

工作機械の切削時における消費電力モデル
— ワイヤ放電加工機と CNC 旋盤への適用 —¹
In-Process Power Consumption Model of Machine Tools
- Application to Wire EDM and CNC Lathes -

寒川哲夫² 摂南大学理工学部
下元一輝 摂南大学理工学部
諏訪晴彦 摂南大学理工学部 機械工学科

SAMUKAWA, Tetsuo Faculty of Science and Engineering, Setsunan University
SHIMOMOTO, Kazuki Faculty of Science and Engineering, Setsunan University
SUWA, Haruhiko Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Science and Engineering, Setsunan University

Abstract

Saving energy consumption in industries has been recognized as one of the critical issues to pursue sustainable manufacturing. It is naturally important not only for the shop-floor control but for the planning phase of manufacturing to predict in-process energy/power consumption of manufacturing processes and systems in order to enhance total reduction of CO₂ emission and electricity consumption. In this paper, we propose a power consumption model through analyzing the in-process power consumption of wire EDM and CNC lathe. The power consumption model is based on the relation between material removable rate and specific energy consumption. Numerical experiments of power consumption prediction demonstrate the high prediction accuracy of our model. The results also indicate that power consumption model can be applicable for various machines and processing methods.

キーワード: 消費電力モデル, ワイヤ放電加工機, CNC 旋盤, エネルギー密度, 材料除去率

Keywords : power consumption model, wire EDM, CNC lathe, specific energy consumption, material removable rate

¹【原稿受付】2018年8月1日, 【掲載決定】2018年10月24日

²【主著者連絡先】寒川 哲夫 摂南大学, 特任技師

e-mail: tetsuo.samukawa@atf.setsunan.ac.jp

〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8, 摂南大学理工学部

1. はじめに

気候変動問題に関する国際的枠組みであるパリ協定の批准により、我が国においても温室効果ガス排出量の削減は急務である。最大のエネルギー消費者である製造業においても、省エネ活動により温室効果ガスの排出量を削減する努力が行われており、ここ10年の間では機械の小型化⁽¹⁾やモーターの制御方式の改良⁽²⁾など、個々の機械や装置に対して改良が行われてきた。そして、ここ5年においては、CPS(Cyber Physical System)に代表されるような、あらゆる集積データを分析および知識化し、それらを生産管理段階で活用することで省エネを目指す研究が活発に行われるようになってきた。たとえば、Liang らによる研究⁽³⁾では、ビッグデータを活用し生産計画を立案することで、省エネと生産性向上を図っている。筆者らも従前研究⁽⁴⁾において、集積された消費電力データをモデル化することにより、生産システム内ピークデマンドを考慮した生産計画立案手法を提案しており、省エネと生産性向上の効果が見られた。しかしながら、これらのような研究から生産管理による省エネ手法が開発されているにも関わらず、生産現場での実用化には至っていないのが現状である。ライフサイクルが短く多品種を扱うような生産現場では意味のあるデータの集積が困難であるほか、新たな製品生産時には過去のデータを活用できないため、生産計画立案に活用できるデータが必ずしも用意できるとは限らないことが、その理由に挙げられる。そこで、筆者らは生産設備による消費電力を予測するため、能率に基づいた消費電力モデルを構築することとした。従前研究⁽⁵⁾では、3軸立形マシニングセンタを対象に加工時消費電力をエネルギー密度(Specific Energy Consumption; SEC)と材料除去率(Material Removal Rate; MRR)の観点から回帰分析し、それらの関係性を用いた消費電力モデルを構築した。そして、3軸立形マシニングセンタにおける加工方法や、機種の違いによる消費電力モデルへの影響を検証した結果、提案モデルにより加工時消費電力が精緻に予測できることがわかった^{(6), (7)}。

