間 [s]
J_1	6	M_1	35
J_2	6	M_2	40
J_3	6	$M_1 \rightarrow M_2$	$60 \rightarrow 40$
J_4	6	$M_2 \rightarrow M_1$	$70 \rightarrow 50$

表 5.5: 機械故障シナリオ [16]

故障シナリオ	t_k	b_k [s]
D_1	206	89
D_2	602	165
D_3	1063	208
D_4	469	326
D_5	1285	458

スケジュール修正ポリシー

機械故障に対する 2 つのスケジュール修正方針 P1, P2 を検討する：

P1 (右シフトポリシー) スケジュールを実現可能なものにするために、推定ダウンタイムに基づき、未処理のジョブを可能な限り時間経過に合わせて右にシフトすることで修正を行う。ここで、実際に右シフトしたスケジュールを S^1 とする。マニピュレータは故障したマシンが回復するまでの間、稼働を再開することを想定して待機しているが、これは実際には一般的に用いられる操作である。またこの操作を行った場合、ダウンタイムが他のマシンにまで伝播する可能性がある。

P2: (適応的ポリシー) 他のマシンが使用できない場合を除き、使用可能なマシンのジョブが優先的に処理されることを示している。このポリシーを適用して修正したスケジュールを S^2 とする。

5.9 マニピュレータ運用計画

5.9.1 基本動作

ハンドリングマニピュレータの基本的な動作は、以下の 2 つのモード 1, 2 で説明される：

1. (搬入) 左右のワークテーブルの指定された位置にある対象ワークをマニピュレータでピックアップし、予定されたスケジュールに従って、 M_1 または M_2 に移動させる。 M_1

と M_2 の両方が同時に使用可能で、アイドル状態の場合、 M_1 で処理されるワークを最初にロードする。

2. (搬出) ジョブ終了時間毎に、ワークを M_1 または M_2 から取り外す。マニピュレータの画像認識機能を利用して、プレート上にワークがない場合は、現在の操作を再開する。それ以外の場合は、現在のスケジュールにしたがって操作を行う。

モード 2 では、予定された時点でフォーカルマシン上にワークが存在しない場合、マニピュレータは、一般的に使用されているポリシー P 1 に従って、以下のアクション A 1 を実行する：

A1 は、右シフトされたスケジュールに従う。機械が故障した後は、工作機械が回復するまでの間、マニピュレータは待機位置に戻る。

5.9.2 適応的動作

本研究では、スケジュール修正ポリシー P2 を適用し、修正されたスケジュール S^2 に応じた適応動作 A2 を提案する：

A2 は、 S^2 を基準に、未処理のジョブ・タスクのダウンタイムの影響を軽減する。

- 現在使用可能な機械で処理されているジョブの最初のタスクを機械に移動し、その間、マニピュレータは待機位置にある。
- モード 2) に基づいて、ワークの有無をチェックする。復旧した機械上にワークがある場合は、3.1 で説明したモード 1) に戻る。

5.10 シミュレーションと結果

表 5.5 の機械故障シナリオを計画スケジュール S に適用し、修正スケジュール S^1 と S^2 を作成した。24 個のジョブを持つハンドリングマニピュレータの物理シミュレーションを、 S 、 S^1 、 S^2 の 3 つのスケジュールに基づいて実施した。改訂後のスケジュールを、ダウンタイムの経時変化とサイクルタイムの経時変化で比較した。またトータルダウンタイムには、伝搬したダウンタイム、つまりジョブの処理順序を変えることで削減可能な、機械のアイドルタ

イムが含まれている。本実験におけるサイクルタイムは、ジャクソンルールで得られた 4 つのジョブの基本スケジュールのメイクスパンを指す。

▷ $M_1 : J_3 \rightarrow J_1 \rightarrow J_4$

▷ $M_2 : J_4 \rightarrow J_2 \rightarrow J_3$

表 5.6 にシステムダウンタイムの測定値と平均サイクルタイムを示す。最も長い機械故障を与えるシナリオ D_5 では、当然のことながら、システム全体のダウンタイムが最も長くなっている。また、 S^2 のダウンタイムは、 S^1 のダウンタイムよりもはるかに短い。他のシナリオでも同様の傾向が見られる。

