

博 士 論 文

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

平成 30 年 1 月

摂南大学大学院

寒 川 哲 夫

目次

第 1 章 緒論	1
1.1 研究背景と目的	1
1.2 本論文の構成	3
第 2 章 計画段階からのグリーン製造	5
2.1 省エネ指向の生産計画	5
2.2 製造業におけるエネルギー消費	6
2.3 グリーン製造	8
2.4 プロジェクトの計画と管理	11
2.5 RCPSP	13
2.5.1 RCPSP の定式化	13
2.5.2 RCPSP による分類	14
2.6 プロジェクトの表現	15
参考文献	17
第 3 章 エネルギー負荷計画	23
3.1 エネルギー負荷計画による最適化	23
3.1.1 処理モード	24
3.1.2 処理モードにおける加工時間とエネルギー消費量	26
3.2 RCPSP による定式化	28
3.3 ガントチャートによる RCPSP の表現	28
3.4 ケーススタディ 1	29
3.4.1 切削実験	29
3.4.2 エネルギー負荷計画の生成	33

3.4.3	シミュレーション結果	34
3.5	ケーススタディ2	36
3.5.1	切削実験	36
3.5.2	処理モードの作成	37
3.5.3	エネルギー負荷計画の生成	38
3.6	まとめ	39
	参考文献	41
第4章	工作機械と計測装置	43
4.1	マシニングセンタの構成と加工の仕組み	43
4.2	3軸立形マシニングセンタにおける加工プロセス	45
4.3	エンドミル加工	45
4.4	工具および被削材	47
4.5	消費電力計測プラットフォーム	50
	参考文献	54
第5章	工作機械における切削時消費電力モデルの構築	55
5.1	マシニングセンタの消費エネルギー	55
5.1.1	3軸立形マシニングセンタにおける電力消費の基礎的分析	55
5.1.2	2次元切削モデル	59
5.1.3	先行研究による消費エネルギーモデル	62
5.2	エネルギー密度に基づく消費エネルギーモデル	63
5.3	エネルギー密度に基づく予測モデルの構築	65
5.4	切削時消費電力の計測	67
5.4.1	実験条件	67
5.4.2	実験結果	68
5.5	回帰分析モデルとその予測精度	73
5.5.1	予測モデルの導出	73
5.5.2	比較対象	75
5.5.3	予測精度の検証 (1) 消費電力	76

5.5.4	予測精度の検証 (2) 消費エネルギー	79
5.6	考察: モデルのロバスト性	81
5.7	被削材による影響の分析	82
5.8	まとめ	87
	参考文献	89
第 6 章	送り駆動系消費電力の分析	93
6.1	送り駆動系による消費電力	93
6.2	計測実験	95
6.3	モデル構築における送り駆動系の影響	98
6.3.1	消費電力モデル	98
6.3.2	予測結果と予測精度	99
6.4	まとめ	102
	参考文献	103
第 7 章	結論	105
	謝辞	109

第 1 章 緒論

1.1 研究背景と目的

2015 年に採択されたパリ協定において、わが国は 2030 年までに温室効果ガスを 2013 年度比で 26 %削減することを目標に掲げている。しかしながら、東日本大震災に関わる原子力発電所の事故を受け、化石燃料由来の火力発電が多用されることとなり、遅々として温室効果ガスの削減は進んでいない。パリ協定の目標値を達成するためには、消費するエネルギーの削減が肝要である。このような社会的状況の下、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 技術や ICT の発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 FEMS(Factory Energy Management System) 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。まず、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示すことで、消費電力モデルの必要性を明らかにする。次に、エネルギー密度と材料除去率に基づく、工作機械の消費電力モデルを提唱する。実験を通じて、その精度の良さと実用性、汎化性を示す。各研究の概要は以下のとおりである。

(1) マルチモード RCPSP によるエネルギー負荷計画の定式化

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提案する。エネルギー負荷計画はプロジェクトスケジューリング問題における RCPSP（資源制約付きプロジェクトスケジューリング問題）の枠組みを用いて定式化される。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となる。ただし、本研究では一層の省エネ効果を期待し、各作業を処理するモードを複数用意する。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、生産性の維持と省エネが期待できる。

(2) エネルギー密度に基づく工作機械の消費電力モデルの構築

本研究では端緒として生産システムの中核をなす工作機械に着目し、消費電力モデルを構築する。工作機械の消費電力をエネルギー密度と材料除去率の観点から分析し、その関係性を明らかにする。そして、材料除去率に応じた消費電力を予測可能な消費電力モデルを構築する。

(3) 送り軸駆動系の消費電力分析

生産現場でのより複雑な加工を想定し、送り軸駆動系による消費電力を考慮した現実的な消費電力モデルの構築を試みる。工作機械の構造に起因した送り軸駆動系による電力消費傾向の違いを明らかにし、消費電力モデル構築の指針を立てる。

1.2 本論文の構成

最後に本論文の構成について述べる。第 1 章は諸論、第 7 章は本論文のまとめである。第 2 章では、製造業をとりまく環境と省エネ施策について述べたのち、プロジェクト管理について述べる。第 3 章では、消費電力モデルの有効性を明らかにするため、エネルギー負荷計画について述べる。エネルギー負荷計画の枠組みとなる RCPSP について述べたのち、定式化を行う。そしてケーススタディとして実際の工作機械による消費電力データを用いた数値実験を行うことで、エネルギー負荷計画の効果を検証する。第 4 章では、消費電力モデル構築に向けて、工作機械について整理する。簡単に工作機械の構造や加工について述べる。第 5 章では、工作機械の消費電力モデルについて述べる。まず、先行研究による消費電力モデルについて述べ、提案モデルの位置づけを示す。そして、工作機械の切削時消費電力を汎用的な指標であるエネルギー密度と能率の観点から分析し、消費電力モデルを構築する。最後に、消費電力モデルによる消費電力予測を行い、予測精度の検証と先行研究との比較を行う。第 6 章では、生産現場での複雑な加工を想定し、送り軸駆動系による消費電力を分析することで消費電力モデルを構築する。送り駆動系が消費する電力について先行研究による検証を述べたのち、送り駆動系を考慮した切削実験を行い、工作機械の消費電力を分析する。使用する送り軸駆動系の違いによる消費電力および消費電力モデルへの影響を明らかにしたうえで、使用する送り軸駆動系ごとに消費電力モデルを構築し、その予測精度を検証する。

第 2 章 計画段階からのグリーン製造

本章では、本研究が提案する省エネ手法の概念を最初に述べる。次に、わが国におけるエネルギー事情から、求められている省エネとはなにかについて述べる。そして、先行研究における省エネ手法について述べ、本研究との違いを明らかにする。最後に、提案手法で用いるプロジェクト管理および RCPSP について述べる。

2.1 省エネ指向の生産計画

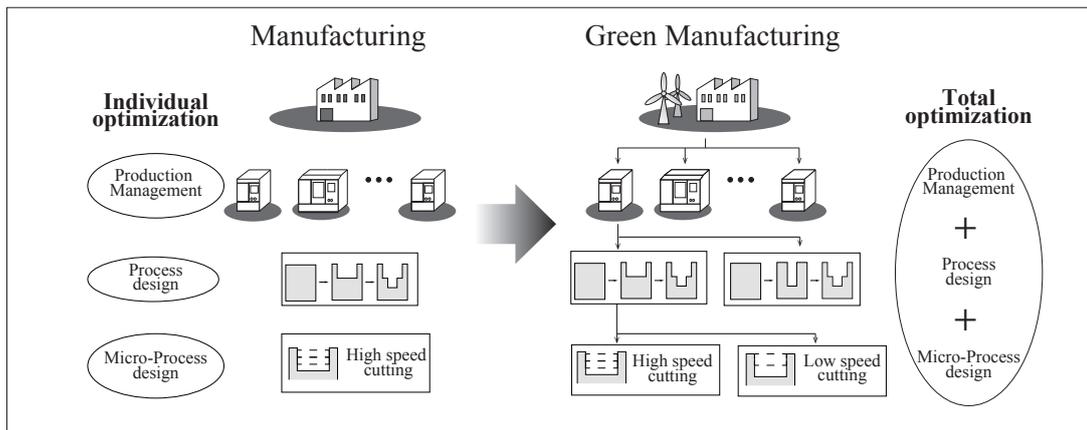


Fig. 2.1: Green manufacturing by total optimization.

図 2.1 に示すように、これまでの製造業では個別の機械や加工プロセスを対象に、消費エネルギーを最適化してきた。そしてその多くは、能率を上げることによって総消費エネルギーを低減するものである。能率を上げた結果、時間あたりの消費電力（ピーク電力やピークデマンド）が大きくなることもあるが、たとえば機械 1 つだけを見ると、小さなピーク電力の増加であり、あまり問題にされてこなかった。ところが、昨今では次節で述べるようなエネルギー事情から、総消費電力だけでなくピーク電力やピークデマンドも評価の対象にしなければならなくなってきた。このような状況においては、個々に最適化された機械や加工

プロセスだけを用いて生産システムを運用することが、必ずしも全体としてエネルギー最適化につながるわけではない。本研究では、まず生産計画によって生産システム全体の消費エネルギーおよび生産性の最適化ができることを明らかにし、工作機械における消費電力モデルの構築が省エネに寄与することを示す。

2.2 製造業におけるエネルギー消費

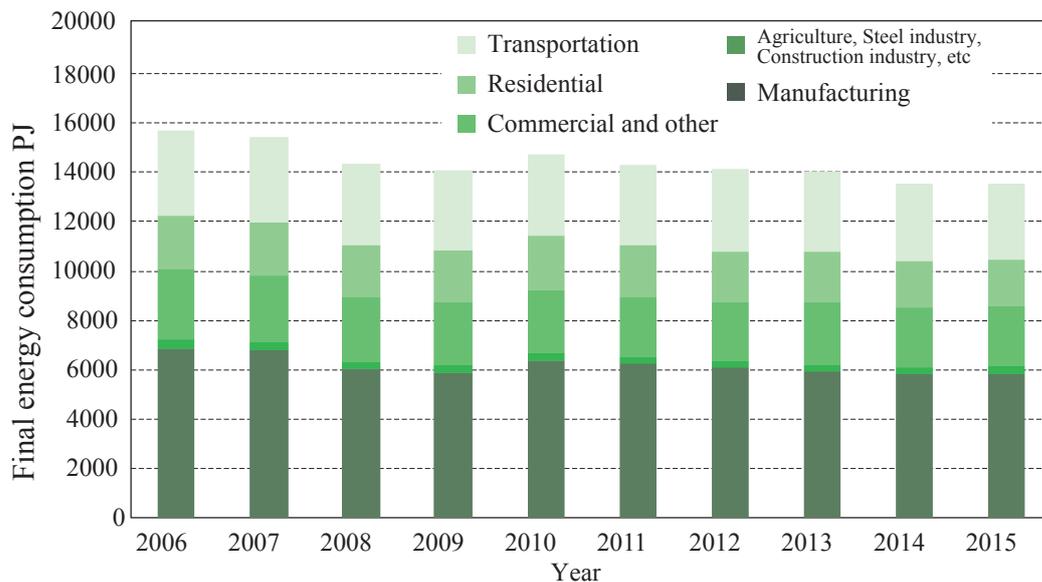


Fig. 2.2: Trend of final energy consumption in Japan [2].

資源エネルギー庁によるエネルギー白書 2017 [1] および平成 27 年度におけるエネルギー需給実績 [2] によると、図 2.2 に示されるように日本国内における最終エネルギー消費量は減少傾向にある。特に、2011 年度以降は東日本大震災に関連し節電意識が高まったことで更に減少が進んでいる。最近では実質 GDP が減少したこともあり、2014 年度最終エネルギー消費は 2013 年度に比べ 3.2 % の減少となった。2015 年度はその 2014 年度とほぼ横ばいとなっている。

部門別に見ると、製造業が含まれる企業・事業所他部門では、国内全体の傾向と同様に 2011 年以降で緩やかな減少傾向が見られる。特に製造業だけに注目すると、経済成長しつつもエネルギー消費は緩やかな減少傾向が見られることから、省エネへの貢献は大きいといえる。しかしながら、依然として日本国内における最終エネルギー消費の約 40 % を製造

業が占めていることから、持続可能な開発のため、より大きな省エネへの貢献が求められている。

また、我が国では「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）により省エネへの取り組みが後押しされている。省エネ法は、

- ▷ 工場等（工場又は事務所その他の事業場）
- ▷ 輸送
- ▷ 住宅・建築物
- ▷ 機械器具等（エネルギー消費機器等又は熱損失防止建築材料）

の4つの事業分野と、

- ▷ 燃料
- ▷ 熱
- ▷ 電気

の3つのエネルギーを対象に、「内外におけるエネルギーをめぐる経済的社会的環境に応じた燃料資源の有効な利用の確保に資するため、工場等、輸送、建築物及び機械器具等についてのエネルギーの使用の合理化に関する所要の措置、電気の需要の平準化に関する所要の措置その他エネルギーの使用の合理化等を総合的に進めるために必要な措置を講ずることとし、もって国民経済の健全な発展に寄与すること」を目的とし制定された。具体的には、工場ではエネルギー管理者の設置やエネルギー使用実績の把握、エネルギー原単位（単位量の製品を生産するのに必要なエネルギー量）の管理などが求められている。そして、2014年4月からは「電気の需要の平準化に関する所要の措置」の項目が新たに追加され、電力需給バランスを考慮した省エネ対策、すなわちピークカットも求められるようになった。ここでのピークカットとは、電力需要が集中する時間帯に使用する電力量を低く抑えることを指す。すなわち、製造業では総消費エネルギーだけでなく、時間あたりに消費する電力（ピーク電力やピークデマンド）をも低減することが求められている。

2.3 グリーン製造

前節に述べた背景の下，製造業はこれまでも

- ▷ グリーンな製品の開発，
- ▷ グリーンな製造，

によって省エネに貢献してきた。前者におけるグリーンな製品とは，エネルギーを効率的に使用することができる製品を指す。消費者がグリーンな製品を使用することで，製造業者も間接的にグリーン化に貢献することができる。後者は，製品製造時に発生する環境負荷の低減を指しており，製造業が直接的にグリーン化に貢献可能である。広義では，これらのような環境に優しい活動をすべて含めグリーン製造と呼ぶ [3]。一方で，狭義として，「グリーンな製造のための技術」をグリーン製造と呼ぶこともある。本研究では製造業が直接的に省エネに貢献できる，狭義でのグリーン製造に注目する。

グリーン製造に関する研究は，地域レベル，工場レベル，機械設備レベルと，さまざまな規模で行われてきた。たとえば，地域レベルではエコインダストリアルパーク (Eco-Industrial Park) のような産業共生 [4-7] があげられる。産業共生では複数の産業（企業）をひとつの地域に集約することで輸送距離の低減につながっている。また，企業間で廃棄物や熱エネルギーを有効活用する仕組みが構築されている。工場レベルでは，排気システムの改善 [8]，廃熱の再利用，効率的な空調設備の導入，工場に適した環境に工場を建築する [9]，建物の小型化 [10]，といったエネルギーを効率良く利用するための設備設計が行われている。生産システムを構成する要素となる，工作機械などの機械設備においても研究者のみならずメーカーらによっても積極的に省エネ技術の開発が進められている。たとえば，モーター停止時の回生エネルギーの回収システム [11] の搭載，重量や軸移動量の低減によって消費エネルギーの削減につながる小型化 [12,13] のほか，非運転時の電力消費を抑えるアイドルングストップの導入 [14,15] などが例に挙げられる。このような技術を導入した機器で生産システムを構築することで省エネが可能となる。

このほか，既存の機械設備を活用しつつ，低コストでグリーン製造を実現する手法も開発されてきた。工作機械に注目すると，消費されるエネルギーは（より詳細な分類を行う研究も存在するが）機械維持に消費される定常エネルギーと，実際に切削を行うために消費される変動エネルギーに分類できる。定常エネルギーは，工作機械やクーラントの冷却とコント

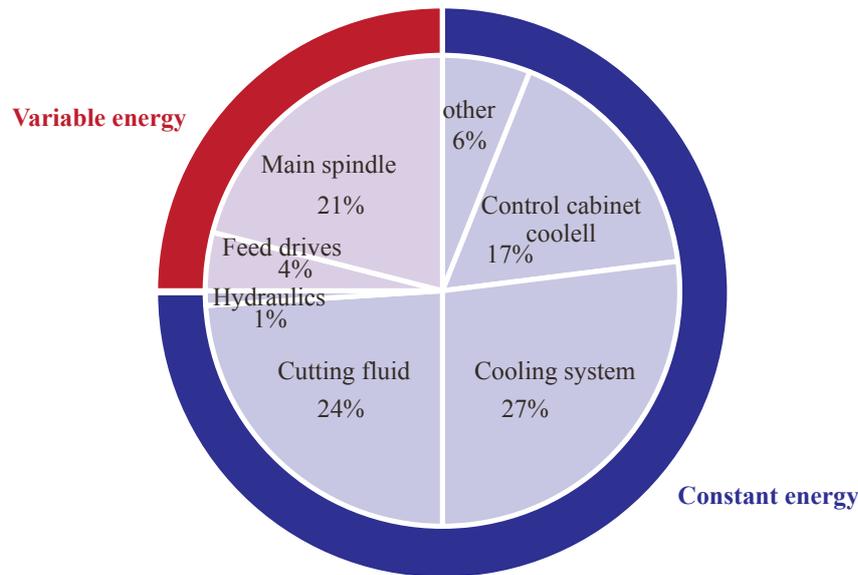


Fig. 2.3: The breakdown of power consumption in machine tool (DMC80 H dB) [19].

ロールに使われる電力が主となっており、工作機械の電源がオンになっている間はほぼ一定量消費しつづけている。一方で変動エネルギーは実際に加工を行うために消費されるエネルギーを主としており、切削力がこれに含まれる。被削材や工具、切削速度といった切削条件が、変動エネルギーが変動する要素となる。一般に変動エネルギーの占める割合は、図 2.3 に示されるように工作機械全体の 25% から 30% とされ、電力消費のほとんどは定常エネルギーといわれている [19]。そのため工作機械では稼働している時間を短くすることで総消費電力の削減が行われている。その具体的な手法としては、高速切削が挙げられる [16,17]。送り速度を上げる、可能な限り大きい工具を用いる、といった手段を用いて、高い能率で加工することにより稼働時間の短縮を目指している。また、適切な方法で被削材を固定する [18]、適切な加工経路を決定する [19,20]、適切な加工法や工作機械を使用する [21]、といった工夫によっても加工時間が短くなり、省エネが可能となる。

上記のようなグリーン製造の多くは、個々の設備や機械を対象として消費エネルギーの高効率化や最適化が行われている。しかしながら、このような個別の消費エネルギー最適化が全体の消費エネルギー最適化につながるとは限らない。たとえば、工作機械の高速加工を例にあげると、高速で加工を行うほど総消費電力量の低減につながる事が明らかになっているが、加工速度が増加するにつれて時間あたりの消費電力（ピーク電力）も増加する。個々

の機械におけるピーク電力の増加はわずかであっても、複数の機械で構成される生産システム全体で見たときには大きなピーク電力の増加となる。工場のような製造現場では電力会社とデマンド契約を交わしており、30分ごとのピークデマンドが契約値を超えると、超過量に応じた契約超過金を支払わなければならない。そのため、生産システムのような大きなスケールでは、持続可能性と経済的コストの両方を考慮する必要があり、ピークデマンドを制約値以内に抑制することも求められている。

そんな中、昨今の製造業では Industry4.0 [22] などの取り組みに後押しされ、IoT 技術や ICT を積極的に導入し、生産システム全体のエネルギーを適切に管理運用する動きが見られる。その代表的な仕組みを FEMS(Factory Energy Management System) という [23-29]。FEMS では、センサーを用いて熱や消費電力を含む様々なデータを計測し、エネルギーの「見える化」が行われている。「見える化」により、

- ▷ 異常なエネルギー消費を検知し、故障の早期発見、
- ▷ 製造原単位によるムダや効率悪化の発見、
- ▷ ピークデマンドの監視による生産管理の支援、

といった効果が得られている。しかしながら、「見える化」されたデータは管理者による判断を支援するに止まり、生産システムの運用は人の手によって行われている。FEMS そのものが直接的に生産管理を行う仕組みにはなっていないのが現状である。

この問題に対し、生産システム内で消費されるエネルギーの管理手法について、いくつかの研究が報告されている。Wenert ら [30] は生産計画立案段階および計画段階における評価と意思決定のプロセスとエネルギー効率基準を統合することを目的とし、消費電力を矩形で表す EnergyBlocks に基づく生産計画表現手法を紹介している。しかしながら、EnergyBlocks の概念モデルの提案に留まっている。Rahimifard ら [31] は EnergyBlocks と同様のアプローチを検討し、単一の製品を製造する際の消費エネルギーを詳細にモデル化している。Xu ら [32] は、ピーク電力に関連したスケジューリングに焦点を当て、混合整数計画法によるモデルを導入することによってスケジューリング問題を定式化した。Fang ら [33] は、スケジューリングの生産性だけでなく、ピーク電力と炭素量も考慮した生産スケジューリング問題を提案している。2 機械の単純なジョブショップ問題に提案手法を適用することによって、これらの指標間のトレードオフを明らかにした。Mouzon と Yildilrm [34] は、多目的に使用

できる単一機械における、全体的な遅れと総エネルギー消費量を最小限に抑えるスケジューリング問題を解くためのフレームワークをグリーンディメタヒューリスティクスを用いて提案した。Bruzzo ら [35] は、工場フロアのピーク電力を制御するモデルが組み込まれた高度な計画立案 (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した。そして、テストケースに適用することによって、そのアプローチの適用性を実証した。この他にもエネルギー高効率な計画とスケジューリングのための様々なモデルと方法が提案されており、そのいくつかは Dufflou ら [36] により紹介されている。しかしながら、これらの研究はスケジュール決定モデルを構築することに焦点を当てており、製造プロセスにおけるエネルギー/消費電力を含む物理現象を考慮していない。

2.4 プロジェクトの計画と管理

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。まず、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。本研究で提案するエネルギー負荷計画はプロジェクトスケジューリング問題として定式化できる。ここでは、プロジェクト管理について述べる。

プロジェクト管理は PMI(Project Management Institute) から提供されている知識体系 PMBOK(Project Management Body of Knowledge) により標準化されている。PMBOK では、プロジェクトにおける知識管理体系を以下の 10 のエリアに分けている [37,38]。

(1) プロジェクト統合マネジメント

プロジェクト管理の特定、定義、結合、統一、調整などを行うためのプロセスからなる。すなわち、プロジェクト管理における各プロセスを相互に調整した上でプロジェクトの達成を図る役割を持つ。

(2) プロジェクト・スコープ・マネジメント

プロジェクトを成功のうちに完了するために必要なすべての作業を洗い出すために必要なプロセスからなる。具体的には、スコープ計画、定義、検証などがある。

(3) プロジェクト・タイム・マネジメント

プロジェクトを所定の時期に完了させるためのプロセスからなる。プロジェクト・タイム・マネジメントでは、作業の資源および所要時間の見積もりを通して、最終的にプロジェクト・スケジュールが立案される。

(4) プロジェクト・コスト・マネジメント

プロジェクトを予算内で完了するために必要なコストの見積もり、予算化、コントロールなどのプロセスからなる。

(5) プロジェクト品質マネジメント

プロジェクトが取り組むべきニーズを満足するために、品質方針、品質目標、品質に対する責任などを決定するプロセスである。

(6) プロジェクト人的資源マネジメント

プロジェクトのチームメンバーのみならず、ステークホルダー全体をプロジェクトの目的達成のために効果的に活用するためのマネジメントである。プロジェクト人的資源マネジメントでは、組織計画や要員調達に加えて、チーム育成も含まれる。

(7) プロジェクト・コミュニケーション・マネジメント

プロジェクトの実行に関する情報を、プロジェクトメンバー間で正確に届けるためのプロセスからなる。

(8) プロジェクト・リスク・マネジメント

プロジェクトに関するリスクの管理の計画、特定、分析などの実施にかかるプロセスからなる。プロジェクト・リスク・マネジメントの目標は、プロジェクトに対してプラスとなる事象の発生確率と影響度を増加させ、マイナスとなる事象の発生確率と影響度を減少させることである。

(9) プロジェクト調達マネジメント

作業の実行に必要な製品、サービスをプロジェクト・チームの外部から購入・取得するプロセスからなる。

(10) プロジェクト・ステークホルダー・マネジメント

プロジェクトの実行に関する情報を、ステークホルダー間で正確に届けるためのプロセスからなる。

エネルギー負荷計画はプロジェクト・タイム・マネジメントにおける RCPSP(資源制約付きプロジェクトスケジューリング問題)の枠組みを用いて定式化される。

2.5 RCPSP

RCPSP(資源制約付きプロジェクトスケジューリング問題)は、製造工程、製品開発、工場の建築および空港の修復など、さまざまな対象に用いられるスケジューリング問題である。RCPSPでは作業間の先行関係と資源容量の不足を考慮しつつ目的関数の最適化を目指し、各作業の開始時刻を決定する。資源の例としては、機械、人、場所、金のような有限であるものが挙げられる。また、目的関数については、メイクスパン、納期とのずれの最小化などが用いられる。

2.5.1 RCPSP の定式化

RCPSPは以下のように定式化される [37]。プロジェクトは N 個の作業 i ($i = 1, \dots, N$) で構成される。作業 i の所要時間は d_i で表される。ただし、一度開始した作業は中断することはできないとされる。また、作業間に先行制約が存在する。作業 i の開始までに完了していなければならない(先行先約となる)すべての作業の集合を P_i で表す。プロジェクト実行にあたり、 N_R 種類の再生可能資源 k ($k = 1, \dots, N_R$) が与えられる。再生可能資源 k は R_k だけいつでも利用可能であり、各作業は、処理の完了まで資源量 r_{ik} を占有する。

RCPSPでは、すべての作業および資源の情報は確定的であり、予め与えられていることとする。また、各パラメータは非負の整数であると仮定する。以上の条件のもと、各作業 i の開始時刻 S_i を決定することによりスケジュールを生成する。目的関数はプロジェクトのメイクスパンや平均リードタイムなどであり、これらを最小化するスケジュールを生成することが目的となる。

2.5.2 RCPSP による分類

Herroelen ら [39] による分類では, RCPSP は次のような三つの領域 α, β, γ によって分類される.

- ▷ α : 資源特性による分類
- ▷ β : 作業特性による分類
- ▷ γ : 評価尺度による分類

次に, 各領域に含まれるものを記す.

- ▷ α : 資源特性による分類

RCPSP の資源の特性は以下の 3 つの属性によって示される.

- (1) 資源の種類の数
- (2) 資源の種類
- (3) 資源の利用可能量

資源の種類には毎時間ごとに一定量が利用可能となる再生可能資源, 使用することにより利用可能量が減少する消費資源が存在する.

- ▷ β : 作業特性による分類

この分類では作業の特徴を特定する.

- (1) 作業の分割
- (2) 作業の先行制約
- (3) 準備時間
- (4) 処理時間
- (5) 納期
- (6) 作業の資源要求量
- (7) 作業のモードの種類
- (8) 作業のキャッシュフロー

モードとは、作業を処理する方法の選択肢を意味する。モードは作業者が多いときは早く、少ないときは遅く作業が処理されるというような状況を想定してモデル化されたものである。選択可能なモードが複数存在する状況では、各作業に対してモードを割り当て、そのモードにおいて作業をスケジューリングすることとなる。

▷ γ : 評価指標による分類

ここでは、評価尺度が分類される。

- (1) 完了時刻に関する評価尺度
- (2) 資源平準化問題に関する評価尺度
- (3) 金融に関する評価尺度

2.6 プロジェクトの表現

プロジェクト管理では、プロジェクトの表現手法として

- ▷ ガントチャート
- ▷ AoN(Activity on Node)
- ▷ AoA(Activity on Arc)

といったものが使用されている。

ガントチャートは図 2.4 に示すような、縦軸に作業内容・担当者・開始日・終了日・作業間の関連など、横軸に時間を書くタイムチャートとなる。矩形が作業を示している。全体の作業の流れと進捗状況を表すため、ヘンリー・ガントによって考案された。AoN は、図 2.5 に示すように、プロジェクトを構成する作業の先行関係をネットワークを用いて表現する。図 2.5 中のアローダイアグラムのノード（円形部）は作業あるいは作業の区切りを意味し、アーク（矢印）は作業間の先行関係を意味する。ノードの先行作業が全て終わるまで後続作業に着手できない。AoA は図 2.6 に示すように、作業をアークによって表現する。ノードは作業と作業の区切りを示しており、ノードに入ってくるアーク（先行作業）が終了しなければそのノードから出ていくアーク（後続作業）には着手できない。AoA や AoN は作業の相互依存が明確になる特徴がある。本研究では、先行関係を考慮する問題はケーススタディにおいて扱わないため、ガントチャートを用いてエネルギー負荷計画を表現する。

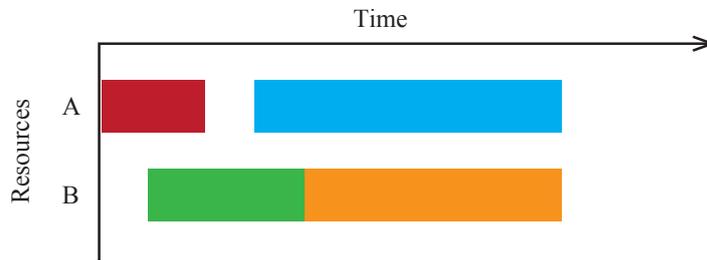


Fig. 2.4: Gantt chart.