しかしながら、実際の生産現場ではマシニングセンタのほかにも、CNC旋盤や放電加工機といった多様な工作機械だけでなくベルトコンベアやマテリアルハンドリングロボットといった運搬装置も運用されており、それらの消費電力をも予測する必要がある。また、生産管理段階で消費電力モデルを使用することを考えると、あらゆる生産設備の消費電力を同じ構造の簡易な消費電力モデルによって見積もることの意義は大きい。そこで本研究では、ワイヤ放電加工機およびCNC旋盤を対象に提案モデルを適用し、その適用性を検証する。これらの機械は構造や加工方法の違いから、加工時のMRRがマシニングセンタとは大幅に異なる。そして、マシニングセンタやCNC旋盤では切削加工が行われるが、ワイヤ放電加工機では放電現象を用いた加工が行われるため、加工原理そのものも異なる。しかしながら、Gutowski らによる研究⁽⁸⁾では、CNC旋盤や放電加工機のみならず、レーザ加工機や、射出成形においてもSECとMRRに相関があることを示している。また、筆者らの提案モデルとは異なるものの、SECとMRRを用いた消費電力モデルを提案しているKara ら⁽⁹⁾やZhao ら⁽¹⁰⁾はCNC旋盤を、Diaz ら⁽¹¹⁾は精密加工機を対象にしている。多様な機械においてSECとMRRの相関関係が確認されていることから、提案モデルの適用性についても期待できる。

2. 消費電力モデル

筆者らの従前研究⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾では、3軸立形マシニングセンタにおける加工時消費電力を切削除去量あたりの消費電力である SEC [J/mm³] および、時間あたりの切削除去量である MRR [mm³/s] の観点から分析した。加工時消費電力を MRR-SEC 平面上にプロットし回帰分析を行ったところ、累乗関数による回帰分析がもっとも良好な当てはまりとなった。この SEC 回帰モデルが、

$$SEC = \alpha MRR^\beta, \quad (1)$$

である。また、消費電力 P [W] は、SEC と MRR の関係性から、

$$P = SEC \times MRR, \quad (2)$$

と表すことができる。式(1)と式(2)より、消費電力モデルは次のようになった。

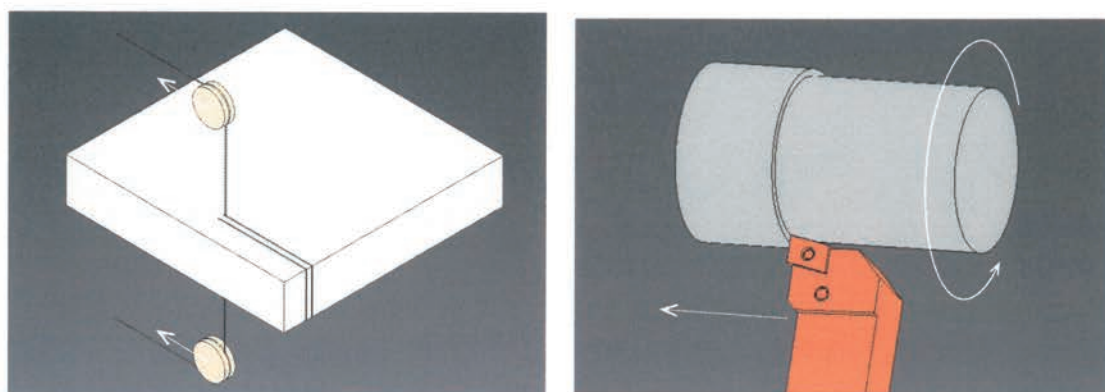
$$P = \alpha MRR^{\beta+1} \quad (3)$$

これらのモデルによる消費電力予測精度は、高い予測精度とロバスト性を持つことが従前研究により明らかになっている。本研究では式(1)の SEC 回帰モデルおよび式(3)の消費電力モデルをワイヤ放電加工機および CNC 旋盤へ適用可能かを検証する。

3. 消費電力の分析とモデルの適用

3-1 対象とする加工

ワイヤ放電加工機は、図 1 (a)のように機械に装着されたワイヤと被削材との間に放電現象を起こすことにより非接触で除去加工を行う機械である。ワイヤを用いることから2次元形状の加工に限定されるが、非接触加工であることから切削が困難な高硬度の金属も導電性があれば加工でき、微細加工や精密加工などに利用されている。CNC 旋盤は旋削加工を行う機械であり、被削材を回転させて工具を接触させることにより除去加工を行う。マシニングセンタと同じく切削による加工を行うが、相対的に MRR が大きい加工で用いられることが多い。本研究では CNC 旋盤における一般的な加工となる、図 1 (b)に示すような外丸削り加工を分析の対象とした。