平均サイクルタイムは変動しており、おおむね 3.5 s から 18.3 s の間で長くなる傾向がある。ダウンタイムを含めた実際のサイクルタイムは、シナリオ D_4, D_5 では、スケジュール上の S^1 以外のダウンタイムの長さとは相関がない傾向が見て取れる。

全体的には、ダウンタイムが大きくなるにつれて、A 1 よりも P 2 ポリシーに基づいた適応動作 A 2 を適用することで、伝播するダウンタイムを低減することができる。各シミュレーションの、右シフトおよび適応的動作により削減されたダウンタイムの平均値を算出した所、右シフト操作と比較して適応的動作の方が約 38% 低減されていることが分かった..

図 5.10 に、横軸が処理されたジョブ数を示す全シナリオの平均サイクルタイムを示す。スケジュール S^1 に従った運転 A1 の場合、機械故障発生直後に大きく増加し、その後徐々に減少している。また、 S^2 に続く適応動作 A2 の場合も、A1 の場合に比べて、サイクルタイムは増加するが、ゆっくりと増加し、急速に減少する。以上の結果から、適応動作 A2 を採用することで、サイクルタイムがスムーズに回復することがわかる。

表 5.6: 物理シミュレーション結果 [16]

シナリオ	スケジュール	総ダウンタイム	サイクルタイム
	S	0	58.6
D_1	S^1 (P1)	183	62.2
	S^2 (P2)	147	62.9
D_2	S^1 (P1)	333	68.8
	S^2 (P2)	233	65.9
D_3	S^1 (P1)	421	68.3
	S^2 (P2)	218	65.6
D_4	S^1 (P1)	655	71.6
	S^2 (P2)	344	65.3
D_5	S^1 (P1)	925	76.9
	S^2 (P2)	521	64.1

5.11 まとめ

本章では、実際の生産システムを対象に消費電力傾向を計測し、その結果をもとにハンドリングマニピュレータのタスク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と生産性に与える影響を検討した。その結果として判明したことを下記に示す：

- ▷ 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。

上記の結果から、生産システム運用時に、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と言える。

そこで、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て、エネルギー効率化スケジューリングの一端として、機械の故障に対するハンドリングマニピュレータの適応動作により、不確実な事象の発生に柔軟に対応する適応的動作を提案した。結果として次の事がわかった。

- ▷ 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。

以上の点を踏まえると、マニピュレータによる適応的なスケジューリング修正が生産システムのダウンタイムに有効であり、非生産時間を削減できることから、結果として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と言える。

参考文献

- [1] H. Hibino, T. Sakuma, M. Yamaguchi, Evaluation system for energy consumption and productivity in manufacturing system simulation, *International Journal of Automation Technology*, **6-3** (2012) pp.248–288.
- [2] H. Hibino, Y. Fukuda, Y. Yura, A synchronization mechanism with shared storage model for distributed manufacturing simulation systems, *International Journal of Automation Technology*, **9-3** (2015) pp.279–260.
- [3] H. Hibino, M. Yamamoto, M. Yamaguchi, and T. Kobayashi, A study on lot-size dependence of energy consumption per unit of production throughput considering buffer capacity, *International Journal of Automation Technology*, **11-1** (2017) pp.46–55.
- [4] C. Herrmann, S. Thiede, S. Kara, and J. Hesselbach, Energy oriented simulation of manufacturing systems – Concept and application, *CIRP Annals*, **60-1** (2011) pp.45–48.
- [5] J. Kohl, S. Spreng, and J. Franke, Discrete event simulation of individual energy consumption for product-varieties, *Procedia CIRP*, **17** (2014) pp.517–522.
- [6] T. L. Garwood, B. R. Hughes, M. R. Oates, D. O’Connor, and R. Hughes, A review of energy simulation tools for the manufacturing sector, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **81-1** (2018) pp.895–911.
- [7] T. Samukawa, and H. Suwa, An optimization of energy-efficiency in machining manufacturing systems based on a framework of multi-mode RCPSP, *International Journal of Automation Technology*, **10-6** (2016) pp.985–992.
- [8] R. Yonemoto, H. Suwa, and T. Samukawa, Evaluation of energy efficiency in scheduling by using cyber-physical manufacturing simulator, *International Symposium on Scheduling*, (2017) pp.111–116.