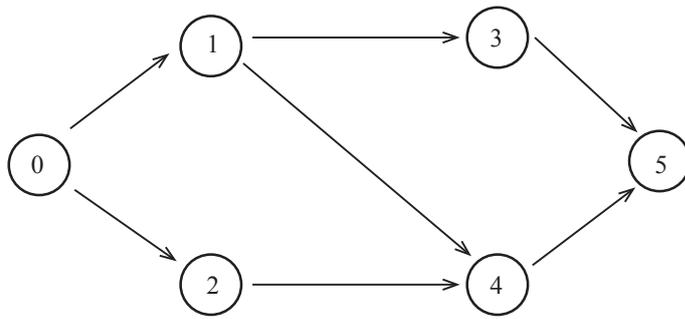


Fig. 2.5: AoN network.

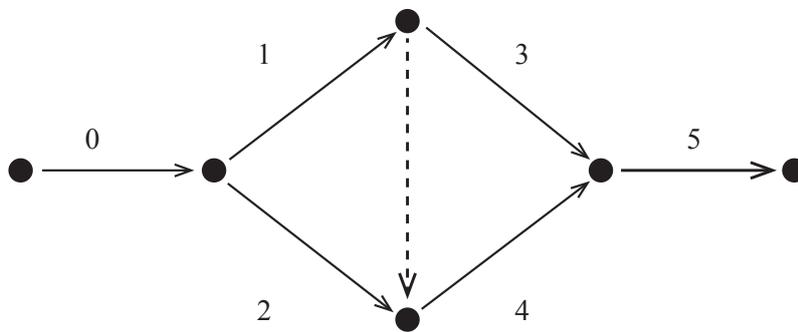


Fig. 2.6: AoA network.

参考文献

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁, 平成 28 年度 エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2017), pp. 133-248, <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/>, (2018 年 1 月 10 日最終アクセス) .
- [2] 経済産業省資源エネルギー庁, 平成 27 年度 (2015 年度) エネルギー需給実績 (確報), pp. 6-23, http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/, (2018 年 1 月 10 日最終アクセス) .
- [3] S. M. Gupta, Lean Manufacturing, Green Manufacturing and Sustainability, 日本経営工学会論文誌, Vol. 67, No. 2E, (2016), pp. 102-105.
- [4] M. R. Chertow, Uncovering Industrial Symbiosis, *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 11, No. 1, (2007), pp. 11-30.
- [5] H. Thieriot, and D. Sawyer, Development of Eco-Efficient Industrial Parks in China: A Review, *The International Institute for Sustainable Development*, (2015), pp. 1-23.
- [6] Kalundborg Symbiosis, <http://www.symbiosis.dk>, (2018 年 1 月 9 日最終アクセス) .
- [7] Q. Zhu, E. A. Lowe, Y. Wei, and D. Barnes, Industrial Symbiosis in China: A Case Study of the Guitang Group, *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 11, No. 1, (2007), pp. 31-42.
- [8] G. Posselt, J. Fisher, T. Heinemann, S. Thiede, S. Alvandi, N. Weinert, S. Kara, and C. Hermann, Extending Energy Value Stream Models by the TBS Dimension - Applied on a Multi Product Process Chain in the Railway Industry, *Procedia CIRP*, Vol. 15, (2014), pp. 80-85.
- [9] N. Diaz-Elsayed, D. Dornfeld, and A. Horvath, A Comparative Analysis of the Environmental Impacts of Machine Tool Manufacturing Facilities, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 95, (2015), pp. 223-231.
- [10] Y. Okazaki, Microfactories –A New Methodology for Sustainable Manufacturing –, *International Journal of Automation Technology*, Vol. 4, No. 2, (2010), pp. 82-87.

- [11] N. Diaz, S. Choi, M. Helu, Y. Chen, S. Jayanathan, Y. Yasui, D. Kong, S. Pavanaskar, and D. Dornfeld, Machine Tool Design and Operation Strategies for Green Manufacturing, *Proceedings of 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting*, Vol. 1, (2010), pp. 271–276.
- [12] Y. Kaneko, N. Suzuki, K. Kanahira, H. Wada, and M. Yamano, Development of Ultra Slim Utility Type CNC Lathe Adapted to Automation – An Approach to Energy Conservation from Machine Shops –, *International Journal of Automation Technology*, Vol. 4, No. 2, (2010), pp. 138–149.
- [13] T. Ogawa, Building of Efficient, Energy-Saving Lines with an Extremely-Compact Machining Center and CNC Lathe, *International Journal of Automation Technology*, Vol. 4, No. 2, (2010), pp. 150–154.
- [14] 植竹伸二, 工作機械における省エネルギーへの取り組み, *JTEKT ENGINEERING JOURNAL*, No. 1010, (2012), pp. 9–12.
- [15] M. Fujishima, M. Mori, and Y. Oda, Energy-Efficient Manufacturing on Machine Tools by Machining Process Improvement, *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*, Springer, (2014), pp. 461–466.
- [16] M. Mori, M. Fujishima, Y. Inamasu, and Y. Oda, A Study on Energy Efficiency Improvement for Machine Tools, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 60, No. 1, (2011), pp. 145–148.
- [17] M. Helu, B. Behmann, H. Meier, D. Dornfeld, G. Lanza, and V. Schulze, Impact of Green Machining Strategies on Achieved Surface Quality, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 61, (2012) pp. 55–58.
- [18] G. Campatelli, A. Scippa, and L. Lorenzini, Workpiece Orientation and Tooling Selection to Reduce the Environmental Impact of Milling Operations, *Procedia CIRP*, Vol. 14, (2014), pp. 575–580.

- [19] B. Denkena, F. Flöter, and L. Hülsmeier, Energy-Efficient Machine Tools and Technologies, *Proceedings of the 15th International Machine Tool Engineers Conference*, (2012), pp. 174–187.
- [20] 林晃生, 井上雄太, 佐藤隆太, 白瀬敬一, 数値制御工作機械送り駆動系の消費エネルギーに基づく工具経路評価, *精密工学会誌*, Vol. 80, No. 7, (2014), pp. 395–400.
- [21] Y. Oda, M. Fujishima, and Y. Takeuchi, Energy-Saving Machining of Multi-Functional Machine Tools, *International Journal of Automation Technology*, Vol. 9, No. 2, (2015), pp. 135–142.
- [22] Forschungsunion, and Acatech, Securing the Future of German Manufacturing Industry, Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0, Final Report of the Industrie 4.0 Working Group, (2013), pp. 19–33, http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report_-_Industrie_4.0_accessible.pdf, (2018 年 1 月 5 日 最終アクセス).
- [23] H. Makita, Y. Shida, and N. Nozue, Factory Energy Management System Using Production Information, *Mitsubishi Electric ADVANCE Magazine*, Vol. 140, (2012), pp. 7–11.
- [24] 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*, (2012), pp. 41–46.
- [25] 田中克知, 渡辺洋, 遠藤明, 工場エネルギー操業支援システム「Enerize E3」-工場における「見える化」, エネルギー効率最適操業へ-, *横河技報*, Vol. 53, No. 1, (2010), pp. 23–26.
- [26] A. Vijayaraghavan, and D. Dornfeld, Automated Energy Monitoring of Machine Tools, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 59, (2010), pp. 21–24.

- [27] 鳴海克則, 木村隆之, 渡辺拓也, 製鉄所のエネルギー管理を最適化する「鉄鋼 EMS パッケージ」, 富士電機技報, Vol. 86, No. 3, (2013), pp. 177–181.
- [28] 川村雄, 堀口浩, 大野健, 統合 EMS プラットフォームによる最適運用計画機能構築フレームワーク, 富士電機技報, Vol. 86, No. 3, (2013), pp. 197–201.
- [29] E. O’Driscoll, D. O’Gusack, and G. E. O’Donnell, The characterisation of energy consumption in manufacturing facilities – A hierarchical approach, *International Journal of Automation Technology*, Vol. 7, No. 6, (2013), pp. 727–734.
- [30] N. Weinert, S. Chiotellis, and G. Seliger, Methodology for Planning and Operating Energy-Efficient Production Systems, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 60, No. 1, (2011), pp. 41–44.
- [31] S. Rahimifard, Y. Seow, and T. Childs, Minimising Embodied Product Energy to Support Energy Efficient Manufacturing, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 59, No. 1, (2010), pp. 25–28.
- [32] F. Xu, W. Weng, and S. Fujimura, Energy-Efficient Scheduling for Flexible Flow Shops by Using MIP, *IIE Annual Conference and Expo 2014*, (2014), pp. 1040–1048.
- [33] K. Fang, N. Uhan, F. Zhao, and J. W. Sutherland, A New Shop Scheduling Approach in Support of Sustainable Manufacturing, *Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, (2011), pp. 305–310.
- [34] G. Mouzon, and M. Yildirima, A Framework to Minimize Total Energy Consumption and Total Tardiness on a Single Machine, *International Journal of Sustainable Engineering*, Vol. 1, No. 2, (2008), pp. 105–116.
- [35] 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*, Vol. 61, No. 1, (2012), pp. 459–462.

- [36] 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*, Vol. 61, No. 2, (2012), pp. 587–609.
- [37] 森田大輔, プロジェクトの不確実性を考慮したスケジューリング技法に関する研究, 撰南大学 博士学位論文, (2012), pp. 7–19.
- [38] G. M. Cambell, 世界一わかりやすいプロジェクトマネジメント, 第 4 版, 総合法令出版株式会社, (2015), pp. 66–77.
- [39] W. Herroelen, E. Demeulemeester, and B. D. Reyck, A Note on the Paper ”Resource Constrained Project Scheduling: Notation, Classification, Models and Methods” by Brucker et al., *European Journal of Operational Research*, Vol. 128, No. 3, pp. 679–688.

第 3 章 エネルギー負荷計画

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を構築する。本章では、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示すことで、消費電力モデルの必要性を明らかにする。製造システム全体のエネルギーを考慮した生産計画である、エネルギー負荷計画の概念的枠組みを文献 [1,2] にて提案した。そして、文献 [3] ではエネルギー負荷計画をマルチモード RCPSP の枠組みで定式化し、数値実験によりエネルギー負荷計画による生産性向上の効果を検証した。本章では、このエネルギー負荷計画について述べる。

3.1 エネルギー負荷計画による最適化

提案手法は、FMC(Flexible Machining Cell) や FMS(Flexible Manufacturing System) などの自動製造システムでの使用が想定されており、エネルギー高効率な生産計画を提供する。対象とする製造システムは、 M 台の CNC 工作機械が並行して構成されており、それぞれがすべての製品（ワークピース）を処理することができる。1つの製品の処理を i と表示された 1つの製品に対応する作業とし、 N 個の作業が製造システムで処理されるものとする。

図 3.1 は、エネルギー負荷計画に基づく生産システムの運用に関する枠組みについて示している [2]。まず、製造システムの主要な構成要素である CNC 工作機械について、複数の加工速度で切削を行い、それぞれの消費電力を計測する。そして、エネルギー負荷計画で用いられる処理モードとして、各動作の予測処理時間とともに予測電力プロファイルとしてモデル化する。そして、加工時間内におけるいずれのタイミングにおいても既定のピーク電力の制約を守りつつ、生産性指標を最適化するように、各動作の処理モードおよび動作開始時間を決定する最適化問題を解くことによってエネルギー負荷計画を作成する。エネルギー負荷計画には、時間軸上の各処理に適した処理モードが記される。

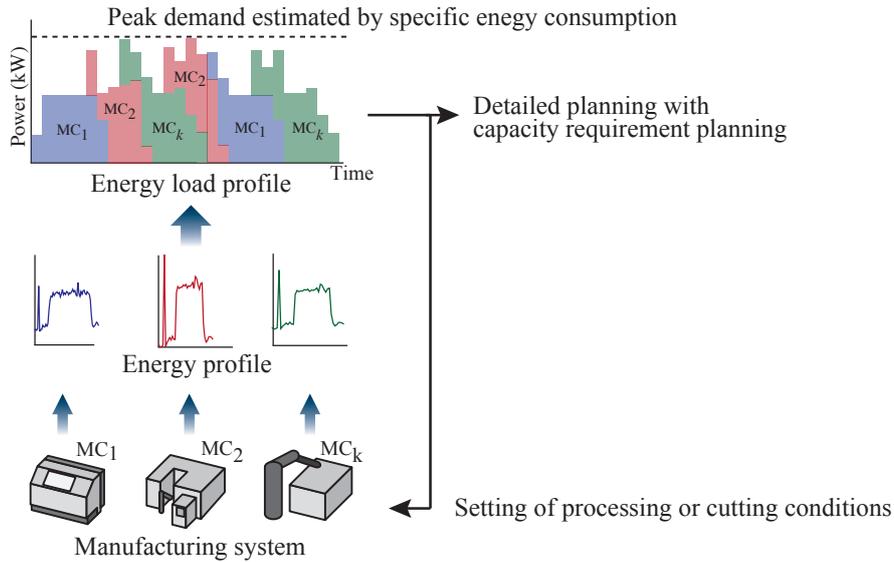


Fig. 3.1: Framework of energy-efficient manufacturing systems based on energy load profile [2].

このようなエネルギー負荷計画の導入には、大きく分けると2つのメリットが存在する。第一に、エネルギー高効率な工作機械の運用が保証されていることから、能力負荷計画とエネルギー負荷計画を併用することで詳細な工場フロアレベルのスケジュールを作成することができる。第二に、エネルギー負荷が最適化されたエネルギー負荷計画を根拠とし、エネルギー負荷に基づいた加工条件を工作機械に指示することで、グリーンな機械加工の実現につながる。

まず、エネルギー負荷計画は T で示される所定の計画期間内を対象に生成される。利用可能な電力は期間 $(t - 1, t](t = 1, \dots, T)$ にわたって C_t に制限され、作業の総完了時間（または平均完了時間）が最小となることが生成の条件となる。ピーク電力の制約の下で、製造システムのエネルギー効率に影響する完了時間を短縮することによって、総エネルギー消費の節約にも繋がるのが期待される。総完了時間を最小にするようなエネルギー負荷計画を導出するにあたり、本研究では 2.5 節で触れた RCPSP の枠組みに基づいて定式化する。

3.1.1 処理モード

図 3.2 は CNC 工作機械によって行われる材料除去プロセスにおける電力プロファイルの例である。図 3.2 に示す消費電力は、3 軸立形マシニングセンタを用いた S45C ブロックの

溝入れ加工によって得られたものである。消費される電力は、第2.3節でも述べたように定常エネルギーと変動エネルギーの2つに大別することができる。定常エネルギーは機械維持のために消費されるエネルギーを指し、工作機械が起動中はほぼ一定と見なされ、例えば図3.2中においては約380 Wである。変動エネルギーは切削加工のために消費される電力である。変動エネルギーも切削中においては消費電力がわずかに変化しただけであるため、一定と見なすことができる。ただし、工作機械の加工速度や加工能率に応じて、どの値で一定値をとるかは変化する。例えば、図3.3は異なる送り速度と主軸回転数を切削条件とした、3つの異なる電力プロファイルを示している。消費電力を節約するためには、高速で処理する方が良いとされる [4] が、一方でピーク電力が高くなる傾向があり、生産システム全体という視点から見ると、ピークデマンドに影響する。このような材料除去プロセスの消費エネルギー特性に基づいて、本研究ではあらゆる機械加工作業に対して、複数の実行可能な処理モードが存在すると仮定する。また、所定の処理モードの1つは、エネルギー消費の状況に応じて選択されるものとする。

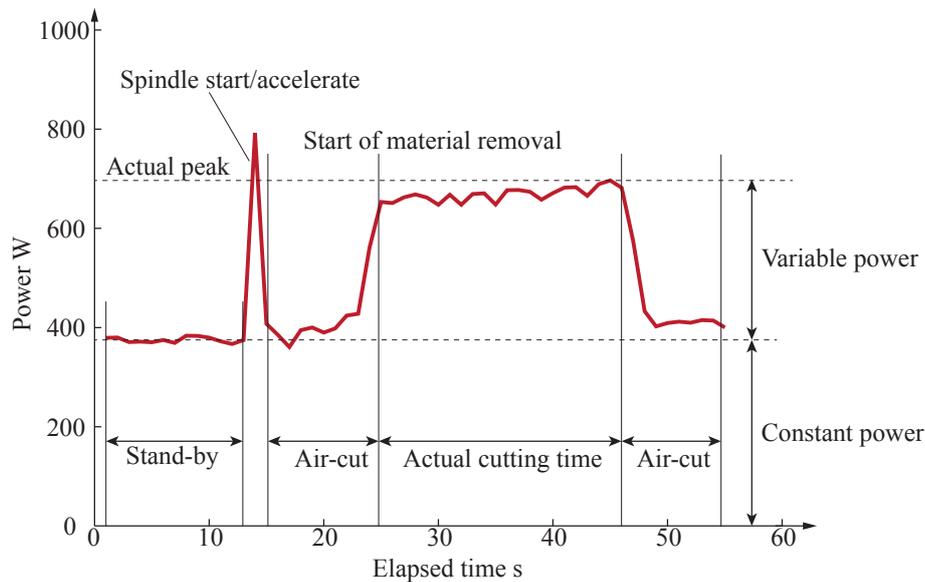


Fig. 3.2: Typical power profile of a material removable process: milling of S45C on three-axis vertical machining center with 100 mm/min feed rate and 1000 min^{-1} [3].

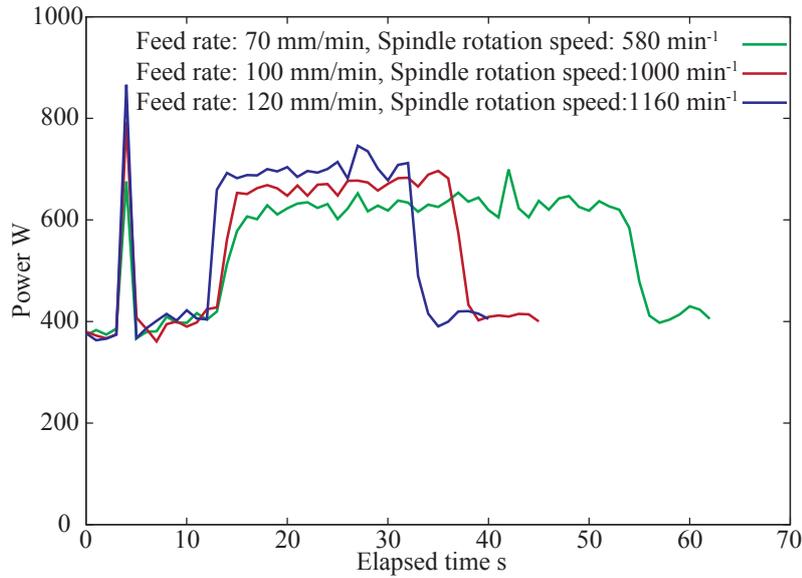


Fig. 3.3: Example of three different power profiles in milling process with a change in the cutting conditions. Higher machining speed tends to require lower electrical energy consumption but higher power consumption (peak power) [3].

3.1.2 処理モードにおける加工時間とエネルギー消費量

作業 i ($i = 1, \dots, N$) は, M_i 種類のうち特定の処理モード m ($m \in 1, \dots, M_i$) で処理されることを想定する. 各処理モードは作業 i を処理モード m で処理したときにおける予測加工時間 p_{im} および, 作業 i を処理モード m で処理したときの特定の区間 τ における予測エネルギー消費量 $r_{im\tau}$ を持つ. ここでは, p_{im} は実際の作業 i の計測された処理時間から導かれ, $r_{im\tau}$ は区間 $[\tau - 1, \tau]$ ($\tau = 1, \dots, p_{im}$) 上の消費電力を指す.

予測処理時間 p_{im} は, 式 (3.1) のように処理モード m における作業 i の実際の処理時間 \hat{p}_{im} を時間間隔 h で分割し, タイムスロットの数として定義できる.

$$p_{im} = \left\lceil \frac{\hat{p}_{im}}{h} \right\rceil \quad (3.1)$$

なお, $\lceil * \rceil$ は $*$ 以上の最小の整数となる.

予測エネルギー消費量 $r_{im\tau}$ は, 各タイムスロット τ における実際のエネルギー消費の平均を計算することで求められる. 図 3.4 は, 実際の電力プロファイルからどのように処理モードを抽出するかを示しており, 時間間隔 $h = 5$ で電力プロファイルの区間 $[10, 55]$ (実際の処理時間は 45 秒) を考えると 9 つのタイムスロット $\tau = 1, \dots, 9$ (予測処理時間は 9) を持

つことになる。次節で示す数理モデルでは、このタイムスロットの長さが最小単位時間に相当する。

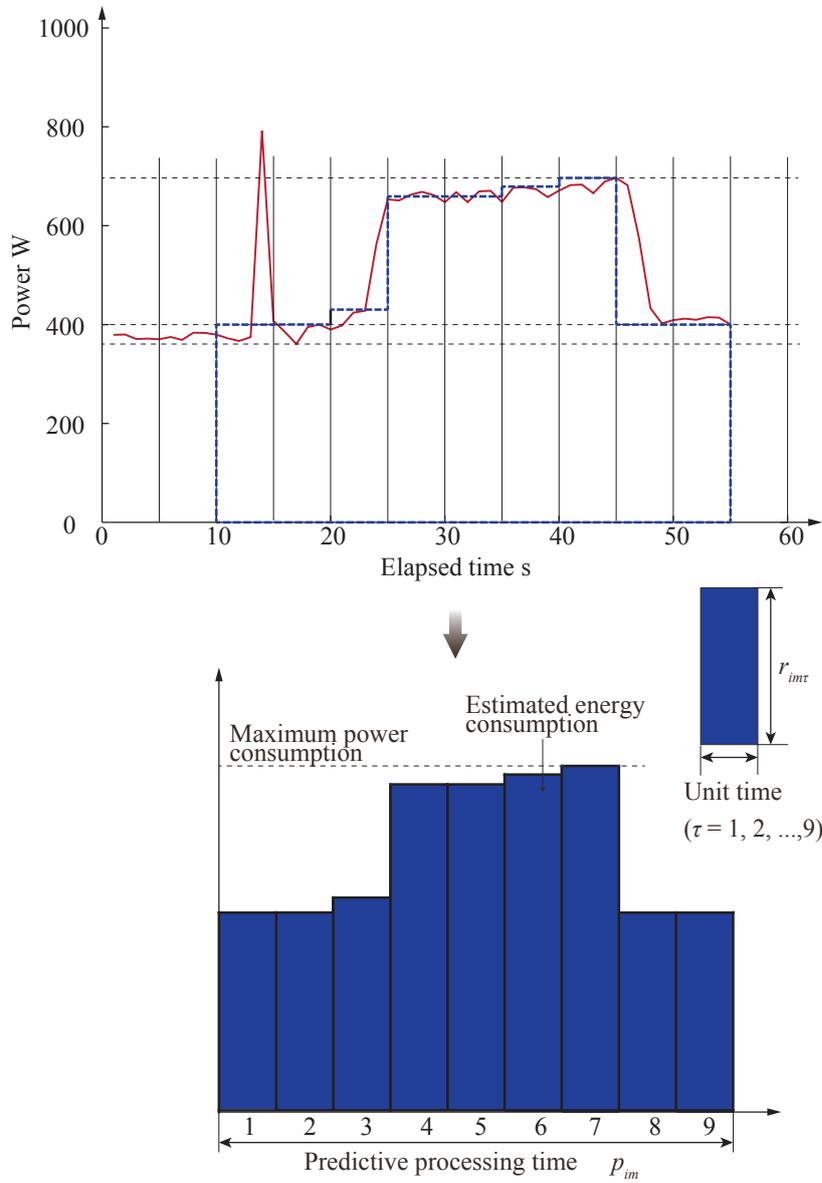


Fig. 3.4: Extraction of processing mode [3].

3.2 RCPSP による定式化

エネルギー負荷計画は、前述のような処理モードを含めた RCPSP の問題として次のように定式化できる。

$$\min. f = \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T tx_{imt} \quad (3.2)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{m=1}^M \sum_{t=p_{im}}^T x_{imt} = 1, \quad i = 1, \dots, N \quad (3.3)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{t=p_{jm}}^T tx_{jmt} \leq \sum_{m=1}^M \sum_{t=p_{im}}^T (t - p_{im})x_{imt}, \quad (3.4)$$

$$j \in \mathcal{P}_i, i = 1, \dots, N + 1$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{q=t}^{t+p_{im}-1} \left(\sum_{m=1}^M r_{im(p_{im}+t-q)}x_{imq} \right) \leq C_t, \quad (3.5)$$

$$t = 1, \dots, T$$

x_{imt} は決定変数であり、時刻 t において作業 i が処理モード m により完了したとき 1 をとり、そうでなければ 0 をとる。 \mathcal{P}_i は作業 i に先行する作業の集合を表し、作業 $N + 1$ は N 回の実際の作業のすべてが先行するエネルギー負荷計画の終了を表すダミー操作を表す。式 (3.2) は、処理モード m における作業 i の完了時間を tx_{imt} で表しており、最小化すべき総完了時間を表す目的関数である。式 (3.3) は、厳密に各処理モードにおける各作業 i の完了時間が 1 つであることを表している。式 (3.4) は、2 つの異なる作業 i と $j \in \mathcal{P}_i$ 間の優先順位を表す。式 (3.5) は、 t における電力使用量を保証する。 t で必要な総消費電力は C_t を越えない。上記問題のような RCPSP は一般的に NP 困難であるため、最適解を求めるのは非常に困難である。そのため、本研究ではヒューリスティックスを用いることとする。

3.3 ガントチャートによる RCPSP の表現

RCPSP によって立案される計画をガントチャートによって視覚的に表現すると、図 3.5 のようになる。図 3.5(a) では縦軸に使用した機械、横軸に時間を記している。図 3.5(b) では縦軸に消費資源（ここでは消費電力）、横軸に時間が示され、破線部がピークデマンドの制約を表している。図 3.5(a) および図 3.5(b) は同じ計画を表しているが、本研究では消費電力に注目するため図 3.5(b) に示すようなガントチャートを用いる。このガントチャート上で

は作業は矩形で表され、矩形の形が消費する電力を表している。エネルギー負荷計画は、このような矩形をピークデマンドの制約（破線）を超えないようにしつつ、総完了時間を最小化するように配置する問題である。ただし、この矩形が持つ情報は消費電力と時間のため、ガントチャート上では時間区間ごとに各大きさは変わらず上下に移動しても問題はない。

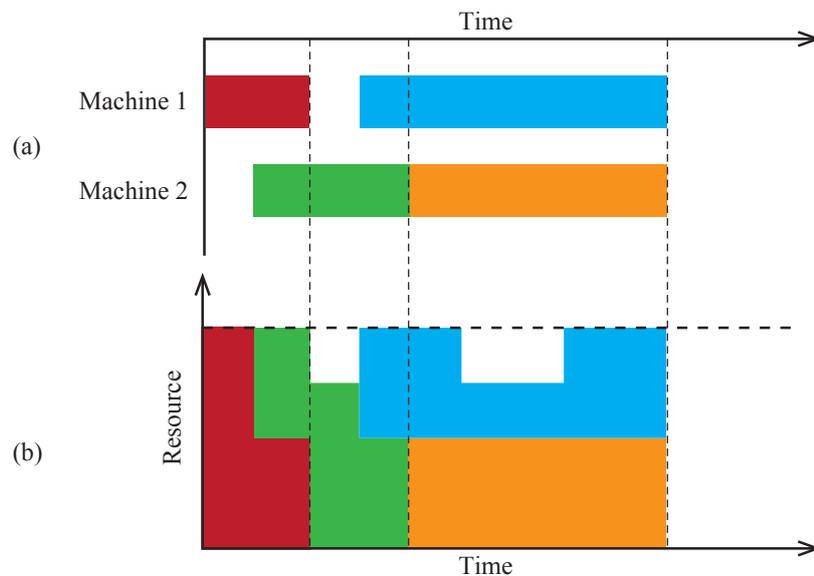


Fig. 3.5: Representation of schedule in RCPSP by Gantt chart.