(a) ワイヤ放電加工

(b) 旋削加工 (外丸削り)

図 1 対象とする加工

3-2 ワイヤ放電加工機

本実験ではROBOCUT α -C400iB (FANUC) を用いて消費電力計測実験を行った。計測箇所はメインブレイカー部であり、イオン発生装置やろ過フィルターといった加工とは直接的に関与しない周辺装置を含む、ワイヤ放電加工機全体の消費電力を計測した。なお、エアーコンプレッサーは外付けのため、ここでの消費電力に含まれてはいない。表 1 は本実験で使用した被削材とその形状および加工条件である。被削材はW100 mm×H100 mmの炭素鋼 S45C を用いた。そして、MRR に応じた消費電力を計測するため、厚さ 10 mm, 20 mm, 30 mm の 3 種類を用意した。また、加工条件が大幅に異なる、厚さ 20 mm の超々ジュラルミン A7075 での計測実験も行った。加工速度、オン時間、オフ時間は、被削材の種類と厚さをワイヤ放電加工機に入力したときに提示される推奨値を用いた。このうち、オン時間とオフ時間は放電パルス電流を付与あるいは停止する時間を表しており、消費エネルギーに影響を及ぼす条件となる。加工精度や除去能率に影響を及ぼすワイヤ電極の張力は、12.7 N とした。ただし、本実験で用いたワイヤ放電加工機 ROBOCUT α -C400iB では、機械に提示された値を選択し加工を行ったとしても、加工状況に応じた補正を随時行うため、必ずしもそのままの値で加工されるわけではないことに注意を要する。EDM ワイヤは直径 0.25 mm の汎用電極線 HBZ-U (日立電線) を用いた。加工は Y 軸方向へ 40 mm の加工である。

図 2 に厚さ 20 mm の S45C を被削材とし、加工開始から加工終了までの消費電力を計測した結果を示す。まず、図 2 における 20 s 時点から実際に加工が行われており、約 4000 W の電力が消費されている。その後、ワイヤ放電加工機の自動補正機能によって出力がコントロールされ、104 s に至るまでに、消費電力は段階的に約 6300 W まで増加した。その後も緩やかに消費電力は増加していき、最大で約 7200 W となった。このように、本実験で用いたワイヤ放電加工機 ROBOCUT α -C400iB は同じ条件で加工を続けているにも関わらず、消費電力は大きく変化する。本研究では各切削条件における平均的な消費電力の振る舞いを分析するため、各加工条件下で 3 回の消費電力計測実験を行い、その平均値を分析に使用することとした。また、加工開始時にしか見られない消費電力の大きな変化がある区間 (例えば、図 2 における 0 s から 104 s 時点まで) は、分析の対象外とした。このようにして計測された消費電力と、加工によって除去された体積から SEC を算出した。なお、MRR はより精緻な分析を行うため、実加工時間と除去体積から算出した値を用いた。除去体積は、放電ギャップを考慮するため、ワイヤ径ではなく計測された平均加工幅と被削材の厚さに基づいて算出された。

表 1 ワイヤ放電加工における被削材と加工条件

被削材	厚さ[mm]	加工速度[mm/min]	オン時間[μ s]	オフ時間[μ s]
S45C	10	9.36	10.0	19.2
	20	5.20	12.0	18.0
	30	4.32	12.0	13.2
A7075	20	18.10	10.0	13.0