- [9] R.Yonemoto, H. Suwa, Evaluation of energy efficiency and productivity in scheduling by using physical simulator, *Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers*, **32**-5 (2019) pp.185–191.
- [10] R.Yonemoto, H. Suwa, Task scheduling of material-handling manipulator for enhancing energy efficiency in flow-type FMS, *International Journal of Automation Technology*, **14**-6 (2020) pp.943–950.
- [11] X. Gu and X. Jin and J. Ni and Y. Koren, Manufacturing system design for resilience, *Procedia CIRP*, **36** (2015) pp.135-140.
- [12] M. Dawande, H. N. Geismar, S. P. Sethi, and C. Sriskandarajah, Sequence and scheduling in robotic cells: recent developments, *Journal of Scheduling*, **8**-5 (2005) pp.387–426.
- [13] J. Carlier, M. Hauari, M. Kharbeche, and A. Moukrim, An optimization-based heuristic for the robotic cell problem, *European Journal of Operational Research*, **202**-3 (2010) pp.636–645.
- [14] M. S. Akturk, H. Gultekin, and O. E. Karasan, Robotic cell scheduling with operational flexibility, *Discrete Applied Mathematics*, **145**-3 (2005) pp.334–348.
- [15] A. Ham, Transfer-robot task scheduling in job shop, *International Journal of Production Research*, (2019) DOI: 10.1080/00207543.2019.1709671.
- [16] R. Yonemoto, H. Suwa, Scheduling-based adaptive operations of handling manipulators to reduce downtime in manufacturing systems, *Proceedings of the 2020 International Symposium on Flexible Automation*, ISFA2020-9639, V001T04A003; 4 pages.