3.4 ケーススタディ1

本節では、CNC 工作機械の切削実験に基づき、処理モードをどのように導出できるかを実際に示す。次に、多スタート局所探索法 (MSLS) によって生成されるエネルギー負荷計画の適用可能性を検討する。また、いくつかの数値例を用いて計算シミュレーションにより得られた計画の特性を調べる。

3.4.1 切削実験

まず、図 3.6 に示すような A, B, C, D, E の 5 種類のワークピースの切削実験を行った。図 3.7 に示す 3 軸立形マシニングセンタ (FANUC Tape Center Model-D) と、 $\phi 10$ mm の TiN コーティングエンドミル (三菱マテリアルズ G4MCD) を使用した。各ワークピースは、 $W \times D \times H = 74 \text{ mm} \times 74 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ の A5052 アルミニウム合金のブロックを被

削材としている。図 3.6 に示すように、ワークピース A は、X 軸方向に幅 12 mm、深さ 3 mm の 3 つの溝がある。同様に、ワークピース B は 4 つの溝を有する。ワークピース C と D にはさらに Y 方向への加工が加わり、ワークピース C には 1 つ、ワーク D には 2 つの溝がある。ワーク E には X 軸方向と Y 軸方向、そして円形の幅 12 mm、深さ 3 mm の溝があ

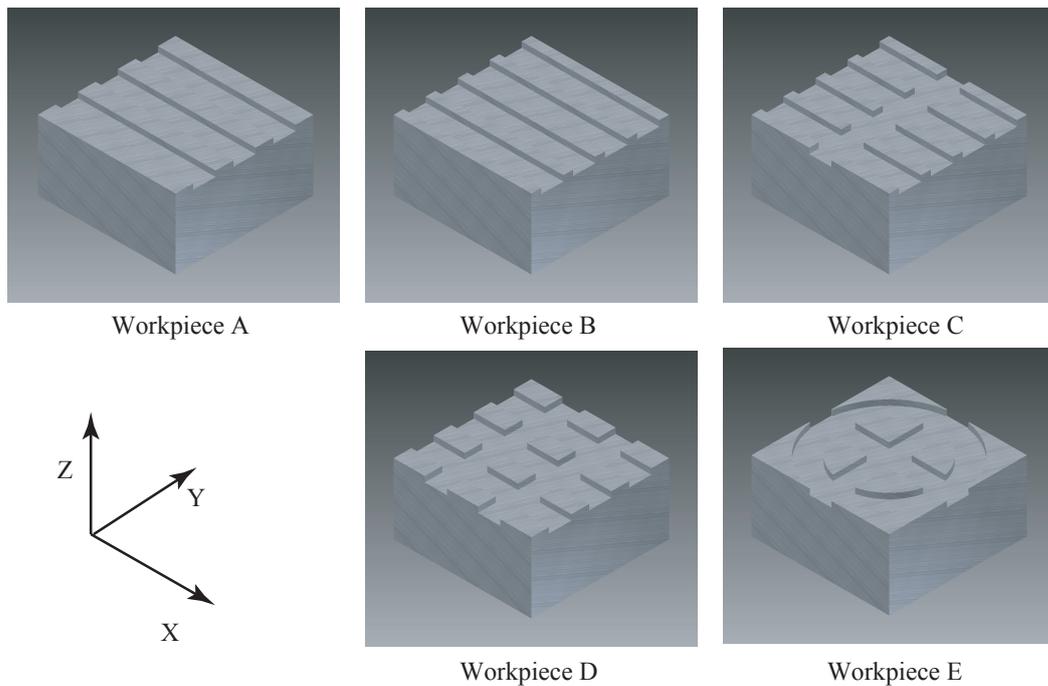


Fig. 3.6: Workpieces [3].

る。ここでは、(回転数 S , 送り速度 F) = (2000,1000), (3000,1200), (3000,1500) の 3 つの処理モードを検討した。主電源部に 3P3W に対応した Kyoritsu KEW6305 パワーメータを接続し、1 秒ごとの消費電力を測定した。得られた消費電力と処理時間の実測値に対し、切削プロセスの開始から 60 秒ごとを 1 区間として消費電力を平均化することによって 3 つの異なる処理モードを生成した。表 3.1 に各処理モードの実際の処理時間 (秒)、エネルギー消費量、およびピーク電力を示す。表 3.1 の各ワークピースにおける下から 3 項目は、1 分を単位時間 (式 (3.1) の $h = 60$ 秒) とした予測処理時間、予測消費電力量およびピーク電力を示している。3.1.2 項で述べたように、予測消費電力量とピーク電力は、それぞれ各タイムスロットの実際の消費電力量と消費電力の平均を計算することによって得られた。各ワークピースを比較すると、主軸回転数と送り速度の両方が増加するにつれ、処理時間が短くなることから、結果として消費電力量が減少する傾向があることがわかる。しかし、処理時間



Fig. 3.7: Tape Center Model-D.

が短くなるとピーク電力が高くなる傾向も見られる。これらの結果は、加工速度と消費電力の間に強い正の相関関係があることを示している。また、主軸回転数と送り速度の両方から導出される加工モードの選択が、エネルギー高効率な加工作業に繋がることを示している。また、比較的高い処理速度を選択することによって、消費電力量の削減が期待できることも明らかである。しかしながら、同時に処理される作業の組み合わせによっては、製造システムで使用可能な電力の最大値を超えるリスクがあることに留意が必要である。すなわち、エネルギー負荷の最適化プロセスが必要であることを示している。

Table 3.1: Processing mode of workpieces based on the results of cutting experiments (unit of a time slot: 1 min) [3].

Processing Mode	1	2	3
Spindle speed	2000	3000	3000
Feed rate	1000	1200	1500
Workpiece A			
Actual processing time (s)	241	208	175
Energy consumption (kJ)	281	276	230
Peak power (W)	2508	3605	3464
Predictive processing time (min.)	5	4	3
Predictive energy consumption (kJ)	299	313	235
Predictive peak power (W)	1192	1361	1354
Workpiece B			
Actual processing time (s)	315	272	229
Energy consumption (kJ)	363	350	297
Peak power (W)	1882	1965	2143
Predictive processing time (min)	6	5	4
Predictive energy consumption (kJ)	402	379	310
Predictive peak power (W)	1179	1331	1318
Workpiece C			
Actual processing time (s)	384	336	280
Energy consumption (kJ)	429	382	364
Peak power (W)	1588	1849	2046
Predictive processing time (min)	7	6	5
Predictive energy consumption (kJ)	465	405	386
Predictive peak power (W)	1133	1171	1323
Workpiece D			
Actual processing time (s)	461	397	334
Energy consumption (kJ)	518	502	426
Peak power (W)	2579	2147	3231
Predictive processing time (min)	8	7	6
Predictive energy consumption (kJ)	538	527	455
Predictive peak power (W)	1155	1304	1306
Workpiece E			
Actual processing time (s)	344	294	243
Energy consumption (kJ)	386	374	309
Peak power (W)	2490	3487	3374
Predictive processing time (min)	6	5	5
Predictive energy consumption (kJ)	402	380	340
Predictive peak power (W)	1154	1321	1293

3.4.2 エネルギー負荷計画の生成

本研究では、エネルギー負荷計画の生成にあたってCPU時間（実行時間）の短縮、および可能な範囲で確率的要素を回避するため、多スタート局所探索法を採用した。局所探索法では、すべての作業を含む順列リストを用いることで、作業間の優先順位関係を満たしつつ（優先順位関係は式(3.4)として記述することができる）、実現可能なエネルギー負荷計画を生成できる。いずれの処理モードにおいても、リストの最初の作業は、開始時刻から完了時刻までの所要電力量が電力制限を超えないように、最も早い開始時刻に割り当てられ（式(3.5)で電力制約に対応している場合）、リストから除く。そして、順にすべての作業が時間軸上で割り当てられるまで繰り返す。具体的な手順は次のようになる。

- Step.1 ランダムに生成された順列から、各作業の処理モード（1,2,3のいずれかひとつ）が任意に設定された実現可能な初期エネルギー負荷計画 s を生成する。
- Step.2 処理モードを k から $k + 1$ ($k = 1, 2$) に変更することで、エネルギー負荷計画の近傍 $\mathcal{N}_1(s)$ を生成する。近傍は最大で N となる。
- Step.3 個々のエネルギー負荷計画 $s' \in \mathcal{N}_1(s)$ の総完了時間 $f(s')$ を計算する。もし、最良の $s^* \in \mathcal{N}_1(s)$ が $f(s^*) \leq f(s') \forall s' \in \mathcal{N}_1(s)$ となれば、それが s となる。つまり、最良のエネルギー負荷計画を見つけたとき、 $s \leftarrow s^*$ のように、その最良のエネルギー負荷計画およびその処理モードに上書きされる。
- Step.4 現在のリスト内の作業を交換し、順列を生成する。近傍の大きさは $N(N - 1)/2$ となる。得られたリストから近傍のエネルギー負荷計画のセット $\mathcal{N}_2(s)$ を生成する。
- Step.5 個々のエネルギー負荷計画 $s' \in \mathcal{N}_2(s)$ の総完了時間 $f(s')$ を計算する。もし、最良の $s^* \in \mathcal{N}_2(s)$ が $f(s^*) \leq f(s') \forall s' \in \mathcal{N}_2(s)$ となれば、それが s となる。そして、Step.2 に戻る。そうでない場合は、 s を最終的なエネルギー負荷計画として出力する。

3.4.3 シミュレーション結果

上記のエネルギー負荷計画生成手順を用いて、以下の条件で数値シミュレーションを行った。

- ▷ CNC マシンの台数： $M = 3$
- ▷ 作業回数： $N = 100$ ，ワーク A は 30 個，ワーク B と C は 20 個，ワーク D と E はそれぞれ 15 個の製品数となる。
- ▷ 製造システムのピークデマンド（利用可能な電力）：すべての t に対して $C_t = 3000, 3100, 3200, 3300, 3400, 3500$ W の 6 つの異なる問題例を用意し，それぞれ例 1，例 2，例 3，例 4，例 5，例 6 となる。
- ▷ MSLS における初期プロファイルの数， $N_1 = 20$ 。

6 つの問題例のそれぞれに多スタート局所探索法を 10 回適用し，解を求めた。図 3.8 は，各問題例の平均値と最良値を示している。この条件下では，利用可能な電力が最も多い 3500 W に設定されたときに，平均完了時間における最良の値が得られた。また，ピークデマンドによる制約が比較的緩い場合に完了時間が減少する傾向があることもわかる。ピークデマンドと完了時間との間に強いトレードオフがあることを示している。従って，機械加工における最適化，すなわち最適化されたエネルギー負荷計画の生成が重要といえる。

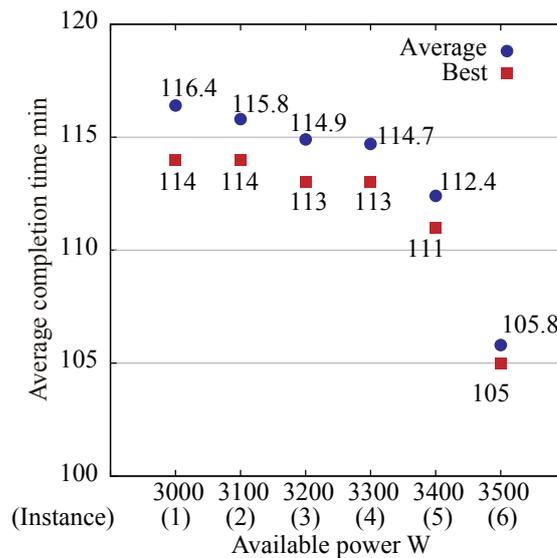


Fig. 3.8: Simulation results: operation completion time vs peak power [3].

Table 3.2: Properties of obtained energy-load profile [3].

Instance	1	2	3	4	5	6
Peak [W]	3000	3100	3200	3300	3400	3500
Percentage of the number of operations with:						
Processing mode 1 (%)	31.2	29.6	30.2	27.9	30.0	34.1
Processing mode 2 (%)	29.0	29.1	29.4	32.0	30.2	31.0
Processing mode 3 (%)	39.8	41.3	40.4	40.1	39.8	34.9
Electric Energy Consumption [kJ]	614.8	612.3	614.5	613.2	614.6	619.4
Specific Energy Consumption [kJ/unit]	5.99	5.95	5.96	5.98	6.01	6.16

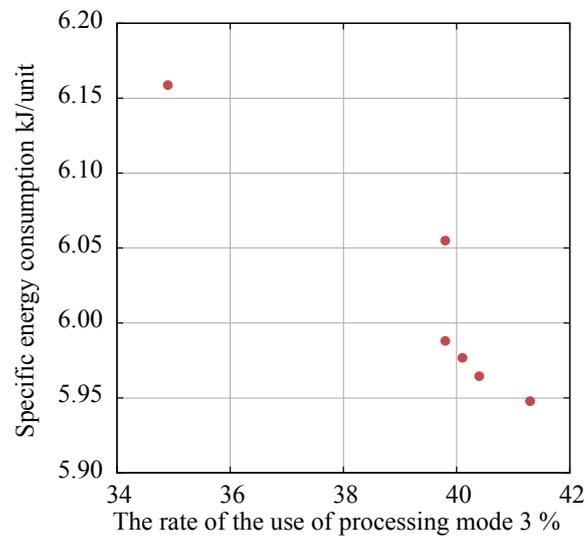


Fig. 3.9: Simulation results: higher machining speed (mode 3) vs specific energy consumption [3].

表 3.2 は、エネルギー負荷計画における重要な特性である選択された各処理モード、消費電力、および各問題例のエネルギー密度のパーセンテージをまとめたものである。本章におけるエネルギー密度とは、1 単位の製品を生産する際に消費された電力量を指す。各シミュレーションでの時間区間 $[0, 200]$ ($t = 200$) におけるエネルギー密度を計算し、10 個のエネルギー密度を各問題例ごとに平均化した。全体的には、処理モード 3 は、最も多く選択され、約 40 % の割合となった。ただし、各処理モードが選択される頻度に大きな違いはなく、消費電力量の点でも各例の間に明らかな差は存在しない。しかしながら、エネルギー密度は製造システムにおけるピークデマンドの制約が緩和されるにつれてわずかに増加する。この結果は、高い電力容量が必ずしも製造システムの生産性向上に寄与するわけではないことを意

味する。

次に、図3.9はエネルギー密度と処理モードの関係を表している。横軸は各問題例におけるモード3で処理された作業の平均数、縦軸は得られたエネルギー密度である。モード3の使用率が増加するにつれて、エネルギー密度は減少しているのがわかる。これは、異なる機械加工環境でのさらなる検証が必要であるが、より高速での加工がエネルギー密度の低減に役立つことを示している。以上より、エネルギー負荷計画が製造作業におけるエネルギー効率に関連する重要な情報を提供でき、そして、エネルギー負荷計画によって、エネルギーを考慮した製造システムの運用が可能であることを示している。

3.5 ケーススタディ2

3.4節では、5種類のワークを、3台の工作機械で加工する状況下で、完了時間の総和を最小化する問題としてエネルギー負荷計画を扱った。エネルギー負荷計画はRCPSPの枠組みを用いて定式化されるため、3.2節で述べた完了時間の総和以外にも目的関数を設定することが可能である。本節では、メイクスパンの最小化を目的関数とし、エネルギー負荷計画を生成する。

3.5.1 切削実験

本節では、図3.10に示すような半球状のワークピースに対し、粗加工を行う状況を考える。ワークの材質はS45Cで、2枚刃のボールエンドミルを使用して加工を行う。主軸回転数は 3500 min^{-1} 、送り速度は 250 mm/min 、切削深さは 1 mm である。ただし、加工には図3.10の経路1から経路4に示す4つの工具経路が用意されているものとする。各工具経路はCAMソフトにより粗加工のための経路として生成されたもので、経路1は螺旋、経路2はY軸方向の直線、経路3は円から矩形へのモーフィング、経路4は円を描くように工具経路が作成されている。なお、これらは後工程として仕上げ加工が存在することを前提としている粗加工であり、各加工経路による切削除去量は同じではない。それぞれの経路を用いて加工を行ったときの消費電力を、3.4節と同様にKyoritsu KEW6305パワーメータで、1秒ごとに測定した。各経路による実際の加工時間、総消費電力量およびピーク電力を、表3.3に示す。処理時間が短くなると総電力消費量が少なくなる傾向がある一方、ピーク電力は処理時間が短いほど大きくなる傾向があることがわかる。

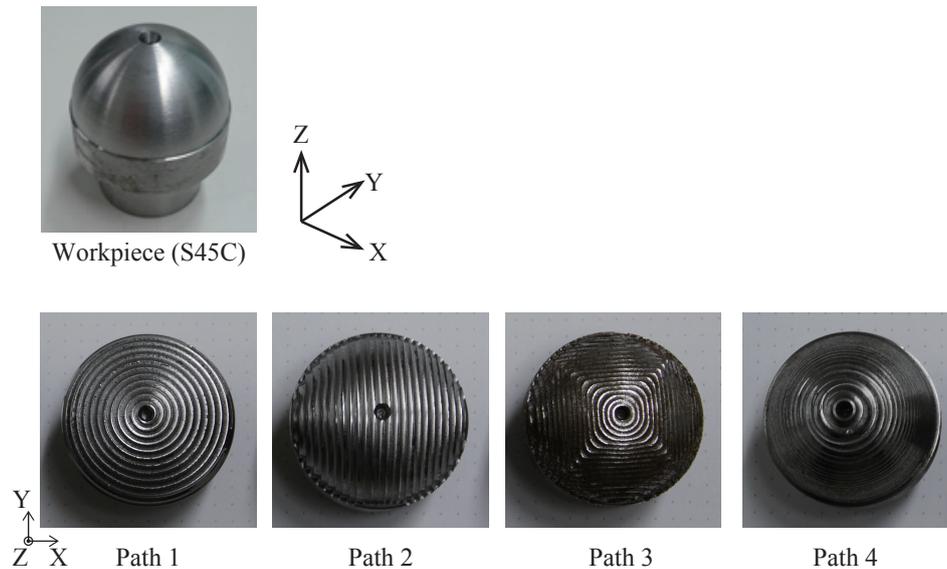


Fig. 3.10: Tool paths for rough processing [2].

Table 3.3: Results of measured processing time and consumed power according to different tool paths [2].

Processing modes	1	2	3	4
Tool path	Spiral	Lines	Morphing	Circles
Processing times [s]	235	390	470	800
Total electric energy [kW]	5.7	9.0	10.8	16.9
Peak power [W]	455	449	424	445

3.5.2 処理モードの作成

表 3.3 の結果に基づき、処理モードを生成する。ここでは、120 秒を単位時間（式 (3.1) の $h = 120$ 秒）とし、各タイムスロットの消費電力を平均化することにより、図 3.11 のような 4 つの異なる処理モードが生成された。処理モード 1 は経路 1（螺旋）に基づいており、ピーク電力は 433 W、総消費電力量は 854 J で 240 秒の処理時間を要することを示している。処理モード 2 と 3 の処理時間は 480 秒で、ピーク電力は処理モード 2 で 417 W、処理モード 3 で 413 W である。また、処理モード 2 の推定総消費電力量は 1635 J、処理モード 3 では 1644 W である。処理モード 4 はピーク電力 393 W、総消費電力量は 2641 J、処理時間は 840 秒となっている。

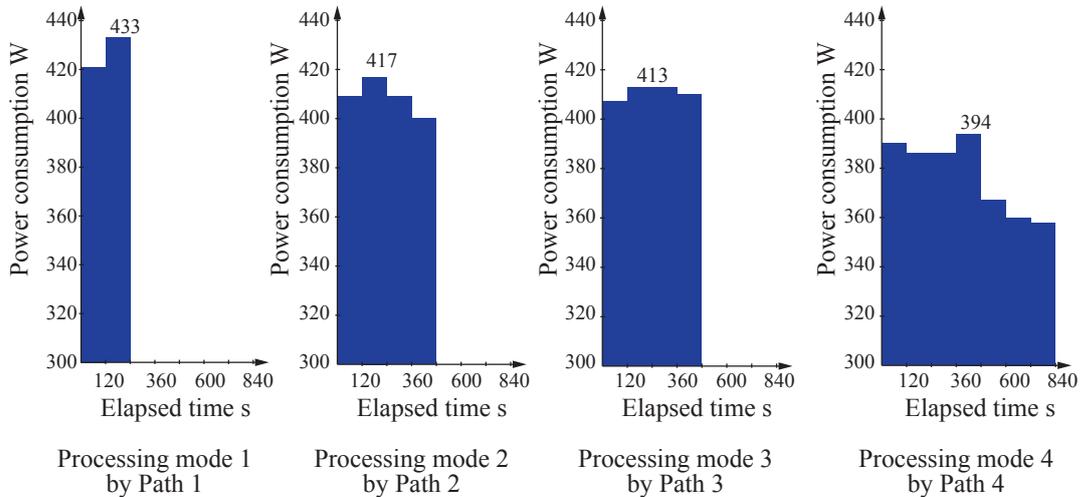


Fig. 3.11: Obtained processing mode from tool paths: The average power consumption per 120s [2].

3.5.3 エネルギー負荷計画の生成

複数の CNC 立形マシニングセンタが並行しているフレキシブル生産システムにおいて、ワークピースを粗加工する状況を考える。ここでは、ワークは1つとし、図 3.11 に示した処理モード 1 から 4 のいずれかを用いて加工することとする。ただし、本節では 3.2 節と異なり、目的関数をメイクスパンの最小化とする。定式化すると、次のようになる。

$$\begin{aligned} \min. \quad & \sum_{t=1}^T tx_{N+1,1,t} \\ \text{s.t.} \quad & (3.3), (3.4), (3.5) \end{aligned} \quad (3.6)$$

この問題に対し、多スタート局所探索法を用いて以下の条件で数値シミュレーションを行った。

- ▷ CNC マシンの台数： $M = 4$.
- ▷ 作業回数： $N = 20$.
- ▷ 製造システムのピークデマンド (利用可能な電力)：すべての t に対して $C_t = 1700\text{W}$.

図 3.12 に、シミュレーションで得られた実現可能なエネルギー負荷計画の例を示す。このエネルギー負荷計画によるメイクスパンは 1700 秒となった。各処理モードの使用量を見ると、20 個のうち 15 個で最も処理時間の短い処理モード 1 が加工に使用されている。この

ほか、3つのワークで処理モード3が用いられ、ピークデマンドの低減に寄与している。また、処理モード4は処理モード1に比べ処理時間および総消費電力がおよそ3倍になるにも関わらず、本実験下では2つのワークで使用されることとなった。以上の結果から、生産システム全体の消費電力を最適化するときには、処理モード単位で見れば非効率的と考えられる処理モードもピーク電力低減のために利用することが必要であることがわかる。

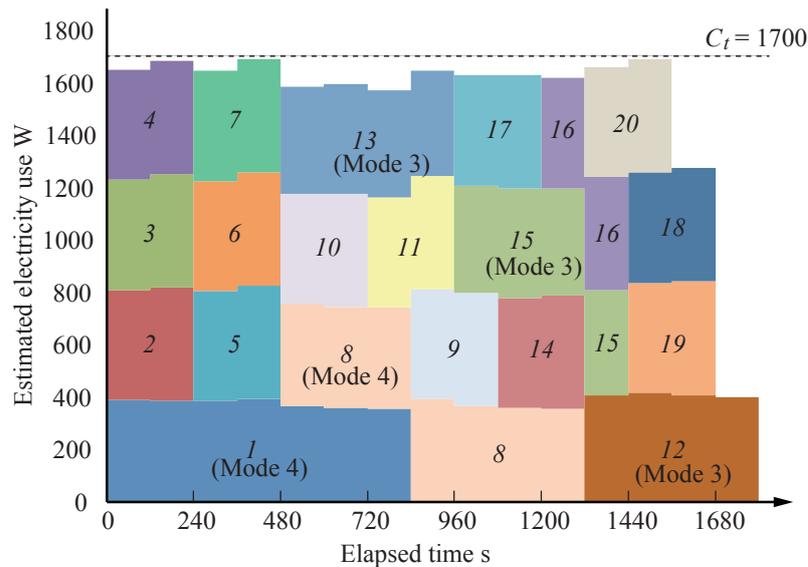


Fig. 3.12: Example of energy-load profile for manufacturing system with four CNC machine tools in parallel [2].

3.6 まとめ

本章では、エネルギー負荷を考慮し、各作業のための最適な処理モードを提供するエネルギー負荷計画を提案した。処理モードには、加工作業における予測消費電力や、それに関連する加工条件が含まれている。適切な処理モードを選択し、スケジューリングを行うことでエネルギー負荷計画が生成される。これを最適化問題として定式化したほか、多スタート局所探索法を用いて数値シミュレーションを行った。まず、3軸立形マシニングセンタで切削実験を行い、消費電力および消費電力量を計測することにより、所定の処理モードを用意した。次に、得られた各処理モードの電力プロファイルに基づき、数値シミュレーションを行った。シミュレーション結果は、利用可能なピークデマンドの制約が強くなるにつれて生産性が悪化（完了時間が長くなる）することを示した。一方で、ピークデマンドが低いほど

エネルギー密度が高くなる傾向があることもわかった。これらの結果はエネルギー負荷計画がグリーン製造に有意義な情報をもたらすことを示している。

ただし、このようなエネルギー負荷計画を生成するに当たり、各処理モードにおける消費電力や作業時間のデータが事前に必要である。FEMSのようなエネルギー管理システムでは多くの場合データベースが構築されており、新たな製品を作る場合でも従前のデータから大まかな消費電力を予測可能としている。しかしながら、これらは理論や精緻なモデルに基づいた予測ではなく、予測精度に課題がある。以降の章では筆者が提案する消費電力モデルについて述べる。

参考文献

- [1] 寒川哲夫, エネルギー制約に対応する機械スケジューリングに関する研究, 摂南大学
修士論文, (2012), pp.1–47.
- [2] H. Suwa, and T. Samukawa, A New Framework of Energy-Efficient Manufacturing
Systems Based on Energy Load Profiles, *Procedia CIRP*, Vol. 41, (2016), pp. 313–317.
- [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*, Vol.10, No. 6, (2016), pp. 985–992.
- [4] M. Mori, M. Fujishima, Y. Inamasu, and Y. Oda, A Study on Energy Efficiency
Improvement for Machine Tools, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 60,
(2011), pp. 145–148.