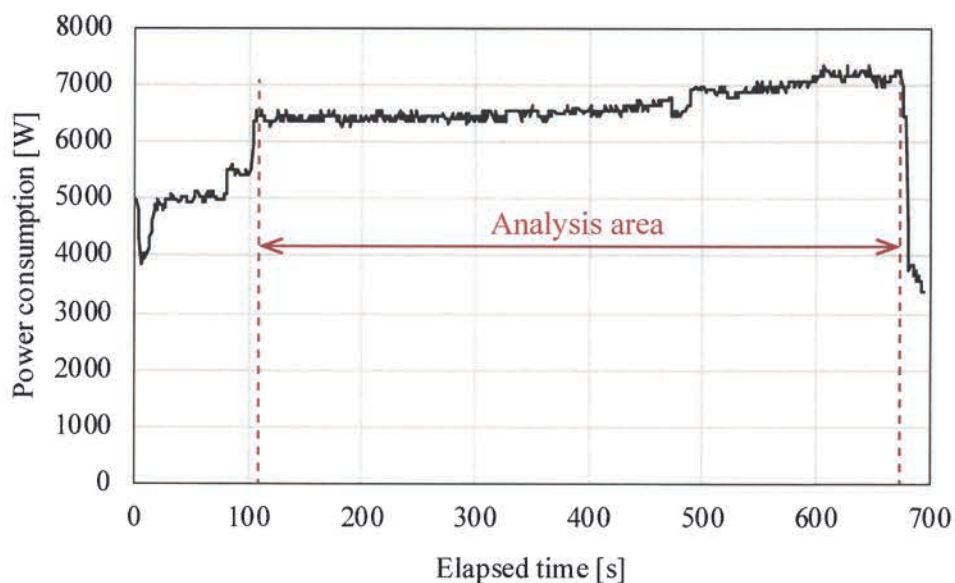


図 2 放電加工機における S45C (厚さ 20 mm) 加工時消費電力と分析区間

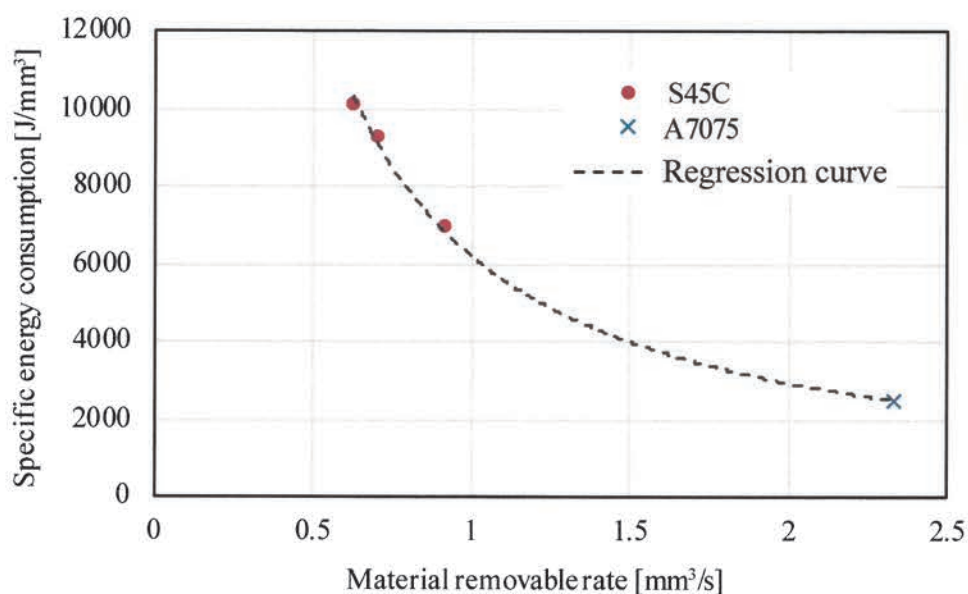


図 3 放電加工機における消費電力計測結果 (MRR-SEC 平面)

図 3 に MRR-SEC 平面上にプロットした消費電力計測結果を示す。まず S45C についてみると、MRR が低いものから順に厚さ 10 mm, 20 mm および 30 mm の被削材を加工したときの消費電力となっており、MRR の増加に合わせて SEC は減少傾向にある。これは A7075 での計測結果とあわせても同様に、MRR の増加が SEC の減少につながっている。これら 4 つの計測結果に対し、累乗関数によ