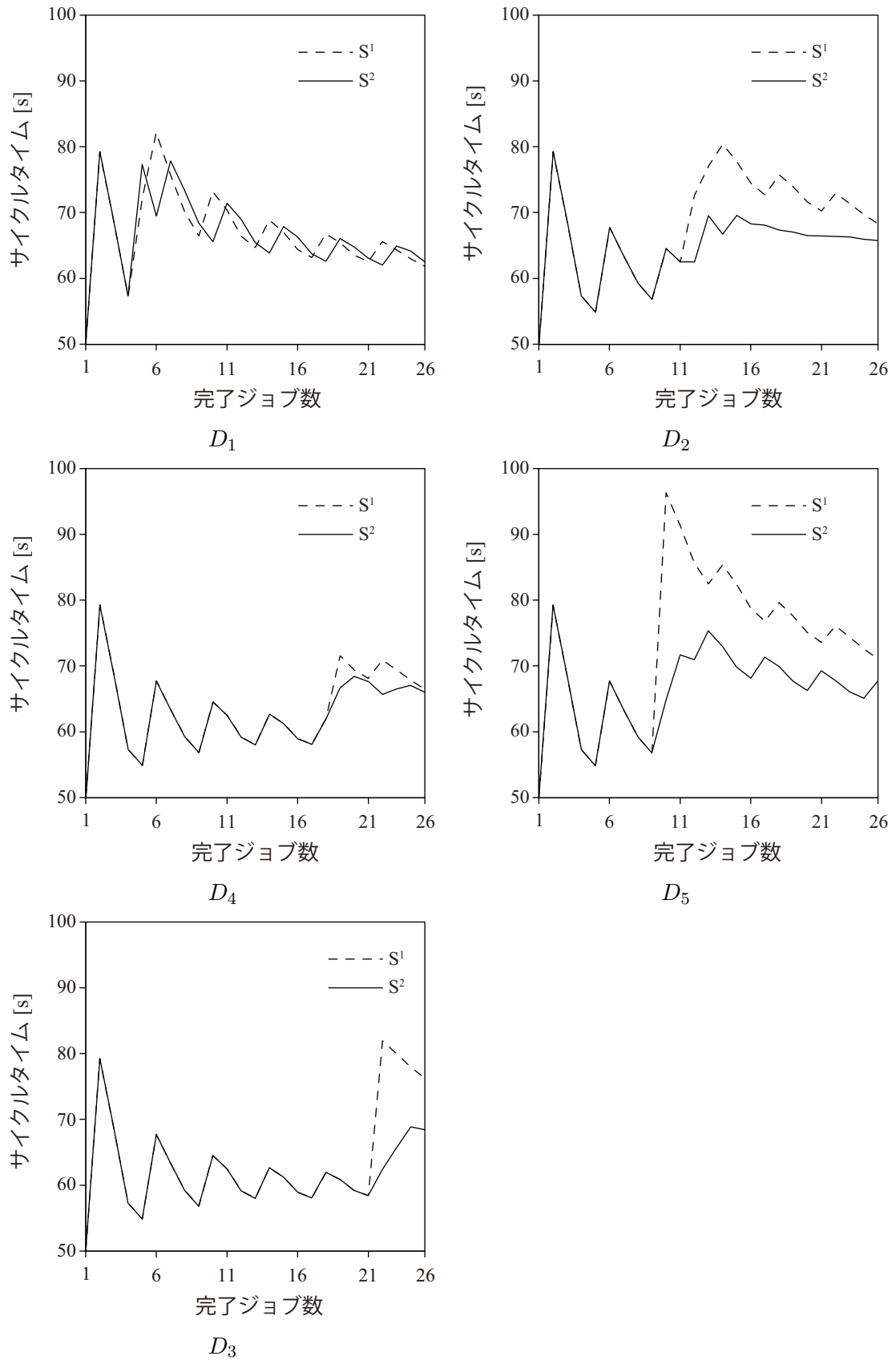


図 5.10: 各故障シナリオにおける，スケジュール S^1 および S^2 のサイクルタイム変動 [16].

第6章 結論

本研究では、実証検討に立脚するエネルギー効率化スケジューリング技法の確立を目的とし、スケジューリングの効用の評価基盤としての計測制御プラットフォームおよび製造実行シミュレータの開発と、実システムでの物理実験に基づいてエネルギー効率性と生産性の関係性を明らかにした上で、エネルギー効率を指向するスケジューリングの有効性を検討した。

まず、運用段階におけるエネルギー最適化のため、「見える化」技術を導入可能な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。「見える化」技術を端緒とする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、計測対象を柔軟に切り替えることが可能である。ここでは、ミニチュア FTL を接続した計測制御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。この過程として、サイクリックな簡易的スケジュールを実行してシミュレーションを行い、エネルギー効率性や生産速度などの性能指標を算出した。結果として、以下のような知見が得られた。

- ▷ 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「ちょこ停」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。これらの結果を踏まえると、本プラットフォームは「見える化」の機能を有した汎用計測機器として、有用であると言える。

次に、柔軟に計測対象の切り替えが可能な計測制御プラットフォームを構築し、現実に応じた環境下でエネルギー効率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のかについて調査した。本論文では、特定の物理システムで観測される消費エネルギー、および不確実な要素を含む物理的な計測データに基づき

検討を行った。前述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、可能な限りのパターンを観察するため、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。

次に、工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切削の二つの工程からなるサイクリック・スケジューリングを対象とした。スケジューリング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、エネルギー効率化スケジューリングの一端として、機械の故障に対するハンドリングマニピュレータの適応動作により、不確定的事象の発生に柔軟に対応する適応的動作を提案した。スケジューリン

グ方策について、システム実装時に採用されるマニピュレータの安定動作優先のアプローチと、新たにランダムに生起する機械故障に対し即応する適応的アプローチを考えた。後者は、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できる。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、基本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。本研究成果を踏まえた上で、今後の検討課題として、次の二点を挙げておく。すなわち、