第4章 工作機械と計測装置

第3章で提案したエネルギー負荷計画により、生産システム全体での省エネが可能であることがわかった。しかしながら、エネルギー負荷計画を立案するにあたって、消費電力プロフィールをあらかじめ用意しなければならない。そこで本研究では生産システムの中核をなす工作機械において、最も汎用的な加工を行うことができるマシニングセンタに着目し、消費電力モデルを構築する。本章では本研究で対象とした3軸立形マシニングセンタについて述べる。そして、分析に用いた消費電力データを計測する装置について述べる。

4.1 マシニングセンタの構成と加工の仕組み

本研究で用いるマシニングセンタはコンピュータ数値制御が可能な工作機械である。マシニングセンタは主に以下のような装置で構成され、NC装置による制御に基づいて様々な装置が作動し、加工が行われる。

- ▷ 主軸
- ▷ テーブル
- ▷ サーボ機構
- ▷ クーラント
- ▷ 油圧／空圧ユニット
- ▷ オートタレット
- ▷ 冷却装置
- ▷ NC装置

主軸は切削工具を取り付ける軸であり，主軸モータによる回転運動を工具に与えることで加工を行うことができる．テーブルは治具などを装着，工作物（被削材）を固定する台である．マシニングセンタにおいては，主軸あるいはテーブルが動くことによって工具と工作物を接触させ，加工が行われる．サーボ機構は主軸に取り付けられた工具を動かす主軸モータと，テーブルなどを動かすための送り駆動系のモータで構成される．モータの回転数や移動量などは NC 装置からの指令に従う．クーラントは切削油を排出する機構を指す．切削油はきりくずの排出と工具や被削材の温度を低下させることが目的で使用される．油圧／空圧ユニットは送り軸などが停止中に，その停止位置に固定するために使用される．オートタレットは主軸に取り付けられた工具を自動的に交換する装置であり，マシニングセンタの定義上必要な装置である．冷却装置は切削油の冷却だけでなく，マシニングセンタそのものの冷却を行う装置である．加工精度の低下を防ぐほか，機械の安定的な稼働を目的として温度管理が行われている．NC 装置は工作機械への命令コードである NC プログラムを読み込み，加工指令の演算や制御を行う．

これらの装置によって構成されるマシニングセンタでは，図 4.1 に示す流れによって，加工情報が伝達される．まず，コンピュータ上で加工情報を記した NC プログラムを作成し，工作機械上の NC 装置に読み込ませる．NC 装置は NC プログラムに基づいて加工情報を処理し，工具の動かし方などの情報を作成する．そして，その情報を電気信号によってサーボ機構に送ることで，モータを制御する．これによって主軸やテーブルが稼働し，工作物が加工される．なお，実際にはセンサによってテーブル位置や主軸位置などが計測されており，そのような情報をサーボ機構や NC 装置にフィードバックすることで，より高度な制御が行われている．

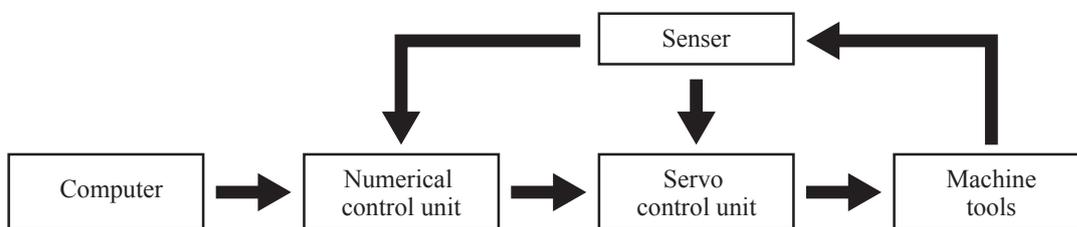


Fig. 4.1: Flow chart of processing information in machining center.

4.2 3軸立形マシニングセンタにおける加工プロセス

マシニングセンタの消費電力は機械の仕様だけでなく、加工プロセスによっても電力消費の傾向が異なるため、正確に対象プロセスを特定する必要がある。本研究で用いる3軸立形マシニングセンタは、

- ▷ フライス加工：回転する工具の外周の刃を使い、加工物を切削する、
- ▷ ドリル加工：工具を回転させながら、主軸方向に直進運動させて加工を行う、

といった加工を行うことができる。本研究では、切削時消費電力および変動エネルギーに焦点を当てるため、ドリル加工に比べ時間あたりの切削除去量が多く、長時間の加工が想定されるフライス加工を研究対象とした。フライス加工にも図4.2のように複数種類の工具や加工プロセスが存在するが、ポケット加工、側面加工および溝入れ加工など、汎用性に優れたエンドミルによる加工に着目する。

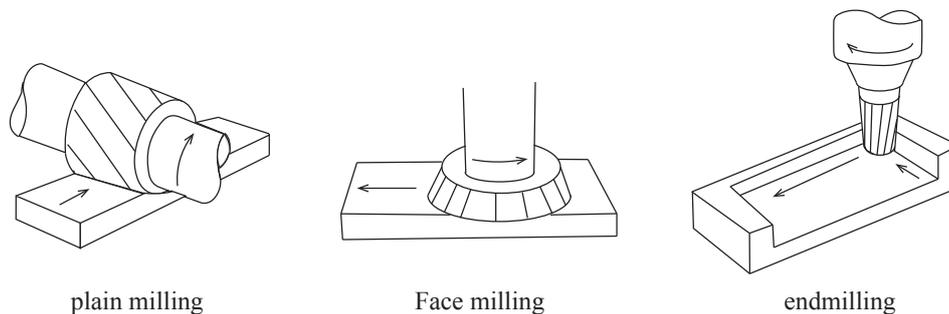


Fig. 4.2: Typical milling [1].

4.3 エンドミル加工

マシニングセンタによるエンドミル加工では、一般的に次のような用語が用いられる [1]. 他の加工（ターニングセンタによる加工）と同じ用語であっても、加工法の違いから計算方法・定義が異なるものがあるため、その導出方法も含めて以下に示す。

- ▷ 切削速度：エンドミル加工における切削速度は工具の周速を表している。

v_c : 切削速度 (m/min)

D : 刃先径 (mm)

n : カッタ回転数 (min^{-1})

π : 円周率

$$v_c(\text{m/min}) = \frac{\pi \times D \times n}{1000}$$

- ▷ 送り速度：ミリング加工においては、一般的に主軸は固定されているため、テーブルの移動速度がそのまま送り速度となる。

v_f : テーブル送り速度 (mm/min)

f_z : 一刃あたりの送り量 (mm/tooth)

z : カッタの刃数

n : カッタ回転数 (min^{-1})

$$v_f(\text{mm/min}) = f_z \times z \times n$$

- ▷ 切削動力：被削材を削るために工具が必要とする力。

P_c : 正味切削動力 (kW)

k_c : 比切削抵抗 (N/mm^2)

a_p : 切り込み (mm)

a_e : 切削幅 (mm)

v_f : テーブル送り速度 (mm/min)

η : 機械効率係数

v_m : 材料除去率 (mm^3/min)

F : 切削抵抗 (N)

$$\begin{aligned} P_c &= \frac{k_c \times a_p \times a_e \times v_f}{60 \times 1000 \times 1000 \times \eta} \\ &= \frac{v_m \times k_c}{60 \times 1000 \times 1000 \times \eta} \\ &= \frac{F \times v_f}{60 \times 1000 \times 1000 \times \eta} \end{aligned}$$

- ▷ 材料除去率 (Material removal rate; MRR) : 時間あたりの切削除去量。

v_m : 材料除去率 (mm^3/min)

a_p : 切り込み (mm)

a_e : 切削幅 (mm)

v_f : テーブル送り速度 (mm/min)

$$v_m(\text{mm}^3/\text{min}) = a_p \times a_e \times v_f$$

- ▷ 切削抵抗 : 被削材から見た、削られることに対する抵抗力。

F : 切削抵抗 (N)

a_p : 切り込み (mm)

a_e : 切削幅 (mm)

k_c : 比切削抵抗 (N/mm^2)

$$F(\text{N}) = a_p \times a_e \times k_c$$

4.4 工具および被削材

4.3 節中の関係式で表されるように，切削動力や切削抵抗には，工具と被削材間の比切削抵抗の値が重要となる．図 4.3 は各工具材質の粘さと硬さの関係を表している．一般的に，硬い被削材を切削するにはそれ以上の「硬い」工具が必要とされるが，脆性を考慮し，ある程度の「粘り強さ」も求められる．それらを考慮し，被削材に合わせた工具を選択することになるが，この組み合わせにより比切削抵抗，ひいては切削動力や切削抵抗の値が変化することになる．本研究では各被削材および工具がもつ特性が及ぼす消費電力への影響を考慮し，TiN コートハイス工具と，ステンレス鋼，アルミニウム合金，炭素鋼，工具鋼などといったさまざまな被削材を用いて実験を行った．以下に各材質について簡単に説明する．なお，工具を前提とした説明もあるが，その材質特性そのものは被削材であっても基本的に同じである．

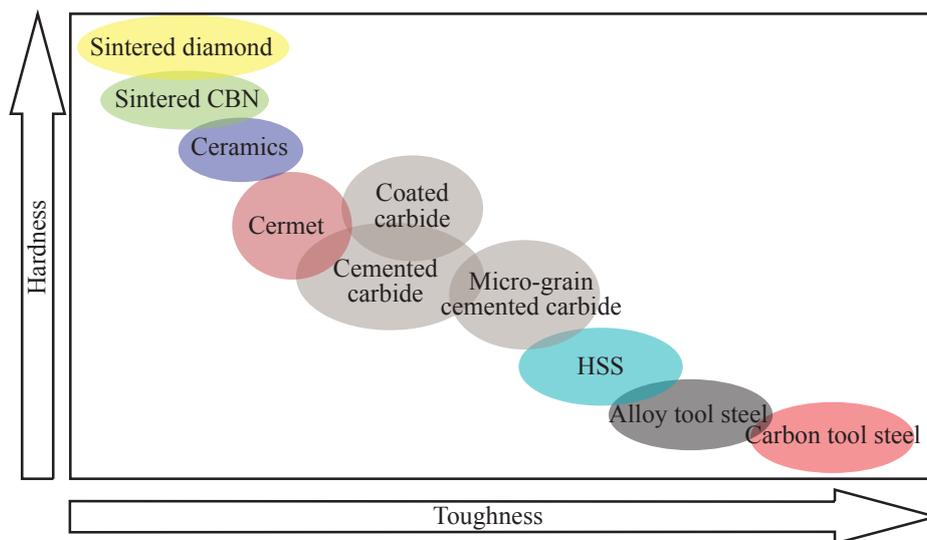


Fig. 4.3: Relationship between viscosity and hardness [2].

▷ 炭素鋼

- Fe(鉄) に C (炭素) の合金で，炭素以外の含有元素の量が合金鋼に分類されない量以下である．
- 炭素含有量 (重量比) 0.02~2.14 %.
- 機械構造用によく用いられる．

- 本研究では S45C および S55C を用いた。

▷ 炭素工具鋼

- 鉄鋼材料として使用される機械構造用炭素鋼に炭素を添加し、焼き入れ、焼き戻しを行ったもの。
- 炭素含有量（重量比）0.6～1.5 %。
- 200 °Cを超えると急激に硬さが低下する。
- 本研究では SK3 を用いた。

▷ ねずみ鋳鉄

- C を 2～6 %含む Fe との合金。
- Si(ケイ素) を含む。
- 延性はほとんどない。
- 機械部品として使用される。
- 本研究では FC250 および FC300 を用いた。

▷ 一般構造用圧延鋼材

- 鉄鋼材料のひとつ。
- SS に続く数字は引張強さの下限を表す。
- 350 °Cまで硬度を保つ。
- 構造用に用いられるだけでなく、機械設備用途にも使用される。
- 本研究では SS400 を用いた。

▷ アルミニウム合金

- アルミニウムを主成分とする合金。
- Zn(亜鉛) や Mg (マグネシウム) の合金である 5000 番台は車両や建築用途など幅広く使用される。

- Zn, Mg, Cu (銅) との合金である 7000 番台は, 軽さと強度から航空部品に用いられる.
- 本研究では A5052 および A7075 を用いた.

▷ ステンレス鋼

- 炭素を 1.2 %以下, Cr (クロム) を 10.5 %以上含む鋼.
- 耐食性がある.
- 家庭用品, 建築用, 自動車部品など様々な用途に用いられる.
- 本研究では SUS304 および SUS316 を用いた.

▷ クロムモリブデン鋼

- クロム鋼に Mo (モリブデン) を入れた鋼.
- 強度を要する一般機械部品に用いられる.
- 本研究では SCM435 および SCM440 を用いた.

▷ 高速度工具鋼 (ハイス)

- 常温時の硬さは炭素工具鋼とほぼ同じ
- 約 600 °Cまで硬さが低下しない
- 低速加工に適する
- 「硬さ」よりも「粘さ」が必要とされるドリルやタップに有効
- モリブデン系とタングステン系があり, 工具はタングステン系が多い
- 本研究で用いた工具で使用されている

▷ コーティング工具

- 母材の表面を薄膜で覆った切削工具
- 单相, 多層, 複合多層コーティングが存在する
- 化学反応によって被膜を形成する CVD 法, 金属のイオンを表面にぶつけて被膜を形成する PVD 法がある
- 本研究では窒化チタン (TiN) でコーティングされた工具を用いた

4.5 消費電力計測プラットフォーム

本研究では、消費電力モデル構築のため、マシニングセンタにおける消費電力計測実験を行った。一般に入手可能な計測機でも消費電力の計測は可能であったが、本研究ではより詳細な消費電力の分析を行うため、切削動力と消費電力を同時計測する新たな計測プラットフォームを構築した。切削動力と消費電力を同時に計測することで、切削動力計に反応がある時間区間のみを取り出すことが可能となり、より精緻に切削時消費電力の分析が可能となる。

計測対象となる工作機械は三相 3 線式 200 V の交流電圧が使用されており、図 4.4 に示すように消費電力の各計測箇所について電流を 2 カ所、電圧を 3 カ所測定する必要がある。そこで、図 4.5 に示すような National Instruments 製 4ch アナログ電流入力モジュール (NI 9227) および 2 つの 3ch アナログ電圧入力モジュール (NI 9225) を装着した計測プラットフォーム (NI cDAQ-9178) を構築した [3,4]。これにより、図 4.4 のように異なる 2 つの測定箇所での消費電力をリアルタイムに同時計測することが可能である。また、Kistler 製切削動力計 (9257A) による切削動力の測定のため、アナログ電圧入力モジュール (NI9201) を計測プ

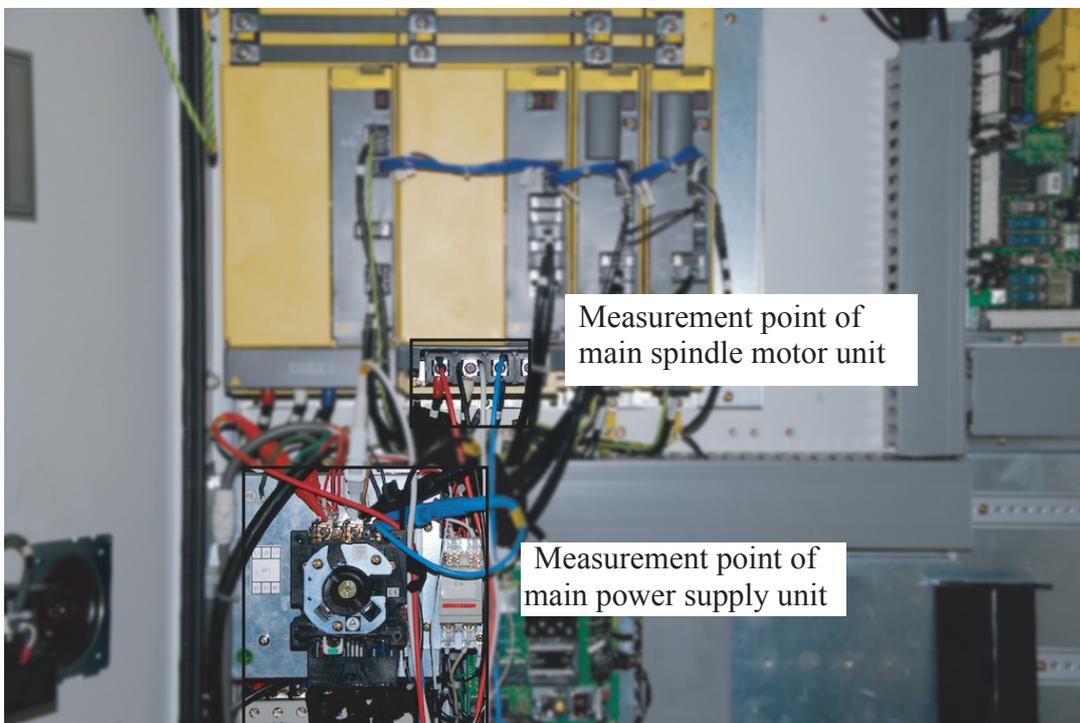


Fig. 4.4: Switchboard [4].

プラットフォームに装着しており、電力測定との同期が可能である。本研究で開発した計測システムの全体像と工作機械への接続を、模式的に図 4.6 に示す。工作機械全体および主軸動作の各々の消費電力を測定するために、主電源部（図 4.6 の a）と主軸アンプ部（図 4.6 の b）の 2 箇所を 3P3W 結線する。その際、工作機械側への接続として、電流はクランプ式センサーを、電圧はクリップと Y 型端子を用いた。計測モジュール側への接続は、図 4.5 に示すとおりである。計測プラットフォームの A/D 変換を通じて得られるデジタルデータは USB 接続を介して PC へリアルタイムに取り込まれる。

以上の計測システムを運用するためのソフトウェアを、汎用計測制御言語の LabVIEW を用いて開発した。図 4.7 にブロックダイアグラム、図 4.8 に開発ソフトのメイン画面を示す。消費電力の計測では、プラットフォームを通して電圧および電流をサンプリングし、有効電力を算出している。切削動力の計測にあたっては、サンプリングした電圧をキャリブレーションし、X、Y、Z 軸のそれぞれにかかる切削抵抗を導出している。また、消費電力との因果関係を調査する意図から、3 軸にかかる力を合成した数値も算出している。サンプルレートは 1 kHz としており、1 秒ごとの平均値をデータシートに書き出すようになっている。また、アプリケーション作動中は、図 4.8 のように各データをグラフや数値で表示し、作業中もリアルタイムで確認することが可能となっている。

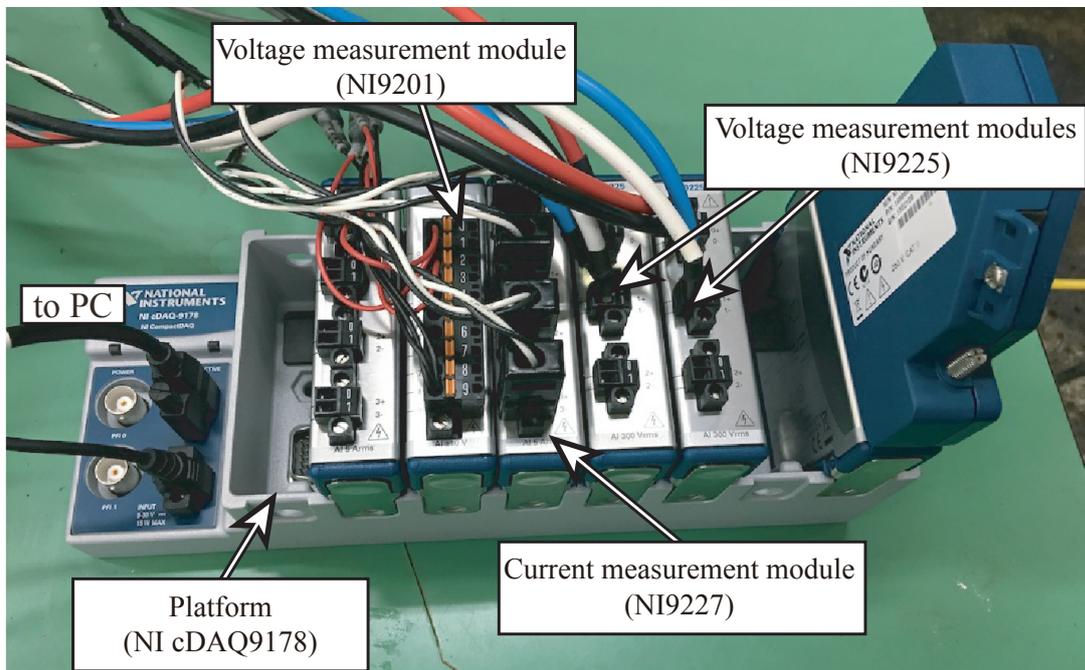


Fig. 4.5: Developed measurement system [5].

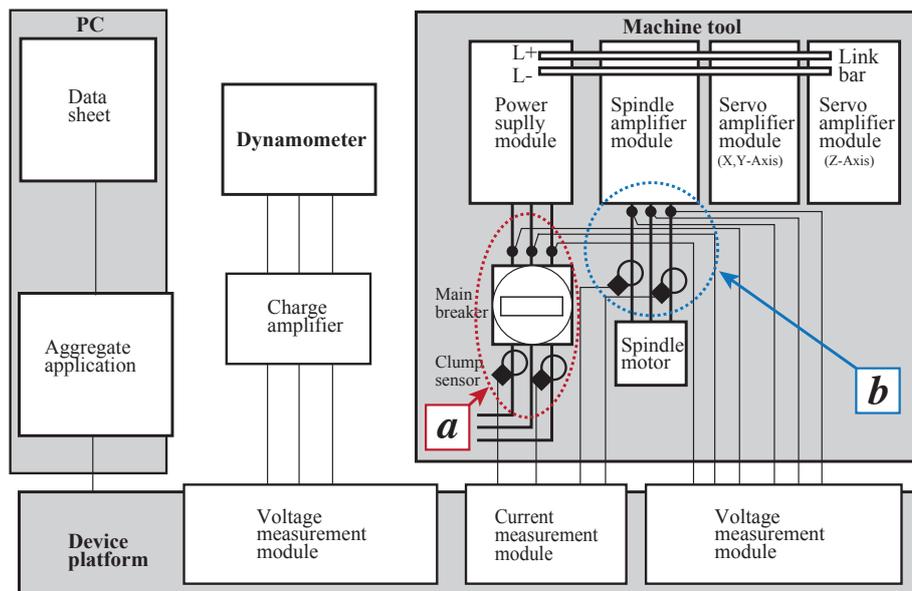


Fig. 4.6: Connection diagram [4].

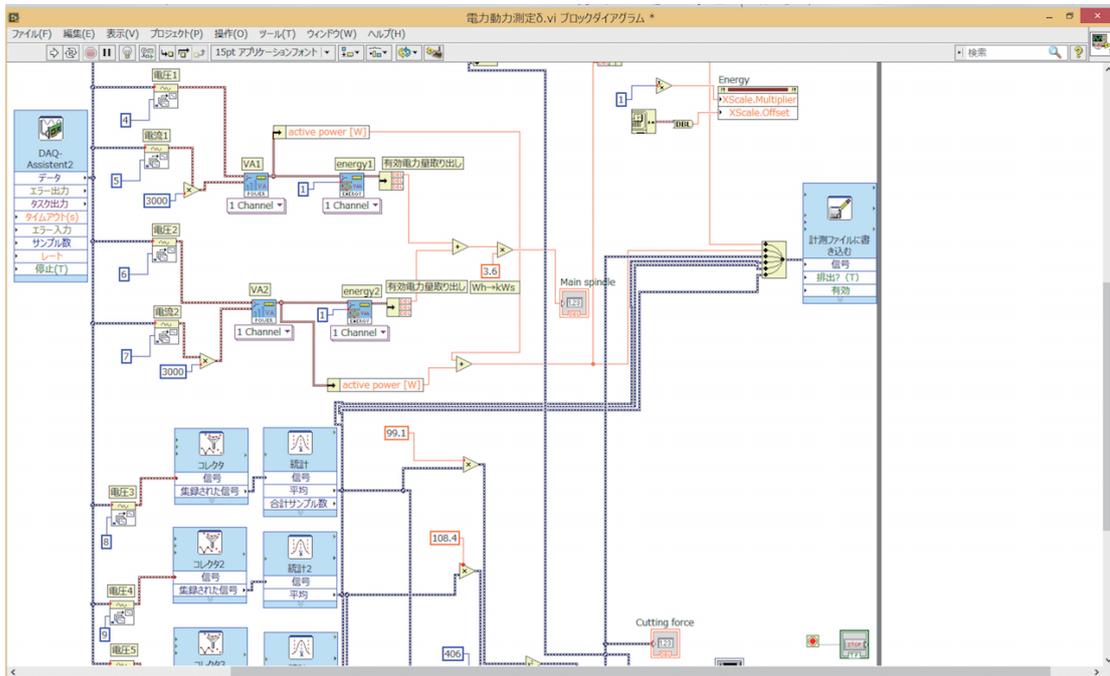


Fig. 4.7: Diagram of program in LabVIEW [3].

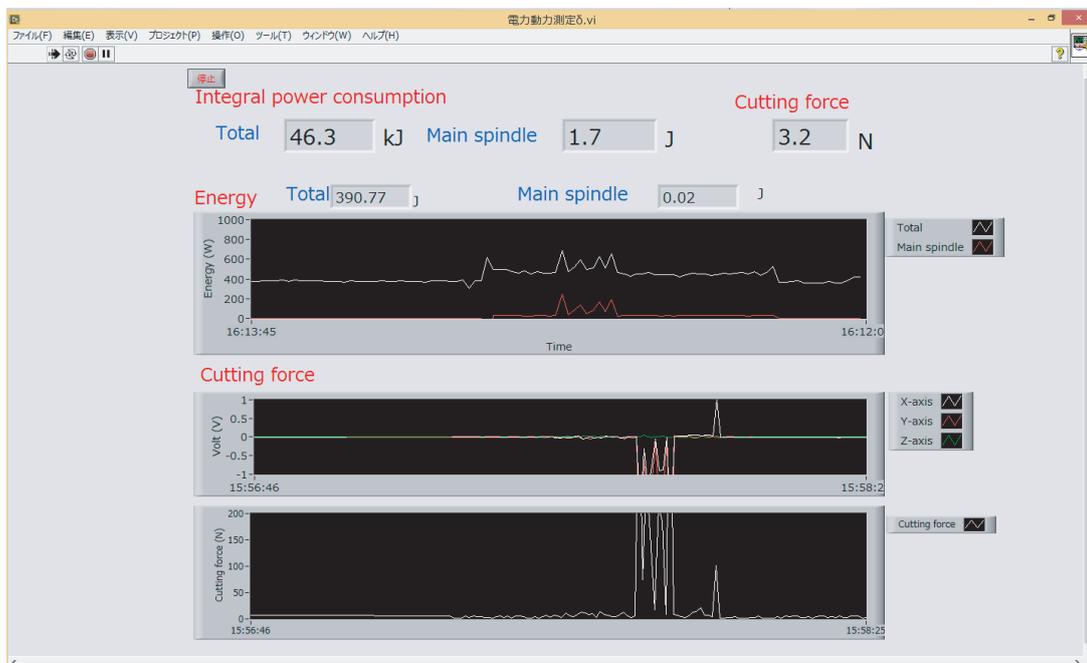


Fig. 4.8: Real-time monitoring by developed measurement system [3].

参考文献

- [1] S. Kalpakjian, and S. R. Schmid, *Manufacturing Engineering and Technology*, 6th edition, Pearson Education Canada, (2010), pp. 659–718.
- [2] 澤 武一, 絵とき 続・「旋盤加工」基礎のきそ-スキルアップ編-, 日刊工業新聞社, (2011), pp. 45–112.
- [3] 寒川哲夫, 諏訪晴彦, エコマシニングのための電力・切削力計測システムの開発と消費電力予測, 自動制御連合講演会 (CD-ROM), Vol. 58, pp. 1E2–3.
- [4] T. Samukawa, and H. Suwa, Development of Heterogeneous Measurement System for Predicting Power Consumption in Eco-Machining, *Proceedings of 2016 International Symposium on Flexible Automation*, (2016), pp. 413–419.
- [5] 寒川哲夫, 諏訪晴彦, 切削加工における消費エネルギー密度に基づく切削時消費電力の予測に関する基礎的研究, 精密工学会誌, Vol. 83, No. 4, (2017), pp. 367–374.

第 5 章 工作機械における切削時消費電力モデルの構築

第 3 章で提案したエネルギー負荷計画により，生産システム全体での省エネが可能であることがわかった．しかしながら，エネルギー負荷計画を立案するにあたって，生産システム内で消費される電力は既知でなければならない．そこで，筆者はエネルギー密度に基づく工作機械の消費電力モデルを構築した [1]．本章では，この提案モデルについて述べる．まず，複数のマシニングセンタで同一の加工を行い，消費電力を計測することで，機械ごとの基礎的な消費電力特性を明らかにする．そして，切削に関わる力や消費電力について，2次元モデルに基づいた一般論を述べたのち，先行研究によるモデルや評価手法について述べる．その後，実際の消費電力計測結果を分析し，提案モデルについて述べる．

5.1 マシニングセンタの消費エネルギー

マシニングセンタにおける消費電力は，2.3 節でも触れたように，冷却装置や油圧ユニットといった機械維持のための装置によって消費される定常エネルギーと，実際に加工を行うために消費される変動エネルギーに大別できる．一般的には，マシニングセンタにおいて消費するエネルギーのほとんどを定常エネルギーが占めているといわれている [2,3] が，加工プロセスによっても電力の消費量は変わるほか，製品仕様によっても消費電力は変化する．ここでは，まず実際の計測結果をもとに 2 種のマシニングセンタの電力消費特性の違いを述べる．

5.1.1 3 軸立形マシニングセンタにおける電力消費の基礎的分析

ここでは，図 5.1 に示す 3 軸立形マシニングセンタ ecoMill および ROBODRILL の 2 種について，図 5.2 に示す実験条件で炭素鋼 S45C に溝入れ加工を行い，電源投入，加工中，電源停止といった一連のプロセスで消費される電力を継続的に計測し，基礎的特性を明らか

にする。送り速度は 80 mm/min, 回転数は 1000 min^{-1} であり, 工具メーカーによる推奨値である。1 秒ごとに計測された ecoMill の消費電力を図 5.3 に, ROBODRILL の消費電力を図 5.4 に示す。なお, 実線が加工を実際に行ったときの計測データであり, 破線が空切削(加工なし)時の計測データを表している。



Fig. 5.1: Machining center used for power consumption analysis.