の回帰分析を行ったところ図 3 中の破線で示すとおりとなり、ワイヤ放電加工機における SEC 回帰モデルは次のようになった。

$$SEC = 6204.2 \times MRR^{-1.079} \quad (4)$$

SEC 回帰モデルのあてはまりは非常に良く、このときの決定係数 R^2 値は 1.00 となった。また、ワイヤ放電加工機の消費電力モデルは式(2)および式(4)から、

$$P = 6204.2 \times MRR^{-0.079}, \quad (5)$$

となった。消費電力モデルにおける冪指数は 0 に極めて近いことから、本実験で使用したワイヤ放電加工機においては MRR が消費電力に及ぼす影響は小さいといえる。

次に、式(5)で提案した消費電力モデルの予測精度を検証するため、計測実験と同じ条件で消費電力を予測した結果が表 2 である。なお、予測精度(η)は消費電力の実測値(\tilde{e})と予測値(e)を用いて、

$$\eta = \left(1 - \left| \frac{\tilde{e} - e}{\tilde{e}} \right| \right) \times 100 (\%), \quad (6)$$

と定義した。表 2 の予測精度を見ると、97.6%から 99.5%の間におさまっている。この結果から、従前研究で用いたマシニングセンタとは MRR や SEC が大幅に異なるワイヤ放電加工機においても、提案モデルが適用可能であるといえる。

表 2 ワイヤ放電加工機の消費電力予測結果

被削材	厚さ [mm]	消費電力 [W]		予測精度 [%]
		予測値	実測値の平均	
S45C	10	6441.0	6289.6	97.6
	20	6380.1	6503.3	98.1
	30	6250.9	6311.0	99.0
A7075	20	5803.2	5775.6	99.5

3-3 CNC 旋盤

次に、CNC 旋盤への提案モデルの適用を考える。本研究では Dura Turn 2550(DMG 森精機)を用いて外丸削り時の消費電力を計測および分析した。旋削用チップは汎用チップ CNGG120408R-AX(住友電気ハードメタル)を用いた。被削材は $\phi 60$ mm、長さ 100 mm の丸棒アルミニウム合金 A5052 を用いた。切り込み深さ 0.5 mm、切削幅 65 mm とし、 $\phi 50$ mm になるまで加工を行った。主軸 1 回転あたりの送り量は 0.15 mm/rev に設定した。切削速度は 200 m/min から 40 m/min ずつ増加させ 360 m/min までで計 5 パターンを用意した。なお、旋削加工においては切削速度を一定に保つために、被削材の直径に合わせた主軸回転数が CNC 旋盤により自動的に設定される。このときの主軸回転数(n)は、被削材の直径(D)と切削速度(v_c)を用いて次の式で算出できる。

$$n = \frac{v_c \times 1000}{D \times \pi} \quad (7)$$

CNC 旋盤における MRR は切削速度と切り込み深さから計算でき、主軸回転数による消費電力への影響は提案モデルの構造上受けないと考えられる。しかしながら、実際には主軸回転数の違いによる