- ▷ 本研究成果を踏まえた上でのエネルギー効率化スケジューリングの最適化問題の構築、すなわち、搬送マニピュレータの最適タスクの生成問題と、搬送マニピュレータおよび工作機械の統括的なスケジューリング問題を数理的に導くこと、
- ▷ 最適化問題を実用的に解くためのアルゴリズムの開発、さらには、不確実性を考慮したスケジューリング方式の同定、

である。

謝辞

本研究を進めるにあたり，常にご指導ご鞭撻を賜り，激昂していただきました摂南大学理工学部 諏訪晴彦教授に厚く御礼を申し上げます。

ご多忙の中，本論文の審査をお引き受けいただき，ご教授，ご助言をいただいた摂南大学理工学部 川野恒夫教授，摂南大学理工学部 伊藤譲教授に心より感謝申し上げます。

また，研究途上において終始懇切なご指示を頂きました摂南大学・寒川哲夫先生に深く感謝いたします。

工作機械を使用するにあたり多くのご指導，ご助言を頂きました摂南大学 テクノセンター 長谷川淳技師，丸山隆三技師，桑田寿基技師，下元一輝技師に心より御礼申し上げます。

公私共々お世話になりました同研究室の皆に心より感謝するとともに，皆様の今後のご活躍心からお祈り申し上げます。皆様のおかげで大変有意義に過ごすことができました。最後に，直接または間接の有無を問わず本研究に関わって下さったすべての人に深く感謝し，この場を借りて改めて御礼を申し上げさせていただきます。本当にありがとうございました。

本研究に関する発表

学術誌論文（査読付き）

1. Ryo Yonemoto, Haruhiko Suwa: Task scheduling of material-handling manipulator for enhancing energy efficiency in flow-type FMS, International Journal of Automation Technology, **14**-6 (2020) pp.943–950.
2. Ryo Yonemoto, Haruhiko Suwa: Evaluation of energy efficiency and productivity in scheduling by using physical simulator, Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers, **32**-5 (2019) pp.185–191.

国際会議論文（査読付き）

1. Ryo Yonemoto, Haruhiko Suwa, Scheduling-based adaptive operations of handling manipulators to reduce downtime in manufacturing systems, Proceedings of the 2020 International Symposium on Flexible Automation, ISFA2020-9639, V001T04A003; 4 pages.
2. Ryo Yonemoto, Haruhiko Suwa, and Tetsuo Samukawa: Evaluation of energy efficiency in scheduling by using cyber-physical manufacturing simulator, International Symposium on Scheduling, (2017) pp.111–116.

学術講演・研究発表

1. 米本 涼, 家谷友也, 諏訪晴彦: 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, 生産システム部門研究発表講演会 2020 講演論文集,
2. 米本涼, 寒川哲夫, 諏訪晴彦: 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, 日本機械学会 2019 年次大会講演論文集, **19**-1 (2019).

3. 米本涼, 寒川哲夫, 諏訪晴彦: 自動化生産セルのグリーン運用のための消費電力特性の分析, 日本機械学会生産システム部門 2019 講演論文集, (2019) pp.41–42.
4. 米本涼, 寒川哲夫, 諏訪晴彦: スマートグリーン製造のためのフレキシブル製造シミュレータの開発, 日本機械学会生産システム部門 2018 講演論文集, (2018) pp.53–54.
5. 米本涼, 諏訪晴彦: グリーン製造システムのための物理シミュレータの開発 – エネルギー効率性評価のためのスケジューラの実装 –, 日本機械学会生産システム部門 2017 講演論文集, (2017) pp.29–30.
6. 米本涼, 諏訪晴彦: グリーン製造シミュレータの開発における画像計測による生産性評価, 第 61 回システム制御情報学会研究発表講演会 (2016).
7. 米本涼, 諏訪晴彦: グリーン製造システムのための物理シミュレータの開発 – 柔軟製造ラインへの適用 –, 日本機械学会生産システム部門 2016 講演論文集, (2016) pp.45–46.