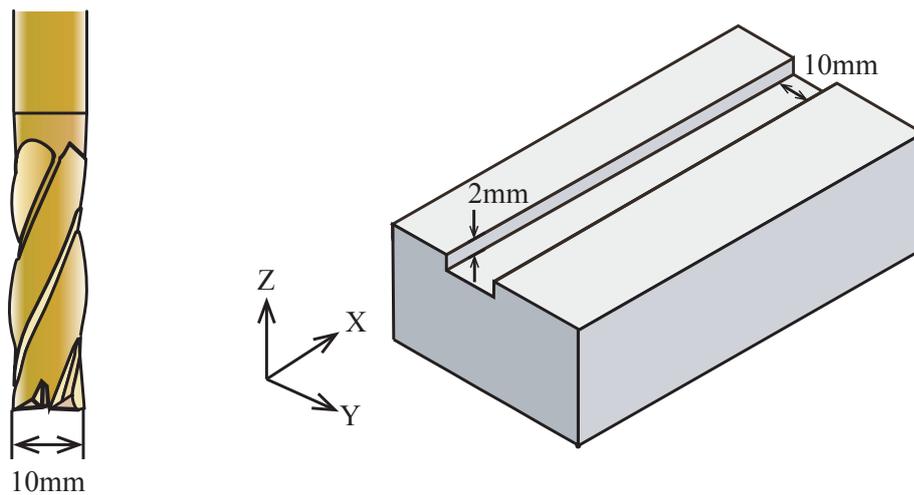


Fig. 5.2: Tool and Processed Shape.

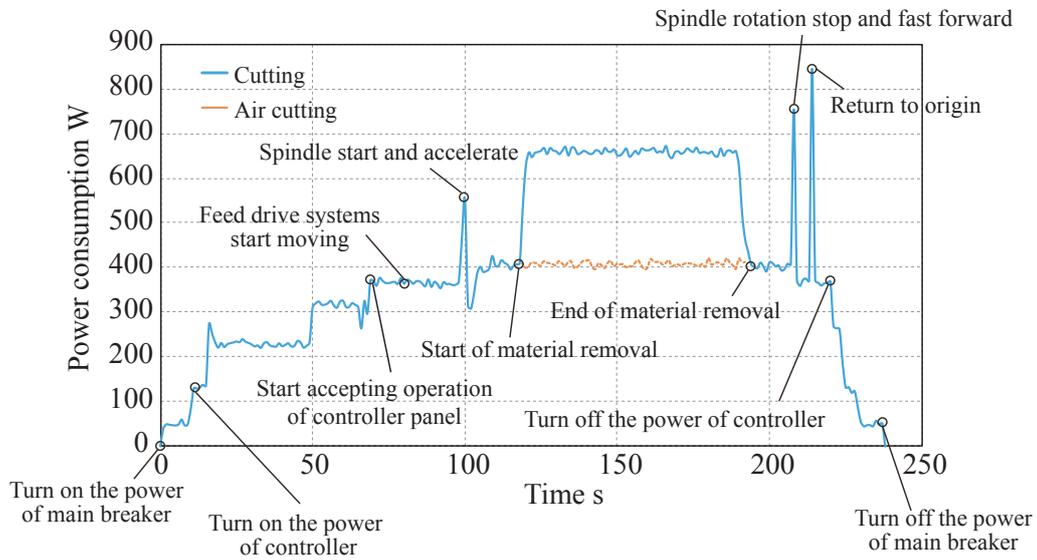


Fig. 5.3: Typical power profile of ecoMill.

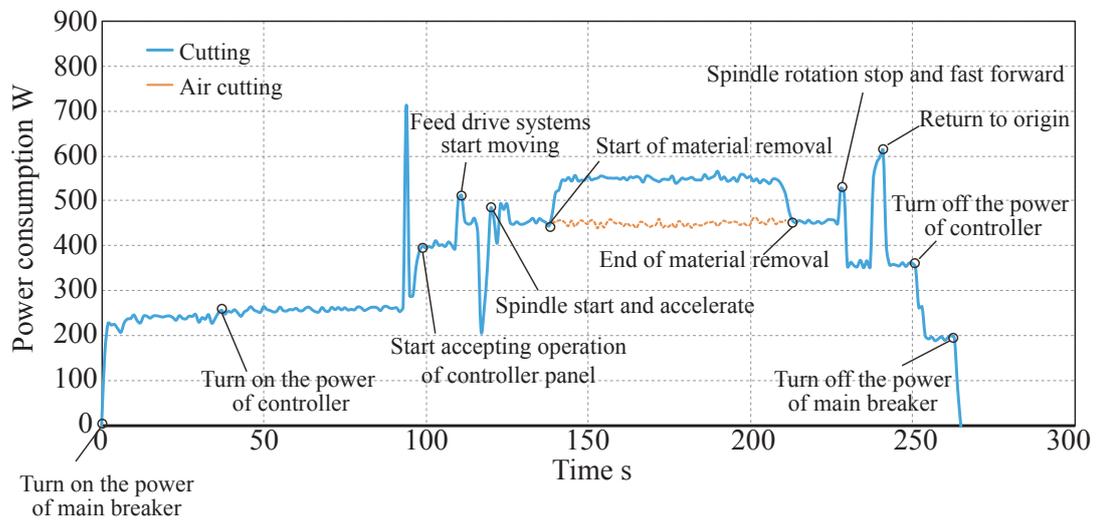


Fig. 5.4: Typical power profile of Robodrill α-T14e.

まず、図 5.3 の ecoMill における消費電力プロファイルを例に、どのような処理が行われているかを以下に示す。工作機械の主電源投入時点を時刻 $t = 0$ としている。この時点で工作機械は通電し、消費電力は 50 W 前後まで上昇した。 $t = 10$ で工作機械前面の起動スイッチを押したところ、工作機械のコントローラーや冷却ユニット、送り駆動系などといった周辺装置やユニットが順次起動し、 $t = 69$ において、コントローラーパネルが操作可能となる。このとき、370 W 前後の消費電力となっている。 $t = 85$ で、コントローラーパネルの操作により NC プログラムが選択・実行され、テーブル送り軸の移動が開始している。このとき、送り軸が駆動しているにもかかわらず、直前と消費電力に変化がない理由として、送り軸が作動していない間も、その位置を保持するために送り駆動系が電力を消費していたことが大きな要因の一つと考えられる [4]。 $t = 100$ で主軸スピンドルが回転を開始すると、一時的に 552 W となったあと 400 W 前後の消費電力で安定した。主軸スピンドル稼働前後の 30 W ほどの差が、空切削時の主軸スピンドルモータの消費電力といえる。 $t = 119$ から実際に被削材が削られはじめ、切削中の平均消費電力は 651 W となった。 $t = 192$ で加工が終了し、送り駆動系のみが動く状態となり、消費電力は 400 W 前後になった。なお、空切削時の消費電力を表す破線をみると、切削抵抗を受けないために、実線と比べて変動がほとんどなく、平均消費電力は 407 W と主軸スピンドルが回転し始めたときとほぼ同じ値となった。 $t = 208$ にて、主軸は停止とほぼ同時にテーブルの早送りが始まり、753 W となった。続いて、 $t = 214$ で機械原点復帰が行われ、早送りや急制動のために 844 W と一時的な消費電力の上昇が見られた。その後は NC プログラムによる動作は終了し、400 W 前後の電力消費となった。 $t = 221$ にコントローラーパネルのスイッチをオフにしたところ、工作機械内部で順次各装置のシャットダウンが行われ、消費電力も段階的に小さくなった。最後に $t = 238$ にて主電源が落とされ、消費電力は 0 W となった。

このような一連のプロセスを ROBODRILL についても行い、計測したものが図 5.4 である。オペレーターが行う各動作については、手作業で行っていることから各プロファイルによって異なる時間間隔となっているが、各状況で消費している電力の大きさに違いがあるのわかる。たとえば、起動時の周辺装置などの立ち上がり方が異なるほか、操作が可能となったタイミングでは ROBODRILL に比べ ecoMill の方が 30 W ほど消費電力は少ない。ecoMill は切削を行わない状態での省エネ施策が導入されていると考えられる一方で、切削中においては切削開始前に比べて ecoMill の消費電力は 250 W の増加、ROBODRILL の消

費電力は 100 W の増加となっており，ecoMill での変動が比較的大きいことがわかる。これは，各マシニングセンタで使用されているスピンドルモータの出力が異なるなど，周辺機器や構造の違いによることが原因と考えられる。このように，同じ 3 軸立形マシニングセンタで同じ加工を行ったとしても，電力の消費特性は機械によって異なることがわかる。

5.1.2 2次元切削モデル

切削加工を行っていないときの消費電力である定常エネルギーは，どのような加工を行おうとも機械が変わらなければ，ほぼ同じ量の電力を消費する。消費電力モデルを構築するうえで，実際の加工に直接費やされるエネルギーである変動エネルギーを精緻に予測することが肝要である。ここでは，変動エネルギーに影響する力について 2 次元切削モデルをベースに述べる。

工作機械による切削加工は図 5.5 に示すような空転を伴う断続切削の連続である。切削時に生じるさまざまな力を物理的にモデル化することは非常に困難となるため，一般的には 2 次元モデルを用いて切削に関わる力や情報を簡易的に見積もる手法がとられている。

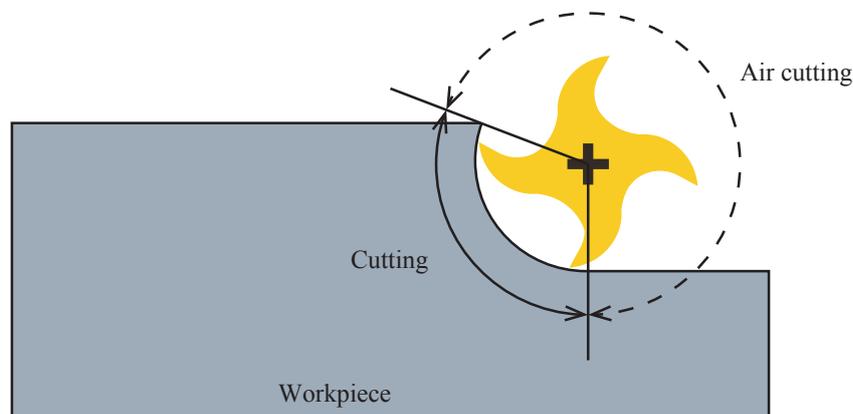


Fig. 5.5: Simple representation of endmilling.

たとえば図 5.6 に示すように，せん断変形を生じさせるのに必要な力 F_s と，面には作用するがせん断変形を生じさせない力 F_n の合力 R が切削力となる。この力は平面であるすく

い面によって支えられている力 R' と平衡状態にある。すくい面が平面とすると、ここには垂直力 N と摩擦力 F_f が働き、両者の間がクーロン摩擦の関係にあるとすれば、次の式が成立する。

$$\begin{aligned}
 F_f &= \mu N, \\
 \mu &= \tan \beta, \\
 N &= R' \cos \beta, \\
 F_f &= R' \sin \beta
 \end{aligned}$$

ただし、 μ は摩擦係数、 β は摩擦角である。一般に切削力の方向は不明であるが、切削方向の力（切削主分力 F_c ）と、垂直方向の力（切削背分力 F_t ）の成分に分解すると、他の力は次のようになる。なお、 F_c および F_t は動力計で計測ができる。

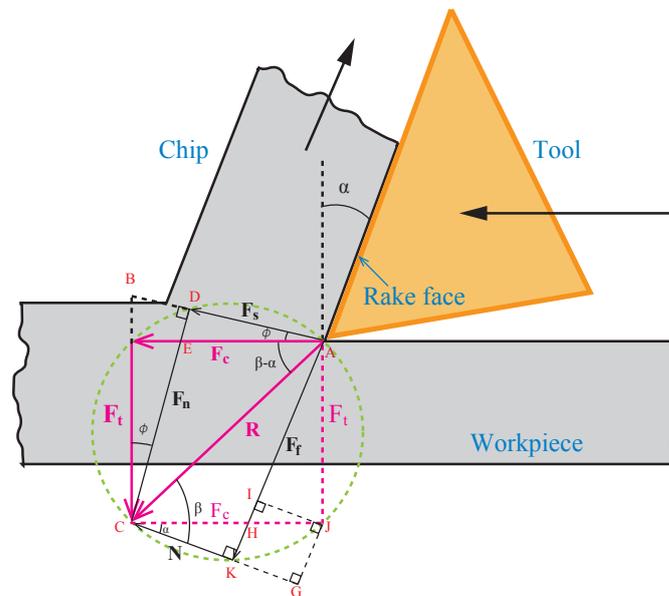


Fig. 5.6: Components of cutting process by 2D model.

$$F_s = \overline{AB} - \overline{DB} = F_c \cos \phi - F_t \sin \phi$$

$$F_n = \overline{DE} + \overline{EC} = F_c \sin \phi + F_t \cos \phi$$

$$F = R \sin \beta = \overline{KI} + \overline{IA} = F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha$$

$$(\overline{KI} = \overline{JG} = F_c \sin \alpha)$$

$$N = \overline{CG} - \overline{KG} = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha$$

$$(\overline{KG} = \overline{IJ} = F_t \sin \alpha)$$

$$F_c = \frac{F_t}{\tan(\beta - \alpha)}$$

せん断面でせん断変形を生じさせる力は、図 5.7 のように材料の変形強さに対応するせん断変形応力 τ_s に影響される。なお、

$$\text{せん断変形応力} = \frac{\text{力}}{\text{断面積}}$$

であることから、切削幅を b 、切削厚さ t_1 とすると、

$$t_0 = \frac{t_1}{\sin \phi} \text{ より}$$

$$\text{断面積} = t_0 \times b$$

となる。ここから、 τ_s 、 σ_s を測定可能な切削力 F_c 、 F_t で示すと次のようになる。

$$\begin{aligned} \tau_s &= \frac{F_s}{\frac{bt_1}{\sin \phi}} \\ &= (F_c \cos \phi - F_t \sin \phi) \frac{\sin \phi}{bt_1} \end{aligned}$$

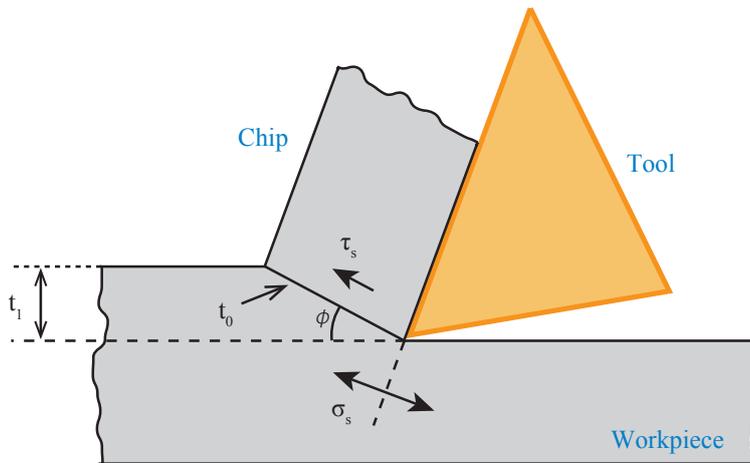


Fig. 5.7: Shear deformation stress by 2D model.

なお，垂直応力は

$$\begin{aligned}\sigma_s &= \frac{F_n}{\frac{bt_1}{\sin \phi}} \\ &= (F_c \sin \phi + F_t \cos \phi) \frac{\sin \phi}{bt_1}\end{aligned}$$

となる。

このように工作機械の切削時に見られるさまざまな力は2次元モデルによって説明することができる。ただし，実際の切削加工では3次元で断続的な切削が行われるため，上記のようなモデルを複雑に組み合わせる必要がある。また，切削時に発生する熱によって工具や被削材の特性も変化する。たとえば，比切削抵抗の値は工具メーカーが公表しているが，実際の切削加工時には摩擦により時間経過に伴って工具および被削材の温度が上昇し，硬さが変化するため，比切削抵抗は刻一刻と変化することになる。つまり，切削動力や切削抵抗を精緻に予測することは困難といえ，これらの関係式に基づいて算出される値は目安として使われるに留まるのが現状である。

5.1.3 先行研究による消費エネルギーモデル

5.1.2項で示したように，切削時に発生するさまざまな力は2次元モデルによって簡易的に説明することができる。しかしながら，実際の切削加工では3次元的に断続的な切削が行

われるほか、状況によって変化する工具や被削材の特性も考慮しなければいけないため、2次元モデルでは消費エネルギーを精緻に表現することはできない。

そのため、より現実的な消費エネルギーモデルの研究がこれまでに行われている。たとえば、Munoz と Sheng [11] は、切削力と材料除去速度ベクトルを用いて式 (5.1) のようにミリング加工におけるエネルギーを表現している。

$$\text{Energy} = \frac{\cos(\beta_n - \gamma_n) \cos \eta_s \cos \lambda + \cos(\phi_n + \beta_n - \gamma_n) \sin \eta_s \sin \lambda}{\cos(\phi_n + \beta_n - \gamma_n)} \times \frac{\tau_s v_m}{\sin \phi_n \cos \lambda} \quad (5.1)$$

ただし、 β_n は摩擦角、 γ_n はすくい角、 λ は斜角、 η_s はせん断面角度、 τ_s はワーク変形応力を表している。この他にも、Pramanik ら [12] は金属塑性変形に基づく切削力のモデル化を行っている。

また、切削のためのエネルギーが磨耗といった工具状態と密接に関連していることがわかっている [13,14]。Shao ら [15] は、平均工具逃げ面磨耗が切削力に及ぼす影響を考慮し、次のような正面フライス加工における切削力 P_{cut} を次のように表した。

$$P_{cut} = znDa_p(k_c \bar{h}^{-d} f_z (\cos(\phi_{in}) - \cos(\phi_{in} + \psi)) + \mu H \sqrt{VB} \psi) / 2 \quad (5.2)$$

a_p は切削深さ、 z は刃数、 n は主軸回転数、 D は工具径、 k_c は比切削抵抗、 \bar{h} は切りくず厚さ、 d は係数、 f_z は刃あたり送り速度、 μ はツールとワークピース間の摩擦係数、 H はブリネル硬さ、 \sqrt{VB} は逃げ面磨耗幅である。これらは理論的なモデルではあるものの、予測精度や構造の複雑さ、事前に必要な情報が多い、といった課題がある。

5.2 エネルギー密度に基づく消費エネルギーモデル

前節で挙げたモデルに対し、簡易な構造かつ予測精度が高い消費エネルギーモデルとしてエネルギー密度を用いた研究が国外において活発に行われている。Gutowski らは熱力学的エネルギー収支およびエクセルギーの観点から、製造プロセスにおける質量もしくは容積比の消費エネルギーと生産速度（生産スループット）の統一的な関係性を明らかにしている [16-19]。本章では、このモデルを基軸として、切削加工における除去体積に基づく消費エネルギーを考えることとする。すなわち、切削加工において体積 V (mm^3) を除去するのに必要な電力エネルギーを E (kJ) とするとき、

$$c = \frac{E}{V} \quad (5.3)$$

をエネルギー密度 (Specific Energy Consumption; SEC) と定義する [16]. 式 (5.3) において, 消費エネルギーの算定根拠となる時間 (区間) を Δt (unit time) とすれば,

$$\frac{E}{\Delta t} = \frac{V}{\Delta t} c, \quad (5.4)$$

であり, 消費電力 $\dot{E} = E/\Delta t$ (kW) とエネルギー密度の関係を, 材料除去率 $v_m = V/\Delta t$ ($\text{mm}^3/\text{unit time}$) を用いて,

$$\dot{E} = v_m c \quad (5.5)$$

で表すことができる.

Gutowski らの近似モデル [16] によれば, 工作機械全体を対象とする場合, 工作機械での総消費エネルギー率 \dot{E} (kW) は, 主軸を除く機構・機器の駆動に必要なベース電力 (アイドル時消費電力を含む) \dot{E}_0 (kW), および材料除去率の線形結合, すなわち,

$$\dot{E} = \dot{E}_0 + k v_m \quad (5.6)$$

としている. ただし, k (kJ/mm^3) は材料および加工特性に関する物理定数である. 式 (5.6) の時間積分は, 工作機械全体で必要とする電力エネルギーに相当する. 式 (5.6) の両辺を材料除去率で除すると,

$$c = \frac{\dot{E}}{v_m} = \frac{\dot{E}_0}{v_m} + k \quad (5.7)$$

となり, エネルギー密度は材料除去率の関数で表される.

式 (5.7) を拡張したものとして, Kara らは経験的モデル式 (5.8) を提案している [20, 21].

$$c = C_0 + \frac{C_1}{v_m} \quad (5.8)$$

ただし, C_0 と C_1 は工作機械固有の係数である. Kara らの研究によると, 主軸動力と摩擦による消費動力が空切削時の加工条件に大きく依存することから, 実験データで得られた C_1 が式 (5.6) における \dot{E}_0 と一致しないことを指摘している.

また, Li らは式 (5.8) を改良したエネルギー密度モデルを次のように提案した [22].

$$\dot{E}_0 = \dot{E}_{standby} + \dot{E}_{spindle} = \dot{E}_{standby} + k_1 n \quad (5.9)$$

$$\dot{E} = \dot{E}_{standby} + k_1 n + b + k_0 v_m \quad (5.10)$$

$$c = \frac{\dot{E}}{v_m} = k_0 + k_1 \frac{n}{v_m} + k_2 \frac{1}{v_m} \quad (5.11)$$

$$k_2 = \dot{E}_{standby} + b \quad (5.12)$$

\dot{E}_0 は待機電力 $\dot{E}_{standby}$ と主軸モータの消費電力 $\dot{E}_{spindle}$ に分解された。 $\dot{E}_{spindle}$ はスピンドル速度 n の関数である。 k_1 および b は、主軸モータの固有の係数である。 $k_0 v_m$ は被削材除去のための力を表している。 k_0 とは実験における係数である。 k_2 は工作機械固有の係数である。なお、ここでは送り駆動系による消費を非常に小さいものとして、モデルに導入されていない。このモデルでは、フライス加工プロセスで平均 97% の高い精度を得ることができたとしている。

このほか、式 (5.7) を拡張したものとして Diaz らも同様のモデル式 (5.13) を提案している [23,24].

$$c = k_d \times \frac{1}{v_m} + b \quad (5.13)$$

ただし、定数 k_d は本質的に電力の単位を有し、 b は定常状態の比エネルギーを表すとしている。このほかにも式 (5.13) をベースとした Budinoff ら [25] によるモデルなど、エネルギー密度を用いたエネルギーの評価手法は現在でも活発に議論されており、ミリング加工だけでなくターニング加工、研削加工などにも適応可能であることから、汎用性は非常に高いといえる。また、予測精度に関しても十分に高い。しかしながら、係数に関する明確な説明はなく、物理的根拠が示されていない。

そこで本研究では、従前モデルの持つ意味を考察した上で、それとは異なる新たな予測モデルを提案する。

5.3 エネルギー密度に基づく予測モデルの構築

材料除去率およびエネルギー密度の 2 軸で構成される平面 (MRR-SEC 平面) を考える。式 (5.7) の関係式は、図 5.8 に示すような \dot{E}_0 および k をパラメータとする双曲線として展開される。双曲線の平面上での位置は、ベース電力 \dot{E}_0 および定数 k により定まる。ベース電力 \dot{E}_0 は、工作機械の仕様・性能により決まると考えられ、材料除去率とは独立である。言い換えると、MRR-SEC 平面上において、式 (5.7) で表される双曲線は電力 \dot{E}_0 で一定で

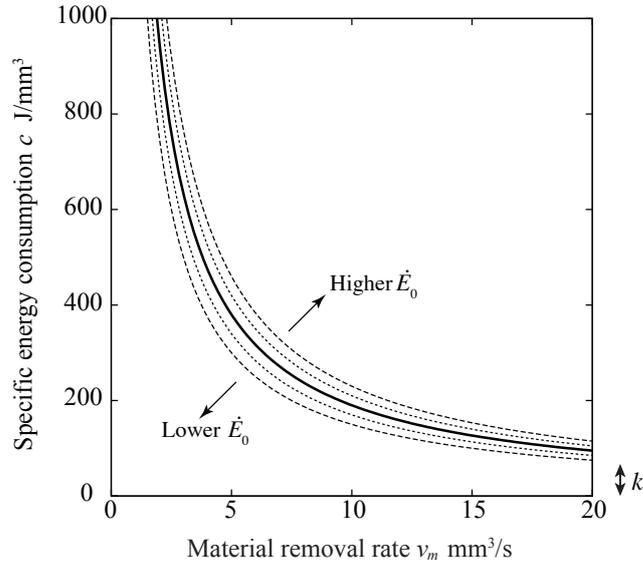


Fig. 5.8: Theoretical energy consumption rate [16] on MRR vs SEC plane [1].

あることを意味する。一方、物理定数 k は、図 5.8 上では双曲線の縦軸方向の位置を決定するものであり、 \dot{E}_0 同様、材料除去率の大きさとは独立である。また、 k は必ずしも非負ではなく、文献 [21] にもあるように、回帰分析の結果によっては負となることにも注意を要する。このことは、定数 k はエネルギー密度と同次元であり、かつ変動エネルギーの強度に直接関わる定数であるにもかかわらず、物理量として意味をなさないことを示唆する。

以上のことから、本研究では、モデル構造の柔軟性および汎用性の観点から、累乗関数による回帰モデル、すなわち、

$$c = \alpha(v_m)^\beta \quad (\alpha > 0, \beta < 0) \quad (5.14)$$

の関係式を新たに考える。式 (5.14) の β は、変動エネルギーが工作機械全体の消費エネルギーに占める割合に関わるパラメータであり、5.5 節で述べるように変動エネルギーが無視できるほど小さくなるにつれて、 β は -1 に漸近する。その際、 α はベース電力 \dot{E}_0 に相当する。

式 (5.14) を用いると、式 (5.5) の消費電力 \dot{E} は、

$$\dot{E} = \alpha v_m^{(\beta+1)} \quad (5.15)$$

と書き換えることができる。次節では、まずエネルギー密度の主たる近似式として式 (5.14) の有用性を検討し、その上で式 (5.15) に示す消費電力予測モデルの精度を検証する。

5.4 切削時消費電力の計測

5.4.1 実験条件

切削時消費電力の予測モデルの構築に必要な消費電力の基礎データを計測するためのドライ切削加工の実験を行った。3軸立形マシニングセンタ (α -T14e, FANUC) を用いて図 5.9 に示すようにアルミニウム合金 A5052 ($75\text{ mm}W \times 75\text{ mm}D \times 30\text{ mm}H$) への溝入れ加工を行い、消費電力データを測定した。表 5.1 にまとめるとおり、利用工具、溝入れの幅および深さ、切削条件をもとに、合計 28 パターンを用意した。表 5.1 の「実験 A」を基準として、材料除去率を半分とした「実験 B」、高速領域での加工となる「実験 C」を考え、送り速度の変化に応じて、実験 A および実験 B ではそれぞれ 10 回、実験 C では 8 回の切削を行った。実験 C では主軸回転数の関係から、外径の異なる工具を利用することとした。溝入れ（除去容積）は表 5.1 下部に記すとおり、実験 A では 2700 mm^3 、実験 B および実験 C ではそれぞれ、 1350 mm^3 および 1500 mm^3 と切削幅および切り込み量により異なる。エネルギー密度および材料除去率の算出には、これらの値を用いた。

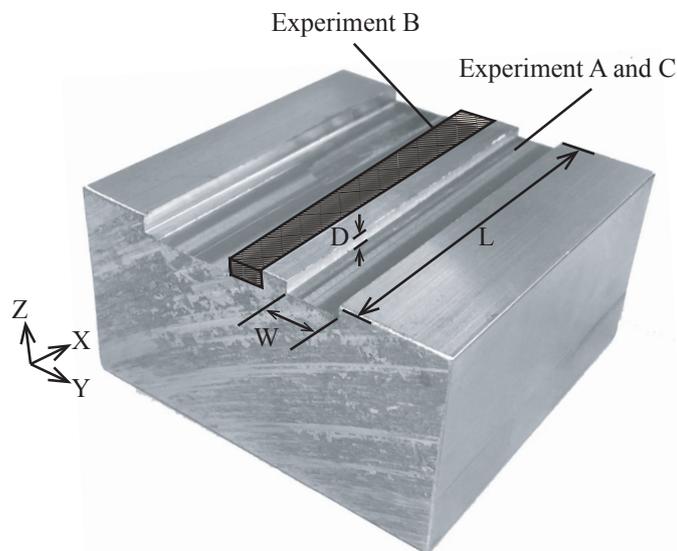


Fig. 5.9: Slot milling for measuring power consumption data [1].