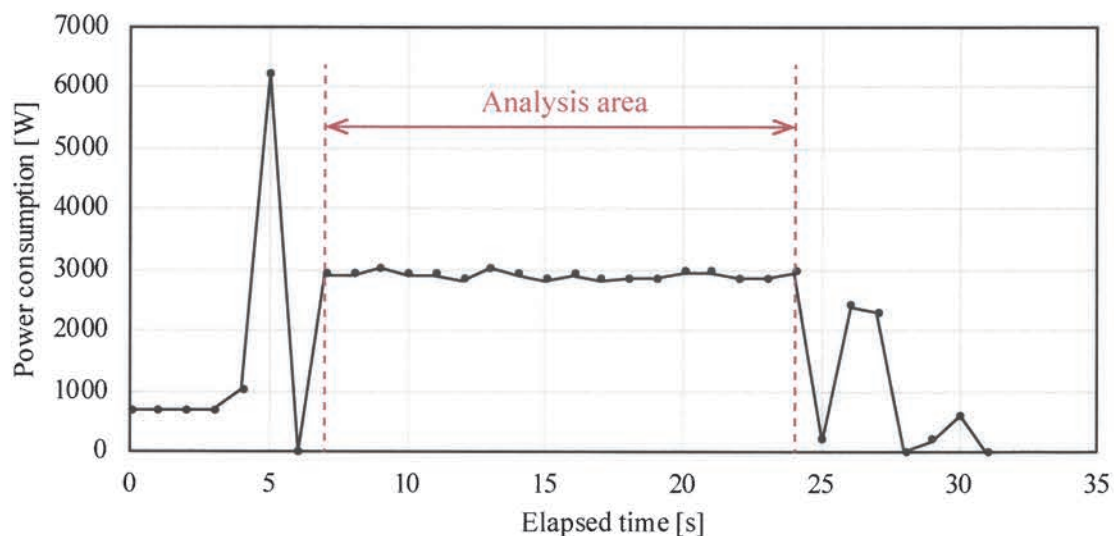


図 4 CNC 旋盤における A5052 加工時消費電力 ($\phi 57\text{mm}$, 切削速度 240 m/min) と分析区間

消費電力への影響がわずかにあると考えられる。そこで、主軸回転数の変化も考慮し、計 50 パターンの切削時消費電力を計測した。なお、本機もエアコンプレッサは外付けのため、エアコンプレッサにおける消費電力は計測値に含まれていない。

例として直径 $\phi 57\text{ mm}$ 、切削速度 240 m/min での消費電力計測結果を図 4 に示す。図 4 の 4 s で主軸が回転しはじめ、7 s から切削が行われている。そして 24 s で加工が終了し、その後はスピンドルの停止などが行われている。なお、6 s および 28 s 時点で消費電力は 0 W となっているが、これは回生電力によるものである。本研究では、実際に加工が行われている区間 (図 4 では 6 s から 24 s の間) を分析区間とした。

図 5 に全 50 パターンの消費電力計測結果を MRR-SEC 平面上にプロットしたものを示す。図 5 中での MRR や SEC は、図 3 中のそれらとスケールが大幅に異なることに注意を要する。なお、図 5 におけるマーカーの色は切削速度を、ひし形等の形状は加工前の直径をそれぞれ示している。破線部は後述する全データを対象とした累乗関数による回帰曲線である。まず、切削速度ごとの消費電力についてみる。いずれの切削速度においても、MRR の増加にしたがって SEC は減少する傾向がわずかにみられる。しかしながら、累乗関数による回帰分析結果では当てはまりが悪く、決定係数 R^2 値は 0.12 から 0.78 の間に収まった。なお、CNC 旋盤に入力した加工プログラムどおりの切削速度で切削が行われている場合、計算上は切削速度ごとの MRR は一致する。図中において MRR に差が生じているのは、計測間隔が 1 秒ごとであることに加え、切削負荷を受けての送り速度および主軸回転数の低下による影響を受けてのものである。

次に、被削材の直径ごとに消費電力の傾向をみる。ここでも MRR の増加に伴い SEC が減少している傾向が見られるため、累乗関数による回帰分析を行ったところ、表 3 のよう