Table 5.1: Experimental conditions.

	A	B	C
• Cutting tool	2-flute TiN coated solid end mill		
Diameter	$\phi 12$	$\phi 12$	$\phi 10$
• Spindle speed (min^{-1})	1500	1500	5000
• Feed ($\text{mm}/\text{min} \cdot \text{tooth}$)	0.02 – 0.20	0.02 – 0.20	0.012 – 0.096
Interval	0.02	0.02	0.012
• Cutting volume (mm^3)	2700	1350	1500
Width (mm)	12	6	10
Length (mm)	75	75	75
Depth (mm)	3	3	2
Sample size	10	10	8

5.4.2 実験結果

前節で述べた実験条件にしたがって 28 パターンの溝入れ加工を行い、消費電力を測定した。いずれの実験においても、LabVIEW プログラム上での電力測定開始の直後に NC プログラムを稼働させ、NC プログラムの終了後すぐに電力測定を終了した。実験結果の一例として、図 5.10 に実験 B (送り速度 60 mm/min) における主電源部での消費電力 (実線)、主軸モータ部での消費電力 (破線)、および切削抵抗 (点線) の変化を示す。図 5.10 にお

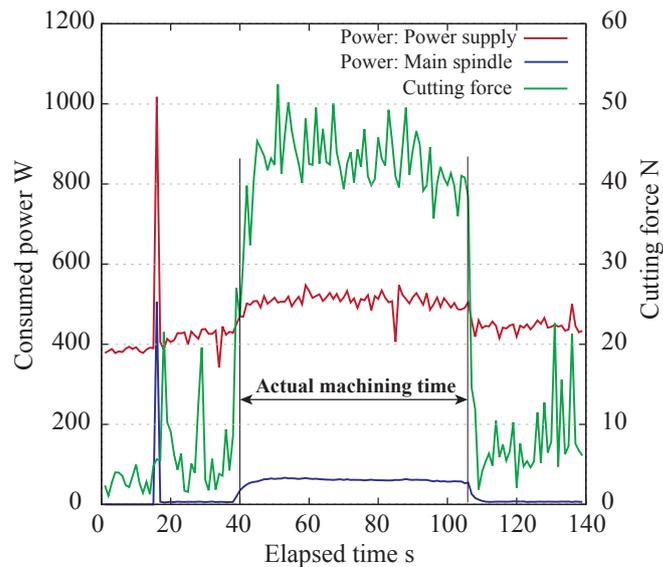


Fig. 5.10: Measured data of power in experiment B with 0.02 mm/(min · tooth).

いて、計測開始後およそ 17 秒後に見られる主電源部での 1000 W 近く（主軸モータ部での 500 W 程度）の大きな電力は主軸の回転動作の始まりを意味する。また、主軸モータ部の消費電力の立上り時間および立下り時間はそれぞれ、切削抵抗の急激な立上りの時間および立下りの時間とほぼ一致することがわかる。本研究では、消費電力予測の対象区間は実際の加工時間とし、その開始および終了の各時点は、計測モジュール NI9205 で測定された切削抵抗の立上りおよび立下りのエッジ間とした。図 5.10 の例では、対象区間は [40, 107] であり、実加工時間は 77 秒である。

図 5.11 に、横軸に材料除去率を取った場合の (a) 主電源部および (b) 主軸モータ部での消費電力 (\dot{E}) の計測結果をまとめる。図 5.11(a) および (b) は、工作機械における一般的な消費電力特性（文献 [28] や式 (5.6)）、すなわち、材料除去率の増加に伴い消費電力は線形増加する傾向にあること、その主因は主軸モータ部での電力消費にあることを示している。図 5.11(c) は、各実験において主電源部での消費電力と主軸モータ部でのそれとの差を取った結果である。図 5.11(c) に見られる材料除去率の大きさに伴う消費電力の増加分は、主として送り駆動系によるものと考えられる。

図 5.11(b) および図 5.11(c) のそれぞれの計測データに対し、線形回帰を適用し材料除去率の増加に伴う消費電力の増加率（回帰係数）を調べた。その結果、図 5.11(b) での増加率は 1.04、図 5.11(c) でのそれは 0.25 であった。したがって、主軸モータ部の消費電力に対するそれ以外での消費電力の相対的増加率は 1/4 程度である。本実験ならびに後述の予測精度検証では、送り駆動系は 1 軸のみの動作を対象としていることから、本章では変動エネルギーとして主軸モータ部で消費されるエネルギーのみを考慮するものとする。

図 5.12(a) に、28 パターンの各切削実験で得られた主電源部で計測した工作機械全体でのエネルギー密度および主軸モータ部でのエネルギー密度を示す。図 5.12(b) は主軸モータ部エネルギー密度が主電源部エネルギー密度に占める割合を表している。図 5.12 では、材料除去率の増加に伴い双方のエネルギー密度はともに非線形で減少することがわかる。主電源部エネルギー密度に対して主軸モータ部エネルギー密度は低く、これは工作機械の消費するエネルギーのうち多くは定常エネルギーであることを裏付ける。一方、材料除去率が大きくなるにしたがって変動エネルギーの占める割合が高まることからわかる。具体的には、図 5.12(b) の主軸モータ部エネルギー密度の割合を見ると、 $v_m \geq 300 \text{ mm}^3/\text{s}$ の領域では 40 % を越え、本実験の範囲では 50 % 近くに達する。

この結果は、重切削や高速加工など高い材料除去率を要する除去加工では、工作機械全体でのエネルギーのうち変動エネルギーの占める割合が高まっていくこと、すなわち、切削に直接関わるエネルギーの効率性を高める余地があることを示唆する。

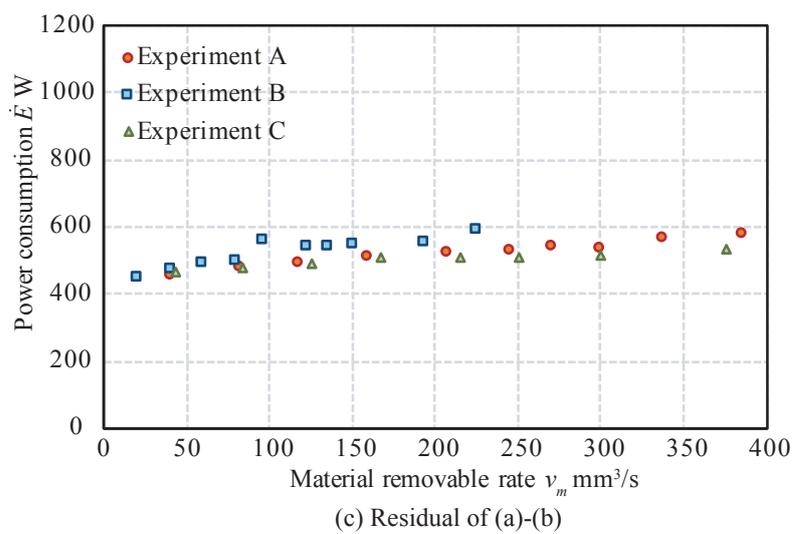
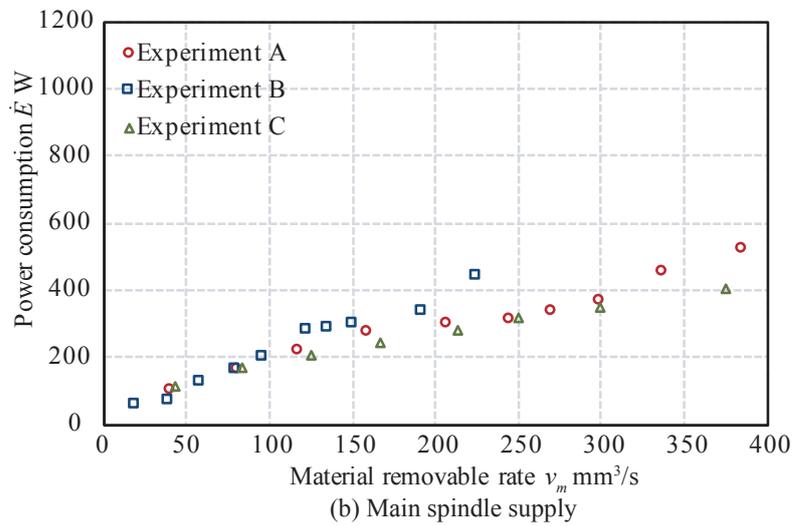
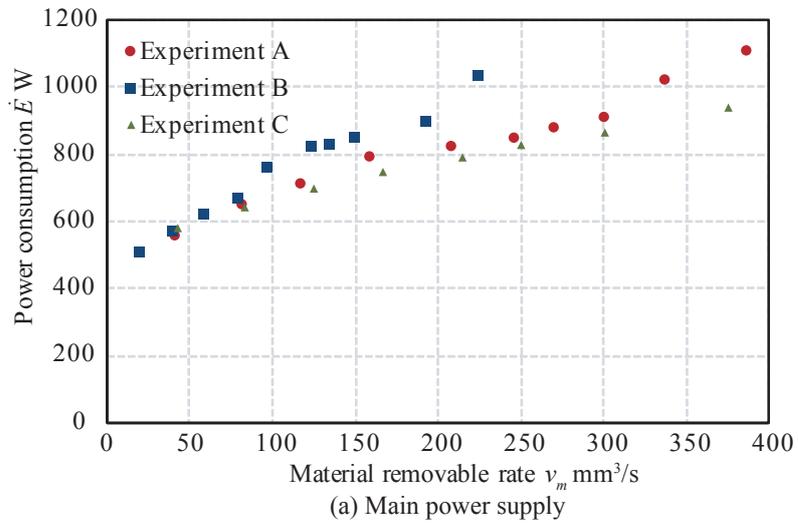
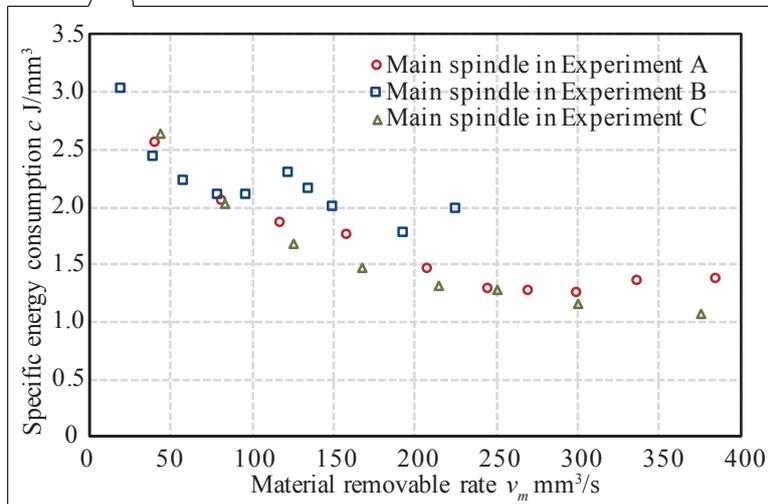
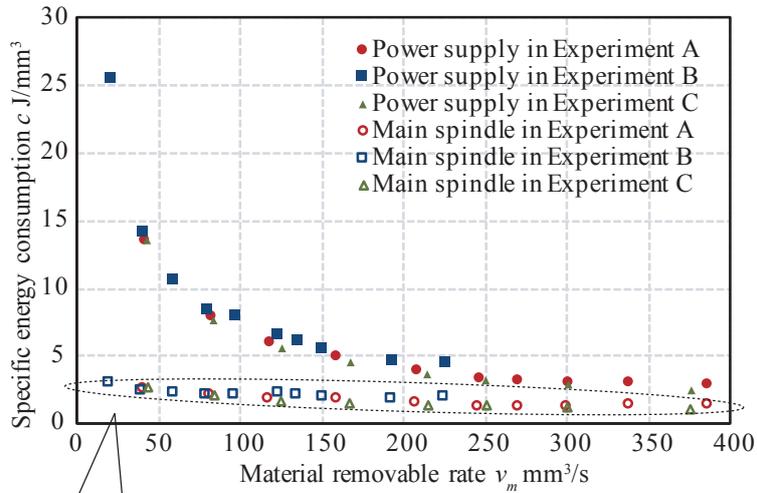
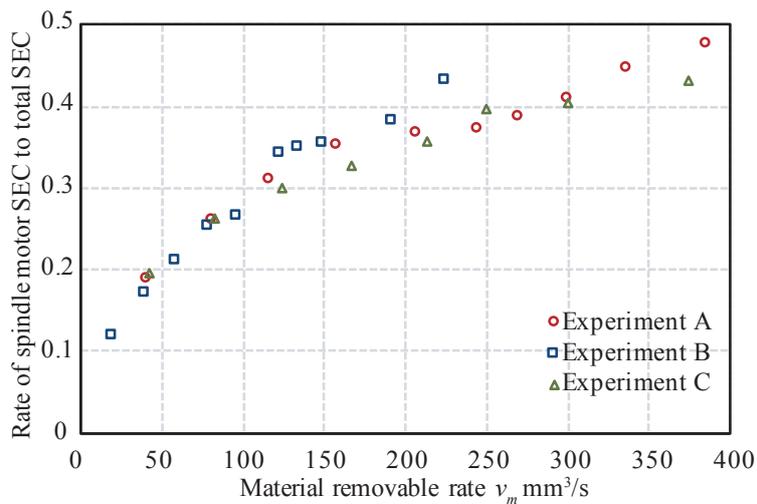


Fig. 5.11: Electric power consumption [1].



(a) Specific energy consumption both at main supply unit (total SEC) and main spindle motor unit (spindle motor SEC)



(b) Rate of spindle motor SEC to total SEC

Fig. 5.12: Specific energy consumption [1].

5.5 回帰分析モデルとその予測精度

本節では、主電源部でのエネルギー密度に注目し、工作機械全体で消費する電力の予測精度を検討する。さらに、消費エネルギーの予測についても考察を加える。

5.5.1 予測モデルの導出

図 5.12 の結果に基づいて、式 (5.14) の回帰モデルのパラメータ α および β を推定する。本研究では、実用性の観点から、最小二乗法による回帰分析を行う。3 パターンの実験 A, B, および C それぞれで得られた主電源部エネルギー密度のデータセットと、これらすべてを結合したデータセットの計 4 種類のデータセットを対象とする。これらのデータセットを、 \mathbf{x}_A , \mathbf{x}_B , \mathbf{x}_C , および \mathbf{x}_{all} で表すこととする。

主電源部エネルギー密度でのパラメータ α, β の推定値および回帰分析結果の決定係数 R^2 を表 5.2 (Main power supply) に示す。また後述の比較実験のため、主電源部エネルギー密度の回帰モデルにおけるパラメータ推定値の標準偏差 (Std. Dev.) を付している。これら 4 パターンの回帰モデルでは、決定係数 R^2 がいずれも 0.99 以上であり、式 (5.14) による当てはめは極めて良好であるといえる。各データセットで得られたエネルギー密度モデルおよび消費電力の予測モデルは次のとおりである。

$$\mathbf{x}_A : c = 187.4(v_m)^{-0.718}, \dot{E} = 187.4(v_m)^{0.282} \quad (5.16)$$

$$\mathbf{x}_B : c = 200.1(v_m)^{-0.711}, \dot{E} = 200.1(v_m)^{0.289} \quad (5.17)$$

$$\mathbf{x}_C : c = 248.9(v_m)^{-0.783}, \dot{E} = 248.9(v_m)^{0.217} \quad (5.18)$$

$$\mathbf{x}_{all} : c = 234.1(v_m)^{-0.759}, \dot{E} = 234.1(v_m)^{0.241} \quad (5.19)$$

上記のエネルギー密度モデルで注目すべき点は、本実験条件下では、パラメータ β の回帰結果が、 -0.8 から -0.7 の範囲内に留まっていることである。すなわち、式 (5.7) の従前モデルのように、工作機械全体のエネルギー密度が必ずしも材料除去率の逆数 ($\beta = -1$) で表されるわけではない。この理由について、回帰式および 5.3 節で導入した MRR-SEC 平面の二つの側面から考察する。

まず、図 5.12 の 28 種類の計測値のそれぞれについて、主電源部エネルギー密度と主軸モータ部エネルギー密度との差を取り、新たなデータセットを抽出した。このデータセット

Table 5.2: Results of regression analysis on SEC vs MRR at main power supply and by total consumed power excluding main spindle power (Residual) [1].

Data set	Main power supply			Residual units		
	α	β	R^2	α	β	R^2
\mathbf{x}_A	187.4	-0.718	0.991	303.5	-0.897	0.999
\mathbf{x}_B	200.1	-0.711	0.993	318.2	-0.891	0.998
\mathbf{x}_C	248.9	-0.783	0.998	373.3	-0.944	0.999
\mathbf{x}_{all}	234.1	-0.759	0.986	358.7	-0.927	0.996
Std. Dev.	24.9	0.030				

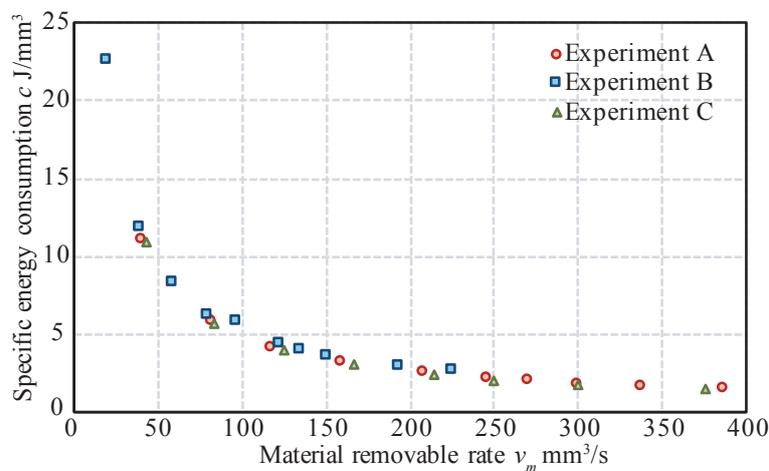


Fig. 5.13: Calculated MRR-SEC values excluding power consumption at main spindle and auxiliary units. [1]

におけるエネルギー密度は、5.4.2 項の考察によれば定常エネルギーの密度に相当する。これを定常エネルギー密度と呼ぶこととする。これを MRR-SEC 平面にプロットしたものを図 5.13 に、さらにこのデータセットに基づく回帰分析結果を表 5.2 の右側 (Residual) に示す。図 5.13 および表 5.2 から、定常エネルギー密度の回帰モデルでは $\beta \approx -0.9$ となっている。送り駆動系での消費電力の影響を除外すると、 β はさらに -1 に近づくことが推察され、結果として定常エネルギー密度を材料除去率の逆数 ($\beta = -1$) で近似することができる。

Table 5.3: Results of regression analysis on Kara&Li's equation [21] [1].

Data set	C_1	C_0
\mathbf{x}_A	596.2	0.293
\mathbf{x}_B	530.6	0.494
\mathbf{x}_C	607.3	0.162
\mathbf{x}_{all}	482.1	1.788
Std. Dev.	50.8	0.648

5.5.2 比較対象

予測モデルの精度を検証するあたり、比較対象として式 (5.7) をベースとする Kara&Li のエネルギー密度モデル [21] :

$$c = C_0 + \frac{C_1}{v_m} \quad (5.20)$$

を取り上げる (以下, Kara&Li モデル). 式 (5.20) の C_0 および C_1 は切削条件に依存するパラメータである. Kara&Li モデルによる消費電力の予測式は, 式 (5.5) を用いて,

$$\dot{E} = C_0 v_m + C_1 \quad (5.21)$$

である. ただし, Kara&Li モデルでは $v_m > 1000$ の領域も対象としているが, 本実験では対象工作機械および加工の制約上 $0 < v_m \leq 400$ に限定される. 二つのパラメータ C_0 および C_1 は, 上記の回帰分析と同様に, 5.4.2 項で得られた主電源部での材料除去率, エネルギー密度のデータ系列をもとに最小二乗法で求めた. その回帰分析の結果と標準偏差を表 5.3 に示す. パラメータ C_0 および C_1 の推定値は表 5.2 の結果と比べて, ばらつきが大きいことがわかる. すなわち, 本研究で提案するエネルギー密度モデルは, Kara&Li モデルに比べて, 切削条件の影響が相対的に小さいといえる.

Kara&Li モデルに基づく回帰分析結果は以下に記すとおりである.

$$\mathbf{x}_A : c = 0.293 + \frac{596.2}{v_m}, \dot{E} = 0.293v_m + 596.2 \quad (5.22)$$

$$\mathbf{x}_B : c = 0.494 + \frac{530.6}{v_m}, \dot{E} = 0.494v_m + 530.6 \quad (5.23)$$

$$\mathbf{x}_C : c = 0.162 + \frac{607.3}{v_m}, \dot{E} = 0.162v_m + 607.3 \quad (5.24)$$

$$\mathbf{x}_{\text{all}} : c = 1.788 + \frac{482.1}{v_m}, \dot{E} = 1.788v_m + 482.1 \quad (5.25)$$

5.5.3 予測精度の検証 (1) 消費電力

予測モデルの妥当性を検証する。実験の手順は次のとおりである：まず、5.4.1 項と同一の 3 軸立形マシニングセンタ (α -T14e)，工具 (G2MS, $\phi 10$ mm)，被削材 (A5052) を用いて、図 5.14 に示す深さ 2 mm のポケット形状の加工を行い、消費電力を測定した。切削条件は、主軸回転数を 2000 min^{-1} ，送り速度を 350 mm/min とした。次に、ポケット加工について、エンドミルによる加工パスを 9 個の区間（以下、フィーチャ）に分割し、それぞれについて除去体積，加工時間および材料除去率を算出した上で、提案モデルおよび Kara&Li のモデルに基づいて、フィーチャごとの平均消費電力の予測値を算出した。除去体積，加工時間および材料除去率の見積値を表 5.4 に、モデルに基づく消費電力予測値と消費電力の実測値を表 5.5 にまとめる。さらに、表 5.5 下段に各予測値の予測精度を示す。予測精度 η は、対象とする消費電力の実測値 (\tilde{e}) と予測値 (e) を用いて、

$$\eta = \left(1 - \left| \frac{\tilde{e} - e}{\tilde{e}} \right| \right) \times 100 \quad (\%) \quad (5.26)$$

と定義する。表中では、各フィーチャおよび各系列ごとに、予測精度の高い方を太字で表している。表 5.5 から、実験 A, B および C での消費電力予測について、提案モデルによる予測精度は Kara&Li モデルによるそれと比べて非常に高いことがわかる。すべての数値系列を総合して予測した場合 (\mathbf{x}_{all}) では 9 フィーチャのうち 6 フィーチャについては Kara&Li モデルによる予測が良好である。提案モデルの予測精度はすべてのフィーチャにおいて $\eta > 90$ であり、Kara&Li モデルとほぼ同等の予測精度といえる。以上のことから、提案エネルギー密度モデルに基づく消費電力の予測は有用であるといえる。

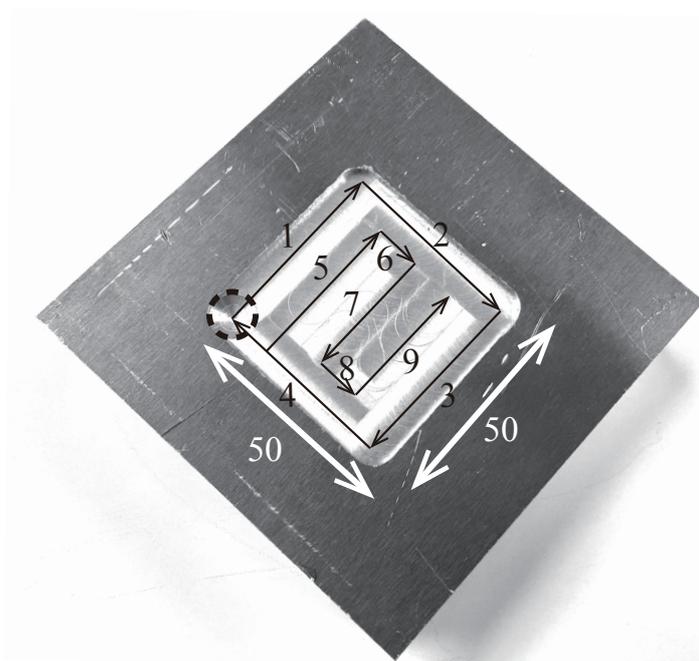


Fig. 5.14: Workpiece for benchmark [1].

Table 5.4: Estimates for each features in pocketing process [1].

Feature	Removal volume [mm ³]	Processing time [s]	Material removable rate [mm ³ /s]
1	800.0	6.9	116.7
2	789.3	6.9	115.1
3	789.3	6.9	115.1
4	621.5	6.9	90.6
5	600.0	6.0	100.0
6	89.3	1.7	52.1
7	510.7	5.1	99.3
8	89.3	1.7	52.1
9	510.7	5.1	99.3

Table 5.5: Measured and estimated average power consumption on each feature (Eq.(5.15): Proposed model, Eq.(5.21): Kara&Li's model [21]) [1].

Feature	Estimated [W]									Measured [W]			
	x_A			x_B			x_C				x_{all}		
	Eq.(5.15)	Eq.(5.21)	Eq.(5.15)	Eq.(5.21)	Eq.(5.15)	Eq.(5.21)	Eq.(5.15)	Eq.(5.21)	Eq.(5.15)		Eq.(5.21)	Eq.(5.15)	Eq.(5.21)
1	717.3	630.4	791.8	588.2	699.2	626.2	737.2	690.8	697.5				
2	714.5	629.9	788.7	587.5	697.1	625.9	734.7	687.9	672.3				
3	714.5	629.9	788.7	587.5	697.1	625.9	734.7	687.9	700.4				
4	667.9	622.8	736.0	575.4	661.8	622.0	693.5	644.1	696.4				
5	686.7	625.5	757.3	580.0	676.1	623.5	710.2	660.9	687.3				
6	571.4	611.5	627.2	556.3	586.9	615.7	607.0	575.3	567.8				
7	685.3	625.3	755.7	579.7	675.1	623.4	709.0	659.6	637.2				
8	571.4	611.5	627.2	556.3	586.9	615.7	607.0	575.3	545.2				
9	685.3	625.3	755.7	579.7	675.1	623.4	709.0	659.6	697.1				

Feature	Accuracy of Prediction η (%)											
	x_A			x_B			x_C			x_{all}		
	Eq.(5.15)	Eq.(5.21)	Eq.(5.15)	Eq.(5.21)	Eq.(5.15)	Eq.(5.21)	Eq.(5.15)	Eq.(5.21)	Eq.(5.15)	Eq.(5.21)	Eq.(5.15)	Eq.(5.21)
1	97.17	90.38	86.48	84.33	99.76	89.78	94.31	99.03				
2	93.73	93.70	82.69	87.38	96.32	93.11	90.72	97.68				
3	97.99	89.93	87.40	83.87	99.52	89.37	95.10	98.22				
4	95.90	89.42	94.32	82.62	95.03	89.31	99.59	92.49				
5	99.91	91.00	89.82	84.38	98.37	90.72	96.66	96.16				
6	99.37	92.31	89.54	97.98	96.63	91.56	93.10	98.69				
7	92.44	98.14	81.40	90.97	94.05	97.83	88.73	96.48				
8	95.20	87.85	84.96	97.96	92.35	87.06	88.67	94.49				
9	98.31	89.70	91.59	83.16	96.84	89.43	98.29	94.63				

5.5.4 予測精度の検証 (2) 消費エネルギー

消費電力量は，式 (5.4) より，

$$E = cV = c \left(\frac{V}{\Delta t} \right) \Delta t = cv_m \Delta t = \dot{E} \Delta t \quad (5.27)$$

である。消費電力 \dot{E} に対する予測性能について 5.5.2 項の結果を前提とすると，消費エネルギーの予測は，除去容積 V もしくは加工時間 Δt の予測精度に大きく左右されることとなる。すなわち，次のケースに分けて考えることができる。

1. 消費電力量の予測精度の上限は，表 5.5 のそれと同等である。すなわち，加工時間の実現値と予測値との差がゼロであれば，消費電力量の予測精度結果は表 5.5 に示す予測精度と等価である。
2. 加工時間の予測精度が相対的に低くなる（見積りと実現値が乖離する）にしたがって，消費電力量の予測精度は劣化する。

上記 2. の一例として，表 5.4 に示す加工時間の見積値を用いて算出した各フィーチャごとの消費電力量の見積りおよび予測精度 η の結果を表 5.6 にまとめる。表 5.6 での予測精度の結果は，全般的に表 5.5 のそれに比べると，ばらつきが非常に大きく，例えばフィーチャ 8 の予測精度は極めて低い。消費電力量を精度良く見積もるためには，加工時間（もしくは除去容積）を精緻に見積もることが肝要である。

Table 5.6: Obtained prediction accuracy of energy consumption based on predictive processing time (Eq. (5.15): Proposed model, Eq. (5.21): Kara&Li's model [21]) [1].