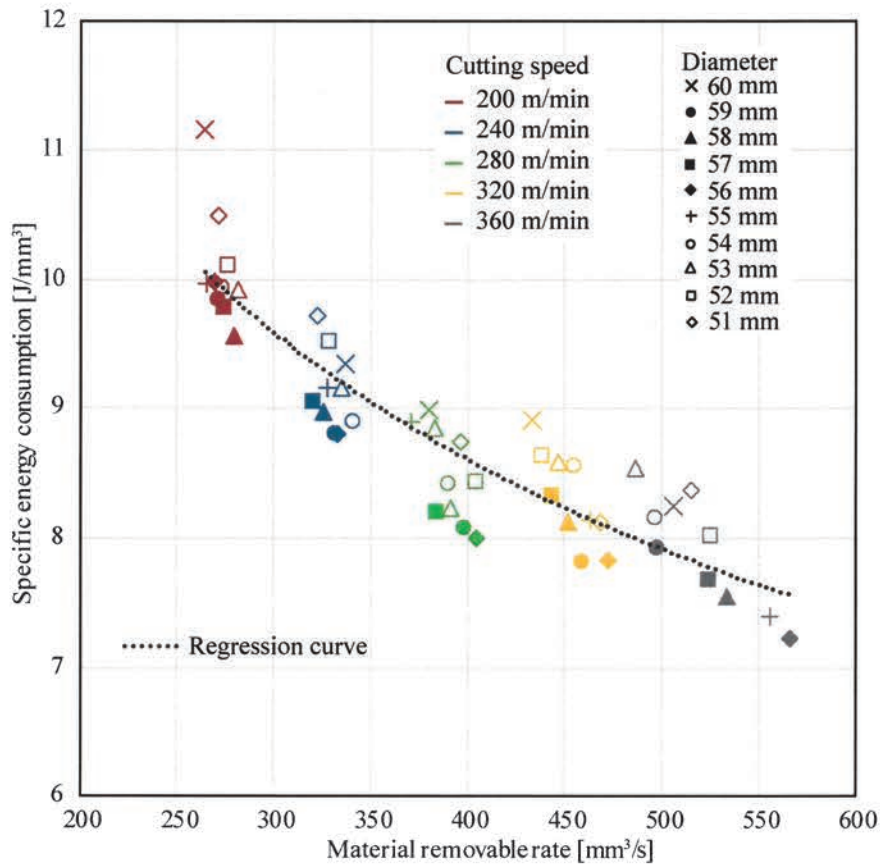


図 5 CNC 旋盤における消費電力計測結果 (MRR-SEC 平面)

表 3 CNC 旋盤における消費電力の回帰分析結果

被削材の直径 [mm]	SEC 回帰モデル	決定係数 R^2 値
60	$SEC = 121.652MRR^{-0.434}$	0.92
59	$SEC = 78.981MRR^{-0.376}$	0.92
58	$SEC = 70.149MRR^{-0.355}$	0.98
57	$SEC = 69.813MRR^{-0.353}$	0.93
56	$SEC = 102.877MRR^{-0.421}$	0.97
55	$SEC = 89.072MRR^{-0.392}$	0.99
54	$SEC = 52.764MRR^{-0.302}$	0.88
53	$SEC = 44.721MRR^{-0.270}$	0.93
52	$SEC = 78.756MRR^{-0.366}$	0.95
51	$SEC = 93.176MRR^{-0.392}$	0.94
全て	$SEC = 81.812MRR^{-0.376}$	0.84

な SEC 回帰モデルと決定係数 R^2 値が得られた。また、全データを対象として累乗関数による回帰分析を行った結果も同じく表 3 に示す。まず、被削材の径ごとの SEC 回帰モデルについてみると、説明変数（式(1)における α ）は 44.721 から 121.652 となっており、ワイヤ放電加工における SEC 回帰モデル（式(4)）の 6204.2 と比べると大きな差があることがわかる。一方で、冪指数（式(1)における β ）についてみると、CNC 旋盤では-0.270 から-0.421 の間をとっている。つまり、ワイヤ放電加工と比べ、MRR による消費電力の影響は相対的に大きいといえる。しかしながら、このような違いがありながらも、決定係数 R^2 値についてみると 0.88 から 0.99 となっており、モデルの当てはまりの良さが伺える。消費電力の特徴が異なる機械を対象としても、提案モデルの適用性は高いことを示している。また、直径ごとの分析による当てはまりが良好であることは、回転数に応じた消費電力モデルの構築が予測精度の向上につながることを示している。

最後に、CNC 旋盤における全ての計測値に対して回帰分析を行った結果についてみると、決定係数 R^2 値は 0.84 となっており、直径ごとの分析には劣るものの、当てはまりは良いといえる。このときの回帰曲線は図 5 の破線で示したとおりであり、見た目にも当てはまりのよさが伺える。そこで、全データから分析された SEC 回帰モデルを基にした消費電力モデル、

$$P = 81.812 \times \text{MRR}^{0.624}, \quad (8)$$

を用いて、今回行った全ての切削条件で消費電力を予測した。例として、(i) $\phi 60$ mm, 切削速度 240 m/min, (ii) $\phi 55$ mm, 切削速度 280 m/min, (iii) $\phi 51$ mm, 切削速度 320 m/min における加工時消費電力を予測した結果および、式(6)による予測精度について表 4 に示す。予測精度についてみると、いずれの直径においても 98.0%以上と高い値となっていることがわかる。また、表 4 に示した以外の直径においても予測精度を計算したところ、平均で 97.0%となった。全てのデータを基としたモデルで十分に高い予測精度を持つといえる。以上より、提案モデルは CNC 旋盤にも適用可能であることがわかった。