Feature	Estimated [J]						Measured		
	x_A		x_B		x_C		x_{all}		
	Eq.(5.15)	Eq.(5.21)	Eq.(5.15)	Eq.(5.21)	Eq.(5.15)	Eq.(5.21)	Eq.(5.15)	Eq.(5.21)	
1	4949.2	4322.6	5463.6	4033.6	4824.2	4320.8	5086.4	4766.2	4185.1
2	4929.9	4319.5	5441.9	4028.3	4809.8	4319.0	5069.6	4746.5	4705.9
3	4929.9	4319.5	5441.9	4028.3	4809.8	4319.0	5069.6	4746.5	4202.6
4	4608.2	4270.3	5078.2	3945.4	4566.4	4291.6	4785.4	4444.2	3482.0
5	4120.2	3753.0	4543.6	3480.0	4056.7	3741.0	4261.4	3965.4	3436.7
6	971.3	1048.2	1066.3	953.7	997.8	1046.8	1031.8	977.9	567.8
7	3495.3	3215.8	3854.2	2981.1	3443.0	3179.3	3616.1	3364.2	3185.8
8	971.3	1048.2	1066.3	953.7	997.8	1046.8	1031.8	977.9	545.2
9	3495.3	3215.8	3854.2	2981.1	3443.0	3179.3	3616.1	3364.2	2788.2

Feature	Accuracy of Prediction η (%)							
	x_A		x_B		x_C		x_{all}	
	Eq.(5.15)	Eq.(5.21)	Eq.(5.15)	Eq.(5.21)	Eq.(5.15)	Eq.(5.21)	Eq.(5.15)	Eq.(5.21)
1	81.74	96.71	69.45	96.38	84.73	96.76	78.46	86.11
2	95.24	91.79	84.36	85.60	97.79	91.78	92.27	99.14
3	82.69	97.22	70.51	95.85	85.55	97.23	79.37	87.06
4	67.66	77.36	54.16	86.69	68.86	76.75	62.57	72.37
5	80.11	90.80	67.79	98.74	81.96	91.15	76.00	84.62
6	28.93	15.40	12.21	32.04	24.28	15.65	18.28	27.77
7	90.29	99.06	79.02	93.57	91.93	99.80	86.49	94.40
8	21.84	7.74	4.43	25.07	16.99	8.00	10.74	20.63
9	74.64	84.67	61.77	93.08	76.52	85.97	70.31	79.34

5.6 考察: モデルのロバスト性

表 5.2 で示すように, 電力消費の傾向は定常エネルギーが支配的である. その傾向が強くなるにつれて, (Kara&Li モデルの構造がそうであるように) 式 (5.5) で概ね近似することが可能である. 一方, 5.4.2 項の実験結果で触れたように, 材料除去率が増えるにつれて, 工作機械全体で消費するエネルギーのうち変動エネルギーの占める割合が高まる. このような領域では, 予測精度が劣化する可能性がある. これを検討するために, 図 5.12(a) の結果に基づいて, エネルギー密度が 5 未満 ($c < 5$) なるデータのみを抽出し, 回帰分析を行った. 対象となるデータセットの大きさは 14 であり, 変動エネルギー (c_s) が消費エネルギー全体に占める割合 ($c_s/c \times 100$) は 33% から 48% である. このデータセットによる回帰分析を行った結果, 次のエネルギー密度の回帰式および消費電力 \dot{E} の予測式が得られた:

▷ 提案予測式:

$$c = 173.4(v_m)^{-0.708} \quad (R^2 = 0.869) \quad (5.28)$$

$$\dot{E} = 173.4(v_m)^{0.292} \quad (5.29)$$

▷ Kara&Li の予測式:

$$c = 0.0631 + \frac{827.1}{v_m} \quad (R^2 = 0.932) \quad (5.30)$$

$$\dot{E} = 0.0631v_m + 827.1 \quad (5.31)$$

5.5.2 項について, 式 (5.29) および式 (5.31) による消費電力を予測した結果を表 5.7 に示す. 表 5.7 から, 提案予測式の予測精度は 92 % 以上を維持している一方, Kara&Li の予測式でのそれは 47 % から 80 % と大幅に劣化しているとともに, 精度の幅 (ばらつき) が大きいことがわかる. また, Kara&Li の予測式では消費電力を多く見積もる傾向があり, かつ 830 W 付近とほぼ同一の予測値である. これは, 消費電力の予測式が線形構造であり, 材料除去率の高い領域ではエネルギー密度の変化が相対的に小さいことが原因である. 非線形構造を有する提案予測式では, Kara&Li の予測式に比べてデータセットに柔軟にフィットしており, 予測精度のロバスト性が高いといえる.

Table 5.7: Estimated power consumption and prediction accuracy with $SEC < 5$ (Eq.(5.15): Proposed model, Eq.(5.21): Kara&Li's model [21]) [1].

Feature	Measured power [W]	Estimated power [W]		Accuracy [%]	
		Eq.(5.15)	Eq.(5.21)	Eq.(5.15)	Eq.(5.21)
1	697.5	695.8	834.5	99.76	80.36
2	672.3	693.0	834.4	96.92	75.89
3	700.4	693.0	834.4	98.95	80.87
4	696.4	646.3	832.8	92.80	80.41
5	687.3	665.2	833.4	96.78	78.74
6	567.8	549.8	830.4	96.84	53.75
7	637.2	663.8	833.4	96.83	69.21
8	545.2	549.8	830.4	99.15	47.69
9	697.1	663.8	833.4	95.22	80.45

5.7 被削材による影響の分析

ここでは、エンドミルを用いて溝入れ加工を行い消費電力を計測・分析することで、異なる特性を持つ被削材および工作機械を用いたときに提案モデル式 (5.14) の関係性が得られるか検証する。工作機械は 5.4.1 節の実験で使用した α - T14e と新たに 3 軸立形マシンングセンタ ecoMill を用いた。工具は $\phi 10$ mm の 2 枚刃ハイスエンドミル G2MS を用いた。被削材は表 5.8 に示すアルミニウム合金，炭素鋼，炭素工具鋼，ねずみ鋳鉄，クロムモリブデン鋼およびステンレス鋼材を計 11 種類用いた。加工は図 5.9 実験 A と同様，X 軸方向への溝入れ加工を行った。主軸回転数および送り速度は表 5.8 に示す通りである。また，さまざまな材料除去率での切削を行う意図から，表 5.8 中に示すように，工具メーカーの推奨条件を 100 % とし，送り速度が 70 %，80 %，90 %，110 %，120 % の場合においての実験も行った。これらの条件のもと，計 66 パターンの加工を行い，切削時消費電力を 1 秒ごとに計測した。これまでと同様，計測対象区間は動力計に反応がある区間，すなわち切削中の区間のみとした。計測実験における ROBODRILL による被削材ごとの切削時平均消費電力を図 5.15(a)，ecoMILL による被削材ごとの切削時平均消費電力を図 5.15(b) に示す。まず，図 5.15(a) ROBODRILL における送り速度 100 mm/min 付近での消費電力に注目すると，FC250 が送り速度 104 mm/min で 534.7 W の電力消費なのに比べ，SCM435 では送り速度 108 mm/min で 623.9 W の電力消費と，その差は 89.2 W にもなり，被削材が異なればその特性の変化から送り速度に大きな差がなくとも消費電力が増加する結果となった。一方，図 5.15(b) ecoMill を見ると，図 5.15(a) ROBODRILL と同様に被削材により消費電力が異なるものの，送り速度 100 mm/min 付近では FC250 が送り速度 104 mm/min で 481.4 W の電力消費なのに比べ，SCM435 では送り速度 108 mm/min で 472.8 W の電力消費となって

Table 5.8: Processing conditions for analyzing the influence of the workpieces.

Workpiece	Rotation speed			Feed rate			
	[min ⁻¹]			[mm/min]			
A7075	2200	245	280	315	<u>350</u>	385	420
SS400	1000	80	92	103	<u>115</u>	126	138
S45C	1000	80	92	103	<u>115</u>	126	138
FC250	840	91	104	117	<u>130</u>	143	156
FC300	840	91	104	117	<u>130</u>	143	156
S55C	770	63	72	81	<u>90</u>	99	108
SCM435	770	63	72	81	<u>90</u>	99	108
SCM440	770	63	72	81	<u>90</u>	99	108
SK3	560	35	40	45	<u>50</u>	55	60
SUS304	460	31	36	40	<u>45</u>	49	54
SUS316	460	31	36	40	<u>45</u>	49	54

※ The underlined parts are the recommended value by the tool maker.

おり、その差は 11.4 W と極めて小さい。他の被削材についてみても、概ね 500 W 前後で推移しており、ROBODRILL と比べると消費電力の変化量は小さい。この結果は、工作機械によって固有の変動エネルギー消費傾向が存在することを示唆しており、個々の工作機械に応じた消費電力モデルを構築する必要があることを意味する。次に、各被削材ごとの計測データを MRR-SEC 平面上にプロットしたものが、図 5.16 である。なお、材料除去率は実切削時間をもとに算出されていること、計測間隔が 1 秒であることから、ROBODRILL と ecoMill で材料除去率の値は必ずしも同じ値とはならない。図 5.16(a) で被削材ごとの消費電力のばらつきが確認できるほか、全体として ROBODRILL の消費電力が図 5.16(a) に示す ecoMill の消費電力よりも大きいことなど、図 5.15 と同様の傾向を MRR-SEC 平面上で確認できる。そして、MRR-SEC 平面でこれらの消費電力を見ることによって、エネルギー密度と材料除去率に強い相関があることがわかる。

図 5.16 に示した ROBODRILL および ecoMill のそれぞれで計測された全 66 個のデータに対し、回帰分析を行った。モデル式や決定係数 R^2 値は表 5.9 に示すとおりである。また、Kara&Li モデルによる分析結果も同じく表 5.9 に示す。まず、対数目盛や指数近似、多項式近似においても決定係数 R^2 値は 0.8 を越えているほか、Kara&Li モデルにおいては、 R^2 値が ROBODRILL で 0.974、ecoMill で 0.995 と非常に高い値となった。しかしながら、ROBODRILL および ecoMill の双方で累乗関数による近似がもっとも当てはまりが良く、決定係数 R^2 値は ROBODRILL で 0.983、ecoMill で 0.997 という結果となった。これは多様な被削材や、異なる工作機械を用いても提案モデルの適用が可能であることを意味する。

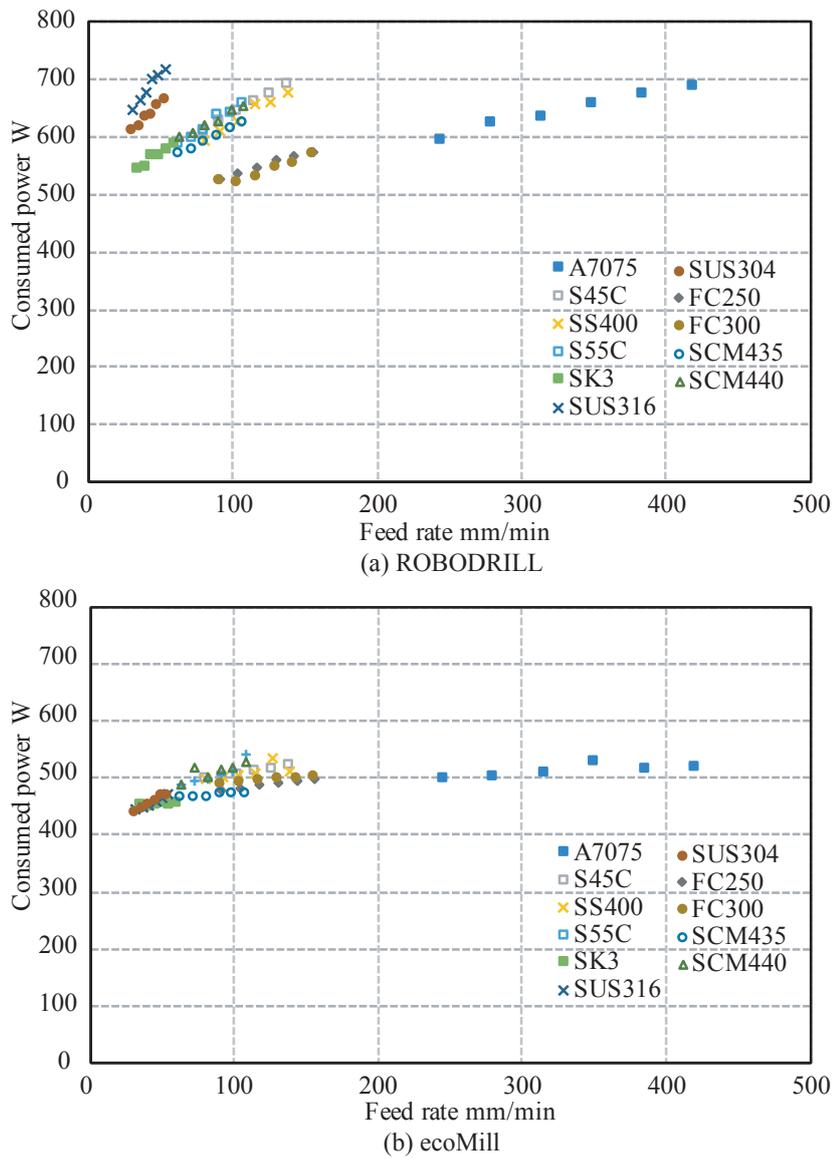
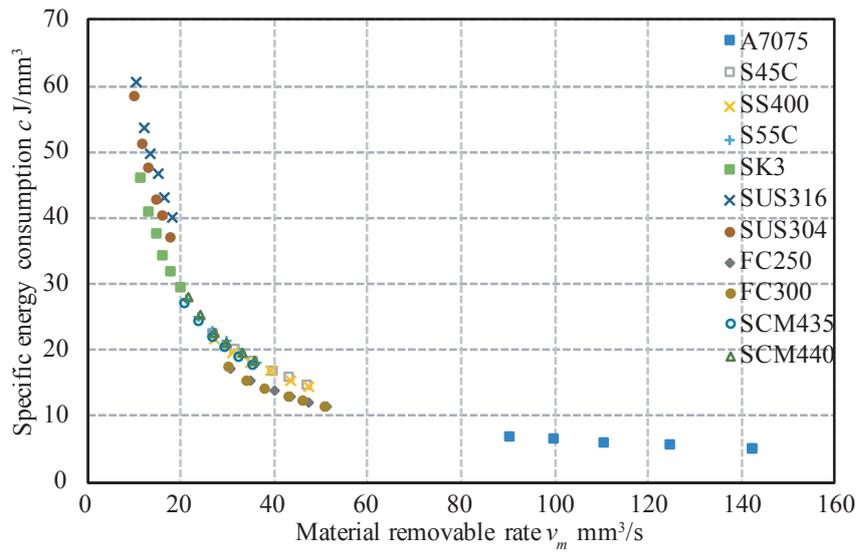
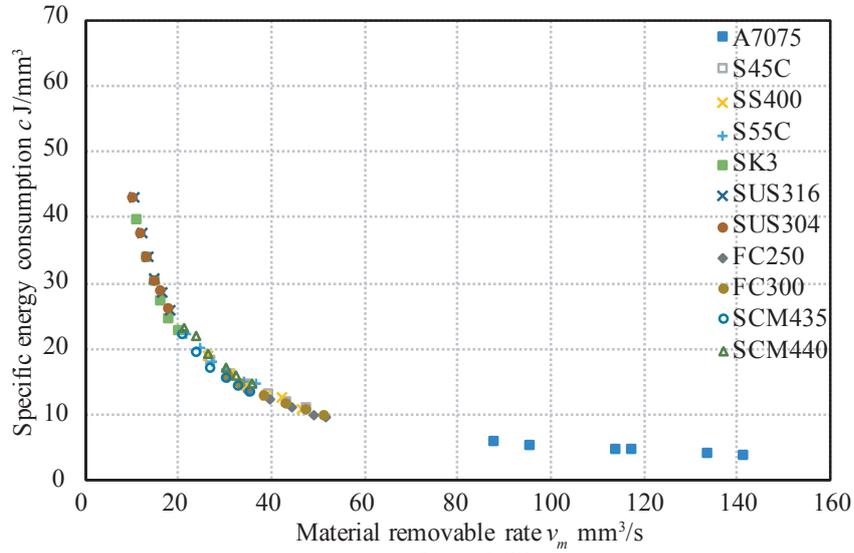


Fig. 5.15: Average power consumption during milling for each workpieces.



(a) ROBODRILL



(b) ecoMill

Fig. 5.16: Measurement results on the MRR-SEC plane.

Table 5.9: Regression equations and coefficients of determination R^2 .

(a) ROBODRILL		
Model type	Model equation	R^2
Power approximation	$c = 612.36 \times v_m^{-1.002}$	0.983
Linear approximation	$c = -0.3351 \times v_m + 36.591$	0.494
Logarithmic scale	$c = -20.68 \times \log v_m + 94.396$	0.834
Exponential	$c = 41.381 \times e^{-0.019v_m}$	0.810
Polynomial approximation (2 terms)	$c = 0.008 \times v_m^2 - 1.4469 \times v_m + 59.884$	0.857
Polynomial approximation (3 terms)	$c = -0.0001v_m^3 + 0.0295v_m^2 - 2.5173v_m + 73.508$	0.932
Kara&Li's model [21]	$c = -0.583 + 628.106/v_m$	0.974
(b) ecoMill		
Model type	Model equation	R^2
Power approximation	$c = 352.913 \times v_m^{-0.903}$	0.997
Linear approximation	$c = -0.2598 \times v_m + 28.349$	0.563
Logarithmic scale	$c = -15.05 \times \log v_m + 69.927$	0.896
Exponential	$c = 32.789 \times e^{-0.019v_m}$	0.868
Polynomial approximation (2 terms)	$c = 0.0052 \times v_m^2 - 0.9741 \times v_m + 43.353$	0.889
Polynomial approximation (3 terms)	$c = -0.00005v_m^3 + 0.0194v_m^2 - 1.6823v_m + 52.374$	0.959
Kara&Li's model [21]	$c = 1.705 + 432.736/v_m$	0.995

次に、計測データを被削材ごとに分類し、累乗関数で回帰分析した結果が表 5.10 である。表 5.10(a) 中の ROBODRILL における提案モデルの α に相当する値を見ると、ROBODRILL において最小は A7075 の $\alpha = 165.26$ 、最大は SUS316 の $\alpha = 416.89$ と、大きな差が見られる。また、提案モデルの β に相当する値を見ると、ROBODRILL において最大は A7075 の $\beta = -0.715$ 、最小は SK3 の $\beta = -0.839$ となっている。一方、表 5.10(b) 中の ecoMill における α に相当する値を見ると、最小は FC300, S55C の $\alpha = 284.38$ 、最大は SK3 の $\alpha = 429.82$ であり、その差は 145.44 と、ROBODRILL に比べて小さな差となった。また、提案モデルの β に相当する値を見ると、最大は S55C の $\beta = -0.828$ 、最小は SK3 の $\beta = -0.982$ となり、 -1 に近い値が見られる。以上の結果は、図 5.15 や、図 5.16 に示された被削材ごと、あるいは工作機械ごとに異なる電力消費傾向をも、 α および β で吸収することによって、提案モデル式 (5.14) で表現可能であることを示唆している。また、表 5.10(a) 中の ROBODRILL における決定係数 R^2 値を見ると、S55C では累乗回帰で R^2 値が 0.989、それ以外の被削材では R^2 値が 0.993 を超える結果となっている。表 5.10(b) 中の ecoMill における決定係数 R^2 値を見ると、S55C では累乗回帰で R^2 値が 0.989、それ以外の被削材では R^2 値が 0.992 を超える結果となっており、おおよそ ROBODRILL における結果と同じ傾向といえる。これらを表 5.9 における全 66 個のデータをまとめて累乗関数で分析したときの決定係数と比べ

ると、より良いあてはまりとなっている。つまり、より高い予測精度を求めるならば、個々の被削材ごとに分析した結果を用いるほうが良いことがわかる。

Table 5.10: Regression equation and coefficient of determination for each workpieces.

(a) ROBODRILL		
Workpiece	Model equation	R^2
A7075	$c = 165.26 \times v_m^{-0.715}$	0.993
FC250	$c = 286.03 \times v_m^{-0.823}$	0.999
FC300	$c = 283.55 \times v_m^{-0.826}$	0.995
S45C	$c = 285.42 \times v_m^{-0.773}$	1.000
S55C	$c = 301.00 \times v_m^{-0.783}$	0.998
SCM435	$c = 323.11 \times v_m^{-0.817}$	0.999
SCM440	$c = 342.52 \times v_m^{-0.820}$	0.999
SK3	$c = 372.24 \times v_m^{-0.849}$	0.999
SS400	$c = 263.68 \times v_m^{-0.755}$	0.997
SUS304	$c = 416.89 \times v_m^{-0.841}$	0.999
SUS316	$c = 391.08 \times v_m^{-0.789}$	0.999

(b) ecoMill		
Workpiece	Model equation	R^2
A7075	$c = 345.04 \times v_m^{-0.917}$	0.993
FC250	$c = 375.63 \times v_m^{-0.929}$	1.000
FC300	$c = 284.38 \times v_m^{-0.945}$	1.000
S45C	$c = 365.80 \times v_m^{-0.909}$	1.000
S55C	$c = 284.38 \times v_m^{-0.828}$	0.989
SCM435	$c = 416.68 \times v_m^{-0.965}$	1.000
SCM440	$c = 346.61 \times v_m^{-0.883}$	0.992
SK3	$c = 429.82 \times v_m^{-0.982}$	1.000
SS400	$c = 386.28 \times v_m^{-0.923}$	0.992
SUS304	$c = 330.77 \times v_m^{-0.879}$	1.000
SUS316	$c = 349.95 \times v_m^{-0.898}$	0.999

5.8 まとめ

本研究では、3軸立形マシニングセンターにおけるアルミニウム合金加工を対象として、消費エネルギー密度と材料除去率との関連性から得られる消費電力の予測モデルを新たに提案した。この予測モデルは、現象論的アプローチにより、累乗関数の構造を持つことを示し、回帰分析により予測モデルとしての適合性の高さを示した。一連の切削・計測実験を通じて、次のことが明らかとなった。

- ▷ 工作機械の消費するエネルギーの多くは定常エネルギーであり、とりわけ材料除去率が相対的に低い場合（本研究では $v_m < 100 \text{ mm}^3/\text{s}$ ）は、切削に由来する変動エネル

ギーは無視できるほど小さい。逆に、材料除去率が増えるにつれて、消費エネルギー全体のうち変動エネルギーの占める割合は高まり、材料除去率が $300 \text{ mm}^3/\text{s}$ 以上では 50 % に達する。

- ▷ 消費電力の予測に関して、提案予測式は従前の代表的な予測式 (Kara&Li モデル [21]) と同等の予測精度である。
- ▷ 材料除去率が高い領域 (変動エネルギーが工作機械全体の消費エネルギーに占める割合が 33 % を超える領域, 本研究では $c < 5$) では、予測精度 92 % ~ 99 % を維持する一方、従前予測式のそれが 47 % から 80 % と大きく劣化するとともに、ばらつきも大きい。したがって、従前モデルに比べて提案予測モデルのロバスト性は高い。
- ▷ 被削材および工作機械が異なる条件下においても、提案モデルの適用が可能である。

以上のことから、本研究で取り上げた切削環境下において、提案予測式は消費電力の予測モデルとして有用であるといえる。

本研究で比較対象として取り上げた Kara&Li モデルをはじめとする関連予測モデル (例えば [23, 28]) では、多様な旋削加工およびフライス加工においても同等の予測性能を示しており、提案モデルについてもその可能性が期待できる。

参考文献

- [1] 寒川哲夫, 諏訪晴彦, 切削加工における消費エネルギー密度に基づく切削時消費電力の予測に関する基礎的研究, 精密工学会誌, Vol.83, No. 4, (2017), pp. 367–374.
- [2] B. Denkena, F. Flöter, and L. Hülsemeyer, Energy-Efficient Machine Tools and Technologies, *Proceedings of the 15th International Machine Tool Engineers Conference*, (2012), pp. 174–187.
- [3] HEIDENHAIN, 工作機械における省エネルギーの考察, https://www.heidenhain.co.jp/ja_JP/, (2017年12月6日最終アクセス).
- [4] 林晃生, 佐藤隆太, 白瀬敬一, 数値制御工作機械の送り駆動系における消費電力の測定と評価, 精密工学会誌, Vol. 79, No. 10, (2013), pp. 930–936.
- [5] 植竹伸二, 工作機械における省エネルギーへの取り組み, *JTEKT ENGINEERING JOURNAL*, No. 1010, (2012), pp. 9–12.
- [6] M. Fujishima, M. Mori, and Y. Oda, Energy-Efficient Manufacturing on Machine Tools by Machining Process Improvement, *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*, Springer, (2014), pp. 461–466.
- [7] M. Mori, M. Fujishima, Y. Inamasu, and Y. Oda, A Study on Energy Efficiency Improvement for Machine Tools, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 60, No. 1, (2011), pp. 145–148.
- [8] S. Thiede, *Energy Efficiency in Manufacturing Systems –Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management–*, Springer, (2012), pp. 1–196.
- [9] 三菱電機 e-f@ctory, <http://www.mitsubishielectric.co.jp/fa/sols/index.html>, (2018年1月10日最終アクセス).
- [10] 澤武一, 絵とき 続・「旋盤加工」基礎のきそ-スキルアップ編-, 日刊工業新聞社, (2011), pp. 45–112.

- [11] A.A. Munoz, and P. Sheng, An Analytical Approach for Determining the Environmental Impact of Machining Processes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 53, (1995), pp. 736–758.
- [12] A. Pramanik, L.C. Zhang, and J.A. Arsecularatne, Prediction of Cutting Forces in Machining of Metal Matrix Composites, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, (2006), pp. 1795–1803.
- [13] S. Chinchankar, and S. K. Choudhury, Characteristic of Wear, Force and their Inter-relationship: In-process Monitoring of Tool within Different Phases of the Tool Life, *Procedia Materials Science*, Vol. 5, (2014), pp. 1424–1433.
- [14] V. A. Balogun, I. F. Edem, and P. T. Mativenga, Specific Energy Based Characterization of Tool Wear in Mechanical Machining Processes, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 6, No. 5, (2015), pp.1674–1680.
- [15] H. Shao, H. L. Wang, and X. M. Zhao, A Cutting Power Model for Tool Wear Monitoring in Milling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, No. 14, (2004), pp.1503–1509.
- [16] T. Gutowski, J. Dahmus, and A. Thiriez, Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes, *Proceeding of 13th CIRP International Conference of Life Cycle Engineering*, (2016), pp. 5–11.
- [17] T. Gutowski, The Carbon and Energy Intensity of Manufacturing, *Proceeding of 40th CIRP International Manufacturing Systems Seminar*, (2007), pp. 1–6.
- [18] T. G. Gutowski, M. S. Branham, J. B. Dahmus, A. J. Jones, A. Thiriez, and D. P. Sekulic, Thermodynamic Analysis of Resources Used in Manufacturing Processes, *Environmental Science and Technology*, Vol. 43, No. 5, (2009), pp. 1584–1590.
- [19] M. S. Branham, and T. Gutowski, Deconstructing Energy Use in Microelectronics Manufacturing: An Experimental Case Study of a MEMS Fabrication Facility, *Environmental Science and Technology*, Vol. 44, (2010), pp. 4295–4301.