表 4 CNC 旋盤の消費電力予測結果

条件	直径 [mm]	切削速度 [mm/min]	消費電力 [W]		予測精度 [%]
			予測値	実測値の平均	
(i)	60	240	3092.6	3154.6	98.0
(ii)	55	280	3280.6	3296.2	99.5
(iii)	51	320	3796.1	3806.5	99.7

4. まとめ

本研究では、SEC と MRR の観点からワイヤ放電加工機および CNC 旋盤の消費電力を分析し、消費電力モデルを構築した。そして、消費電力モデルによる予測精度を検証した。その結果を以下にまとめる。

- ワイヤ放電加工機や CNC 旋盤での加工による MRR や SEC は、マシニングセンタにお

けるそれらとは大きく値が異なるが、加工時消費電力を累乗関数により回帰分析した結果、有意な相関がみられた。

- SEC 回帰モデルに基づき消費電力モデルを構築し、数値実験によりその予測精度を検証したところ、ワイヤ放電加工機では平均 98.6%, CNC 旋盤では平均 97.0%の予測精度が得られた。

以上の結果から、提案モデルはワイヤ放電加工機および CNC 旋盤に適用可能であるといえる。なお、MRR と SEC の関係性から消費電力を予測する提案モデルの構造上、本研究で分析から除外された区間の消費電力については、異なる見積もり方法が必要である。

今後は、産業ロボットや運搬装置などの加工を行わない（MRR が存在しない）機械において、移動した空間の体積を MRR に見立てるなどにより提案モデルを適用可能か検証する。あらゆる生産設備の消費電力を提案モデルのように簡易な構造の消費電力モデルで予測できれば、生産管理段階における省エネ手法の実用化に向けた一助となる。

謝辞

本研究における実験は、摂南大学工学部機械工学科卒業生である多田颯悟氏、八田侑亮氏、小寺悠斗氏、福留寛人氏の卒業研究として実施されたものである。また、実験にあたりご助言を賜った摂南大学テクノセンターの長谷川淳技師、桑田寿基技師に感謝の意を表す。

参考文献

- (1) T. Ogawa, “Building of Efficient, Energy-Saving Lines with an Extremely-Compact Machining Center and CNC Lathe”, *International Journal of Automation Technology*, 4-2(2010), pp. 150-154.
- (2) Mori, M., Fujishima, M., Inamasu, Y., and Oda, Y., “A study on energy efficiency improvement for machine tools”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(2011), pp. 145-148.
- (3) Liang, Y.C., Lu, X., Li, W.D., and Wang, S., “Cyber Physical System and Big Data enabled energy efficient machining optimisation”, *Journal of Cleaner Production*, 187(2018), pp.46-62.
- (4) Samukawa, T., and Suwa, H., “An optimization of energy-efficiency in machining manufacturing systems based on a framework of multi-mode RCPSP”, *International Journal of Automation Technology*, 10-6(2016), pp. 985-992.
- (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, 83-4(2017), pp. 367-374.
- (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, 3-1(2017), pp. 75-84.
- (7) Samukawa, T., Shimomoto, K., and Suwa, H., “Capability of in-process specific energy consumption model in face milling”, *Proceeding of International Symposium on Flexible Automation 2018*, ISFA2018-S044(2018), pp.1-4.
- (8) Gutowski, T., Dahmus, J., and Thiriez, A., *Electrical Energy Requirements for Manufacturing*

Processes, *Proceeding of 13th CIRP International Conference of Life Cycle Engineering*, (2006), pp. 1-5.

- (9) Kara, S., and Li, W., Unit process energy consumption models for material removal processes, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60 (2011), pp. 37-40.
- (10) Zhao, G., Hou, C., Qiao, J., and Cheng. X., “Energy consumption characteristics evaluation method in turning”, *Advances in Mechanical Engineering*, 8-11(2016), pp. 1-8.
- (11) Diaz, N., Redelsheimer, E., and Dornfeld, D., “Energy consumption characterization and reduction strategies for milling machine tool use”, *Glocalized solutions for sustainability in manufacturing*, Springer, (2011), pp. 263-267.