- [20] W. Li, and S. Kara, An Empirical Model for Predicting Energy Consumption of Manufacturing Processes: A Case of Turning Process, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 225, No. 9, (2011), pp. 1636–1646.
- [21] S. Kara, and W. Li, Unit Process Energy Consumption Models for Material Removal Processes, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 60, No. 1, (2011), pp. 37–40.
- [22] L. Li, J. Yan, and Z. Xing, Energy Requirements Evaluation of Milling Machines Based on Thermal Equilibrium and Empirical Modeling, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 52, (2013), pp. 113–121.
- [23] N. Diaz, K. Ninomiya, J. Noble, and D. Dornfeld, Environmental Impact Characterization of Milling and Implications for Potential Energy Savings in Industry, *Procedia CIRP*, Vol. 1, No. 1, (2012), pp. 518–523.
- [24] N. Diaz, and D. Dornfeld, Cost and Energy Consumption Optimization of Product Manufacture in a Flexible Manufacturing System, *Proceeding of 19th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, (2012), pp. 411–416.
- [25] H. Budinoff, R. Bhinge, and D. Dornfeld, A Material-General Energy Prediction Model for Milling Machine Tools, *Proceedings of 2016 International Symposium on Flexible Automation*, (2016), pp. 161–164.
- [26] 寒川哲夫, 諏訪晴彦, エコマシニングのための電力・切削力計測システムの開発と消費電力予測, 第 58 回自動制御連合講演会 (CD-ROM), Vol. 58, No. 1E2-3, (2015), pp. 1–4.
- [27] T. Samukawa, and H. Suwa, Development of Heterogeneous Measurement System for Predicting Power Consumption in Eco-Machining, *Proceedings of 2016 International Symposium on Flexible Automation*, (2016), pp. 413–419.

- [28] N. Diaz, E. Redelsheimer, and D. Dornfeld, Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tool Use, *Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, (2011), pp. 263–267.

第 6 章 送り駆動系消費電力の分析

第 5 章では、エネルギー密度に基づく工作機械の消費電力モデルを構築した [1]。3 軸立形マシニングセンタを用いてアルミニウム合金 A5052 の切削を行い、計測することで得られた切削時消費電力を、材料除去率およびエネルギー密度の 2 軸で表される平面 (MRR-SEC 平面) 上で分析することで、エネルギー密度と材料除去率に相関があることを明らかにした。そして、この関係に対して累乗関数による回帰分析を行った。回帰モデルの予測精度は先行研究 [2] と同様の高さを持つほか、分析対象となるデータ量の多寡による影響が比較的低いことからロバスト性の高さも確認された。しかしながら、対象とした切削条件は X 軸駆動系だけを用いた切削に限られており、より複雑な形状を加工するにあたっては Y 軸駆動系のみならず二つの送り軸駆動系を同時に用いる場合もある。使用する送り駆動系により電力の消費傾向も異なることが先行研究 [3] において報告されており、材料除去率だけが説明変数となる従前の提案モデルでは送り駆動系の違いによる消費電力の変化を反映できない。また、被削材により切削時の負荷の大きさは異なり、工作機械全体の消費電力に影響を及ぼすことがわかっている [4,5]。そのため、被削材の切削性が送り駆動系を介して及ぼす工作機械全体の消費電力への影響を分析した [6]。本章では、その成果について述べる。

6.1 送り駆動系による消費電力

本研究では 3 軸立形マシニングセンタ ROBODRILL α -T14e および ecoMill の 2 種を用いる。各工作機械は 3 つの送り軸駆動系 (X 軸, Y 軸, Z 軸) を持つ。その中でも X 軸および Y 軸駆動系はエンドミル加工や正面フライス加工のような加工において比較的移動対象軸とされることが多いことから、本研究では基礎的検討として X 軸および Y 軸送り駆動系に絞り、消費電力の傾向を分析する。図 4.1 でも示したとおり、マシニングセンタにおいては、NC プログラムを読み込んだ NC 装置から各軸の指令値を送り駆動系が受け取り、サーボモータを駆動させている。このとき、CNC 装置やサーボモータは各送り軸にかかる負荷

を考慮しつつ回転力の調整を適宜行っている。負荷は加工時の切削抵抗のほか、定常的にかかるものとして構造に起因する負荷が考えられる。たとえば、図 6.1 に示すように各送り軸機構が設置されている場所は工作機械によって異なる。図 6.1 (a) では、X 軸送り駆動系は Y 軸送り駆動系の上部に乗る構造となっている。この場合、Y 軸駆動時には X 軸送り駆動系の質量が加わる事になるため、より負荷がかかっている Y 軸送り駆動系の消費電力が X 軸送り駆動系の消費電力よりも大きくなることがわかっている [3]。一方、図 6.1 (b) では Y 軸送り駆動系は主軸部分に備わっており、X 軸送り駆動系の質量の影響は受けない。しかしながら、主軸モータ部は Y 軸送り駆動系と同じユニットに組み込まれており、主軸モータ部の重量が Y 軸駆動時に負荷としてかかっている。このように機械構造により負荷のかかり方が異なるため、同じ工作機械であっても X 軸と Y 軸送り駆動系で電力消費傾向が異なる。そこで、本研究では 2 種の 3 軸立型マシニングセンタを用いて X 軸のみ、Y 軸のみ、および X 軸と Y 軸同時駆動時の消費電力を計測し比較・分析し、電力の傾向を明らかにする。そして、従前研究で提案した消費電力モデルへの相対的影響を分析し、モデル構築のための予備実験においてどのような実験を行うべきか考察する。

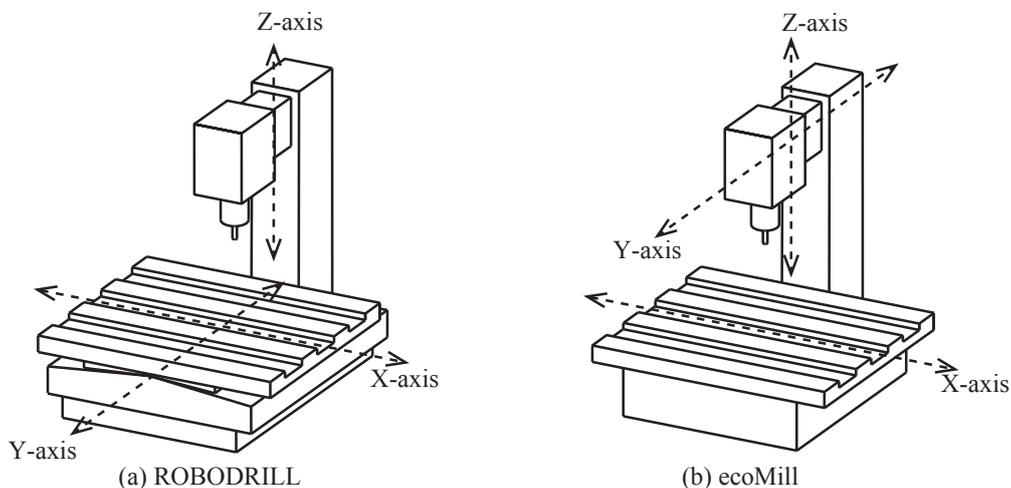


Fig. 6.1: Structure of feed drive system [6].

6.2 計測実験

X 軸および Y 軸送り駆動系消費電力を分析するため、工作機械全体の消費電力を計測した。工具は直径 10 mm, 2 枚刃の TiN コーティングハイスエンドミル (三菱マテリアル) を使用し、切込み幅 10 mm, 切り込み深さ 2 mm の溝入れ加工を行った。被削材は切削性が異なる S45C, A7075, FC250, SK3 および SUS304 の 5 種を用いた。被削材の寸法は $W \times H = 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ であり、厚さは 15 mm から 30 mm の範囲である。本実験では送り軸ごとに消費電力を計測するため、図 6.2 に示すように (i)X 軸のみ、(ii)Y 軸のみ、および (iii)X 軸と Y 軸を同時駆動させる斜め方向の 3 パターンの溝入れ加工を行った。なお、(i), (ii), および (iii) のいずれの場合も使用する送り駆動系以外は同条件となるようにするため、XY 軸同時駆動による切削は、図 6.2(iii) に示すように被削材を固定している治具を 45° 傾けて設置した。各軸の送り速度と主軸回転数は、表 6.1 に示すとおりとした。ただし表 6.1 の値は、被削材の材質に合わせた工具メーカー推奨値を用いた。また、推奨条件の送り速度を 100 % とし、70 %, 80 %, 90 %, 100 %, 110 % および 120 % の 6 パターンを用いて消費電力を計測した。また、切削負荷による消費電力への影響を調べるため、切削負荷がかからない空切削時の消費電力と切削時主軸モータ部の消費電力も同時に計測した。ただし、ecoMill については分電盤内の配線の制約上、主軸モータ部の消費電力は計測できなかった。各消費電力の計測のサンプリングレートは 1sps である。

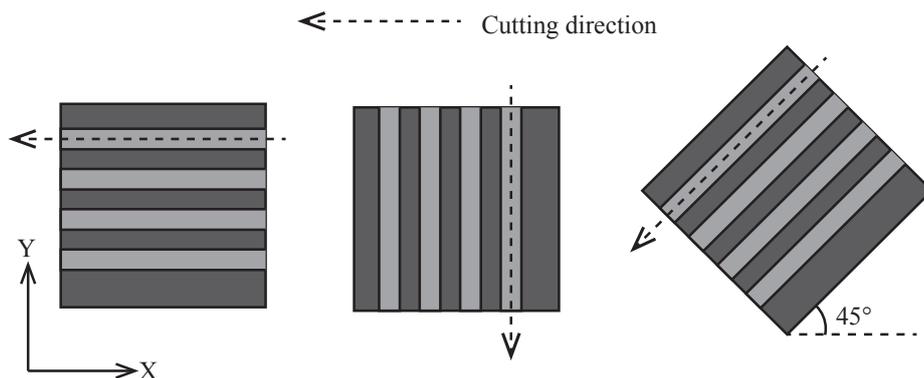


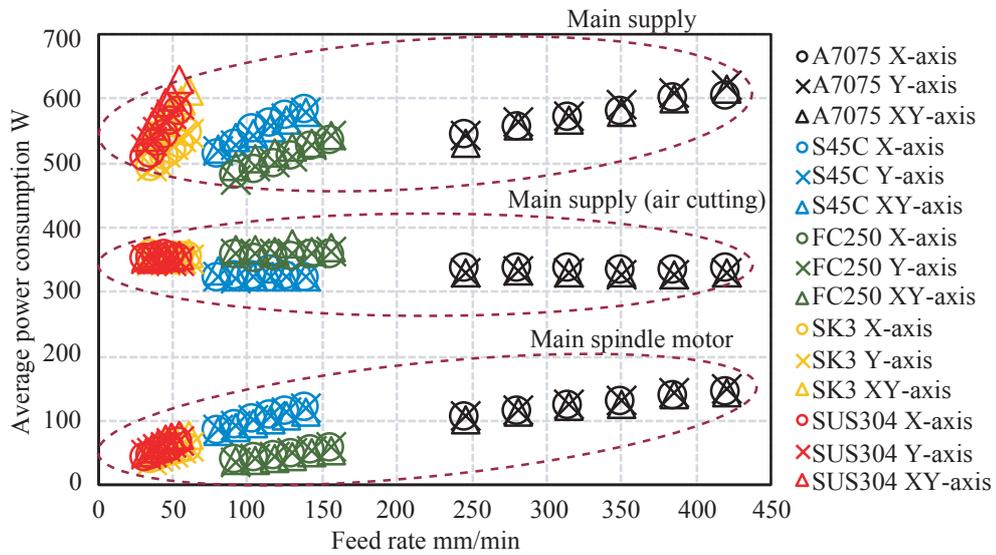
Fig. 6.2: Cutting directions which using respectively or simultaneous with X-axis and Y-axis [1].

Table 6.1: Cutting condition.

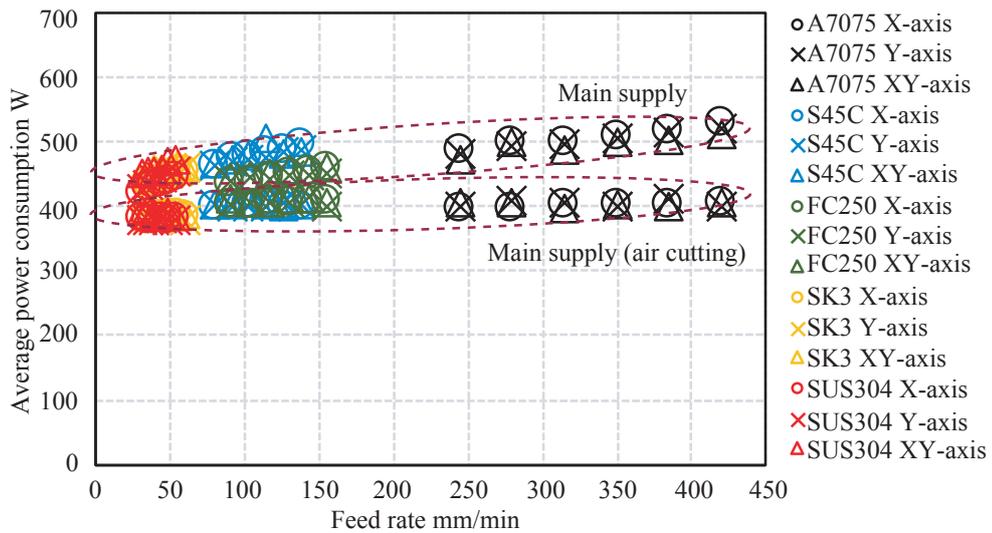
Workpiece	Main spindle rotation [min ⁻¹]	Feed rate[mm/min]					
		70%	80%	90%	100%	110%	120%
A7075	2200	245	280	315	350	385	420
S45C	1000	80	92	103	115	126	138
FC250	840	91	104	117	130	143	156
SK3	560	35	40	45	50	55	60
SUS304	460	31	36	40	45	49	54

ROBODRILL および ecoMill における切削時消費電力の計測結果をそれぞれ図 6.3(a) および図 6.3(b) に示す。図 6.3 中の破線の楕円は工作機械全体の切削時消費電力、主軸モータ部での切削時消費電力、および工作機械全体の空切削時の消費電力の 3 種類の消費電力をグループ化したものである。まず図 6.3(a) の ROBODRILL における切削時工作機械全体の消費電力を見ると全ての被削材において、送り速度の増加に伴い平均消費電力も増大している。各送り軸駆動系の消費電力について各被削材ごとに見ると、S45C を送り度 80 mm/min で切削した時、X 軸のみ駆動時は 512.9 W、XY 軸駆動時は 524.3 W となっている。ここから送り度を 138 mm/min まで増加させた時、X 軸のみ駆動時は 581.9 W、XY 軸駆動時は 578.6 W と、いずれにおいても消費電力の増加分は 69.0 W および 54.3 W と大きな差はない。この傾向は A7075、S45C および FC250 において同様に見られ、X 軸のみ駆動、Y 軸のみ駆動、XY 軸同時駆動のいずれの場合でも送り速度が同じであれば消費電力はほぼ同じである。しかしながら、A7075 や S45C、FC250 に比して切削性が悪いとされる SK3 と SUS304 においては、X 軸のみ駆動時と Y 軸のみ駆動時の切削に比べ、XY 軸同時駆動時の切削時は最も低速の時から消費電力に大きな差がある。たとえば SK3 における送り速度 35 mm/min の時の消費電力は X 軸使用時で 493.1 W、XY 使用時で 542.6 W と、49.5 W の差である。また、送り度の増加にともない消費電力は増大し、送り速度 60 mm/min の時の消費電力は X 軸使用時で 547.1 W、XY 軸使用時で 612.3 W と、その差は 65.2 W である。

空切削時消費電力に注目すると、同じ被削材を対象とした空切削においては X 軸、Y 軸、XY 軸のいずれにおいても消費電力はほぼ横ばいとなっていることがわかる。つまり、切削に直接必要なエネルギーが送り軸の各々を駆動するために消費され、結果として工作機械全体の消費電力に影響を及ぼしているといえる。なお、被削材ごとに消費電力の変化があるのは主に主軸回転数の違いによる影響と見られる。主軸モータ部の切削時消費電力について見ると、全ての被削材で送り速度が大きくなるにつれ切削負荷が増大し、主軸モータ部の消費電力が増大しているものの、使用する送り軸駆動系による増加量の差異はほとんどない。以



(a) ROBO DRILL



(b) ecoMill

Fig. 6.3: Measurement results of In-process power consumption [6].

上のことから、X 軸あるいは Y 軸のみ使用時には切削負荷の影響は小さいが、XY 軸使用時には送り軸に対する切削負荷が消費電力に大きく影響していることがわかった。

以上の傾向は図 6.3(b) の ecoMill における計測結果でも同様に見られた。ただし、ROBO-DRILL において SK3 を送り速度 35 mm/min で切削時には X 軸のみ駆動時と XY 軸同時駆動時で 49.5 W (X 軸駆動時消費電力の 10.0 %) の差があったものの、ecoMill では同条件でもそれぞれ 437.4 W および 446.4 W と 9.0 W (X 軸駆動時消費電力の 2.1 %) の差となってお

り、送り軸に対する切削負荷による消費電力への影響はかなり小さいものとなった。全被削材を対象に工作機械全体の切削時消費電力と空切削時消費電力の差を見ても、ROBODRILL では平均で 202.8 W の差となっているものの ecoMill では平均で 68.7 W の差となっていることから、ecoMill においては切削負荷による消費電力への影響は ROBODRILL に比べて小さいことが確認できる。これは図 6.1 に示したような送り駆動系を含む機械構造の差異から生じる剛性の違いや、送り軸用サーボモータの性能が影響していると考えられる。

6.3 モデル構築における送り駆動系の影響

前節の計測結果により、切削性が悪い被削材を切削するときには各軸送り駆動系による電力消費に大きな差が生じる場合があることがわかった。そこで、従前研究で提案している切削時消費電力モデルにおける送り駆動系による影響を分析するため、実際の消費電力の計測値とモデルによる予測値を比較する。

6.3.1 消費電力モデル

従前研究 [1] で提案した消費電力モデルを基に切削時消費電力を予測する。エンドミル加工による消費電力モデルは全ての被削材における切削時消費電力を材料除去率 (v_c) およびエネルギー密度の観点から回帰分析することで得られ、累乗関数の形で表される。ここでは、第 6.2 節の実験で得られた ROBODRILL の全ての被削材を対象とした工作機械全体の切削時消費電力計測結果から使用した送り駆動系ごとに以下の消費電力 \dot{E} モデルを構築した。

- ▷ X 軸駆動時の切削時消費電力をもとにした X 軸消費電力モデル (以下, X 軸モデル)

$$\dot{E} = 460.51v_m^{0.044} \quad (6.1)$$

- ▷ Y 軸駆動時の切削時消費電力をもとにした Y 軸消費電力モデル (以下, Y 軸モデル)

$$\dot{E} = 465.64v_m^{0.046} \quad (6.2)$$

- ▷ XY 軸同時駆動時の切削時消費電力をもとにした XY 軸消費電力モデル (以下, XY 軸モデル)

$$\dot{E} = 554.38v_m^{0.003} \quad (6.3)$$

- ▷ X 軸, Y 軸, XY 軸同時駆動時のそれぞれの切削時消費電力全てをもとにした XY 軸消費電力モデル (以下, ALL モデル)

$$\dot{E} = 256.66v_m^{0.213} \quad (6.4)$$

これらのモデルを用いて, 消費電力を予測し, 計測値と比較する.

6.3.2 予測結果と予測精度

比較対象は, 6.2 節の実験における各被削材を 100%の送り速度を用いて切削したときの平均消費電力である. 各送り駆動系を用いた切削時消費電力の計測値 (切削 (X), 切削 (Y), 切削 (XY)) と, 式 (6.1), 式 (6.2), 式 (6.3) および式 (6.4) で表される消費電力モデルを用いた予測値, そして予測精度 (予測値に対する計測値の相対誤差) を表 6.2 に示す. X 軸モデルおよび Y 軸モデルによる消費電力予測の結果は, いずれの被削材においても X 軸使用時消費電力および Y 軸使用時消費電力に対し 91.47 %以上の予測精度となった. XY 軸消費電力については比較的切削性が良いとされる A7075, S45C および FC250 では 94.81 %以上の予測精度がみられるが, 比較的切削性が悪い SK3 および SUS304 では 85.04 %から 88.58 %と他の被削材に比べて低い予測精度となった. 6.2 節でも触れたように, A7075, S45C および FC250 では X 軸あるいは Y 軸のみ使用時の消費電力と, XY 軸使用時消費電力に大きな差がなく, 最大でも FC250 の Y 軸使用時消費電力と XY 使用時消費電力における 16.2 W の差であるのに対し, SK3 では 92.8 W, SUS304 では 49.7 W の差が X 軸使用時消費電力と XY 使用時消費電力の間に生じていることが影響していると考えられる. 次に XY 軸モデルによる消費電力予測結果をみると, いずれの被削材においても X 軸使用時消費電力や Y 軸使用時消費電力に対して 90.02 %以上の予測精度を持つのみならず, XY 軸使用時消費電力に対しても 92.30 %から 99.73 %と高い予測精度となった. XY 軸モデル式 (6.3) では冪指数が 0.003 となっており, 材料除去率 v_m の値が消費電力予測値に対してほとんど影響を及ぼさないため, 予測値は被削材が変わっても 558.9 W から 562.4 W の間に収まっている. このことが, 本実験下における比較的高い予測精度につながったと考えられる. ALL モデルによる消費電力予測結果についてみると, S45C に対しては 99.24 %以上と非常に高い予測精度となっている. しかしながら, A7075, SK3, SUS304 では 76.05 %から 89.28 %の予測精度となっており, 他の予測モデルに比べて低い予測精度となった. ALL モデル式 (6.4) の冪指数

は 0.213 であり，他のモデルの冪指数 (0.003 から 0.046) と比べ大きな値となっている．そのため，材料除去率の大きさによって消費電力予測値が大きく変動し，SUS304($v_m = 14.6$) では 454.4 W，A7075($v_m = 117.6$) では 708.6 W と計測値と大きく離れた値がでた．

以上の結果より，相対的に切削性の良いとされる被削材で X 軸および Y 軸送り駆動系のみ使用する切削の場合においては X 軸あるいは Y 軸駆動時の切削時消費電力のどちらか一方をベースに消費電力モデルを構築すればよいといえる．一方で，XY 軸を同時に使う切削や，相対的に切削性の悪い被削材に対しては XY 軸モデルによる消費電力予測が望ましいことがわかった．しかしながら，より精緻に予測するには被削材の特性（切削性）を考慮した新たなモデル構築手法の検討が必要である．

Table 6.2: Measured and estimated average power consumption.

Workpiece	Cutting type	Measured power[W]	Estimated power[W]			Accuracy of Prediction η (%)			
			X model	Y model	XY model	X model	Y model	XY model	ALL model
A7075	X	580.4				97.86	99.89	96.90	77.91
	Y	592.2	568.0	579.8	562.4	95.90	97.90	94.97	80.34
	XY	580.0				97.92	99.96	96.96	77.82
S45C	X	559.0				96.74	98.53	99.73	99.91
	Y	556.6	540.8	550.8	560.5	97.16	98.96	99.30	99.66
	XY	562.8				96.09	97.87	99.59	99.24
FC250	X	510.1				93.52	91.53	90.08	88.10
	Y	509.8	543.2	553.3	560.7	93.46	91.47	90.02	88.03
	XY	526.0				96.74	94.81	93.41	91.48
SK3	X	521.6				99.85	98.47	92.81	89.28
	Y	530.5	520.8	529.6	559.1	98.17	99.83	94.61	87.79
	XY	612.4				85.04	86.48	92.30	76.05
SUS304	X	544.9				95.09	96.66	97.43	83.39
	Y	565.3	518.2	526.7	558.9	91.66	93.17	98.86	80.38
	XY	594.6				87.14	88.58	93.99	76.42

6.4 まとめ

本研究では切削時消費電力に対する著者の従前モデルについて、送り駆動系の駆動方式による消費電力への影響を分析した。構造の異なる二つの 3 軸立型マシニングセンタを用いて 5 種の被削材を X 軸のみ駆動、Y 軸のみ駆動、そして XY 軸同時駆動の 3 パターンで切削したところ、以下のことがわかった。

- ▷ 切削性が相対的に良い 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。
- ▷ 切削性が相対的に悪く、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とみられる。

また、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 軸のみまたは Y 軸のみを使用した切削実験から得られたモデルで 91 % から 99 % ほど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。

以上のことから、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。今後は工具の素材や刃数といった切削条件によるものも含め、切削負荷が送り駆動系の消費電力に与える影響を分析する必要がある。

参考文献

- [1] 寒川哲夫, 諏訪晴彦, 切削加工における消費エネルギー密度に基づく切削時消費電力の予測に関する基礎的研究, 精密工学会誌, Vol. 83, No. 4, (2017), pp. 367–374.
- [2] N. Diaz, S. Choi, M. Helu, Y. Chen, S. Jayanathan, and Y. Yasui, Machine Tool Design and Operation Strategies for Green Manufacturing, *Proceeding of 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting*, (2010), pp. 1–6.
- [3] 林晃生, 佐藤隆太, 白瀬敬一, 数値制御工作機械の送り駆動系における消費電力の測定と評価, 精密工学会誌, Vol. 79, No. 10, (2013), pp.930–936.
- [4] H. Suwa, and T. Samukawa, Estimating Power Consumption of Machine Tools Based on Specific Energy Consumption, *Proceedings of the 17th International Machine Tool Engineers Conference (The 17th IMEC) “Abstract of the poster session”*, (2016), pp. 6-7.
- [5] 下元一輝, 寒川哲夫, 諏訪晴彦, 除去体積比消費エネルギーに基づく切削時消費電力の予測モデルの構築 (第 2 報) –正面フライス加工への適用–, 2017 年度精密工学会 春季大会学術講演会講演論文集, (2017), pp. 899–900.
- [6] 寒川哲夫, 下元一輝, 諏訪晴彦, 工作機械の切削時における消費電力モデル –送り駆動系が全体消費電力に及ぼす影響–, 摂南大学 融合科学研究所論文集, Vol. 3, No. 1, (2017), pp. 75–84.

第7章 結論

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を構築した。まず、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ため、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。この立案過程は、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となり、資源制約付きプロジェクトスケジューリング問題（RCPSP）の枠組みで定式化した。ただし、本研究では省エネ効果を期待し、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、生産性の維持と省エネに効果が発揮される。ケーススタディとして、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。

- ▷ 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。
- ▷ 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も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予測するための研究を行った。本論文では、その端緒として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エネルギー密度と材料除去率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、材料除去率を説明変数とした累乗関数の

形をとる。アルミニウム合金の簡単な切削を行い、切削時のマシニングセンタの消費電力を計測し、エネルギー密度と材料除去率の観点から分析した結果、累乗関数によって近似できることがわかった。この近似モデルを根拠とし、材料除去率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、簡易な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。

- ▷ 提案モデルによる予測精度は 90 % から 99 % 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。
- ▷ 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 1 1 種の被削材で 6 6 通りの簡易な切削を行い、消費電力を計測した。そして、エネルギー密度と材料除去率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エネルギー密度は材料除去率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と高い予測精度、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。

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、より新たに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 3 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、次のことがわかった。

- ▷ 切削性が相対的に良い 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。
- ▷ 切削性が相対的に悪く、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。

また、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 軸のみまたは Y 軸のみを使用した切削実験から得られたモデルで 91 % から 99 % ほど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。

以上、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。

謝辞

本論文をまとめるにあたり，終始懇切なご指導およびご鞭撻を賜りました摂南大学工学部 諏訪晴彦教授に心より感謝申し上げます。

ご多忙の中，本論文の審査をお引き受けいただき，ご教示，ご助言をいただいた大阪大学 名誉教授・摂南大学工学部 久保司郎教授，摂南大学工学部 井上雅彦教授に厚く御礼申し上げます。

工作機械について懇切なご教示を賜りました，神戸大学名誉教授・摂南大学名誉教授 森脇俊道教授に謹んで御礼申し上げます。

工作機械の使用にあたり多くの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，釣本聖司技師に深く感謝いたします。

論文執筆にあたり，有益なご助言を頂きました摂南大学工学部 川野常夫教授に厚く御礼申し上げます。

研究途上において多くの助言をいただいた高千穂大学経営学部 森田大輔助教に心から感謝の意を表します。

本研究で共に実験を行い議論を行った諏訪研究室 下元一輝君，日頃さまざまなお世話になった諏訪研究室 坂本壮史君に心より感謝するとともに，今後のご活躍を心よりお祈り申し上げます。

最後に，直接または間接の有無を問わず研究生活に関わって下さったすべての方々に深く感謝し，この場を借りて改めて御礼を述べさせていただきます。ありがとうございました。