

## 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 —<sup>1</sup>

### In-Process Power Consumption Model of Machine Tools - The Effects of Feed Drive System on Whole Power Consumption -

寒川哲夫<sup>2</sup> 摂南大学理工学部  
下元一輝 摂南大学大学院 理工学研究科 生産開発工学専攻  
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 Division of Industrial Development Engineering,  
Graduate School of Setsunan University  
SUWA, Haruhiko Department of Mechanical Engineering,  
Faculty of Science and Engineering, Setsunan University

#### Abstract

This paper deals with modeling of power consumption in material removal process by a 3-axis vertical machining center, and focuses on the effect of power consumption at the feed drive system on the whole consumed energy of the machining center. A series of cutting experiments was conducted to observe power consumption at the feed drive system, in which three different patterns of end milling with the feed drive unit of X-axis, Y-axis, or XY-axes were considered. Through the experiments, power consumptions of the whole machine tool, at the spindle motor unit, and also during air cutting were measured and compared to evaluate the energy-efficiency invoked by the use of feed drive unit. Based on the results of the analysis, the power consumption model was built, and then its predicting performance and applicability were demonstrated by the cutting experiments.

キーワード: 工作機械, 消費電力モデル, 送り駆動系, 回帰分析

**Keywords** : machine tools, power consumption model, feed drive system, regression analysis

<sup>1</sup> 【原稿受付】 2017年8月1日, 【掲載決定】 2017年9月15日

<sup>2</sup> 【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

環境負荷の低減は製造業において大きな課題であり、これまでに生産システムを構成する様々な要素において省エネ技術の開発が進められてきた<sup>(1),(2)</sup>。その一方で、近年では industry 4.0 におけるスマートな工場への取り組みや情報層と実システムを融合する CPS (Cyber-Physical System) に見られるように、生産現場のさまざまな情報を容易に集積・分析することが可能となってきたことから、生産システムのような大きな枠組みでのエネルギー高効率利用を目指す研究が活発となっている。筆者らの従前研究<sup>(3)</sup>では、生産システムの管理段階からエネルギーの高効率利用を目指し、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いる。このような手法においては、生産システム内の個々の機器における消費電力を精緻に簡単なモデルで見積もることが肝要である。主たる生産設備といえるマシニングセンタについて見ると、消費電力モデルに関する研究は多く見られる。その中でも除去体積比消費エネルギー (Specific Energy Consumption; SEC) と除去能率 (Material Removal Rate; MRR) を用いた Gutowski et al.<sup>(4)</sup>による熱力学的アプローチをもととした消費電力モデルと、それを発展させた Diaz et al.<sup>(5)</sup>や Kara et al.<sup>(6)</sup>による消費電力モデルが簡易性と予測精度の高さから、多くの文献(たとえば、文献<sup>(7)-(9)</sup>など)で取り上げられている。また Guo et al.<sup>(10)</sup>や Velchev et al.<sup>(11)</sup>も SEC と MRR の関係性を利用しつつも説明変数を増やすことで異なる形でのモデルを提案している。ただし、これら SEC と MRR に基づくモデルは高い予測精度を持つ一方で、物理的根拠が明白になっていないほか、細かな加工条件の変化に対する議論が尽くされたとはいえず、現在でも研究が進められている。

以上の背景の下、筆者らは従前研究において工作機械における新たな切削時消費電力モデルを構築した<sup>(12)</sup>。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、MRR-SEC 平面上で分析することで、SEC と MRR 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<sup>(6)</sup>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、従前研究では 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<sup>(13)</sup>において報告されており、MRR 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<sup>(14),(15)</sup>。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する。本研究では、3軸立形マシニングセンタにおいて、X 軸だけでなく Y 軸を用いた切削を複数種の被削材に対し行い、電力消費傾向を分析する。そのうえで、送り駆動系による消費電力モデルへの相対的影響についても考察する。



## 2. 工作機械における送り駆動系

本研究では3軸立型マシニングセンタ ROBODRILL  $\alpha$ -T14e (FANUC) および ecoMill (DMG 森精機) 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。送り軸駆動系が消費する電力は各送り軸にかかる負荷によって変化する。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<sup>(13)</sup>。一方、図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。

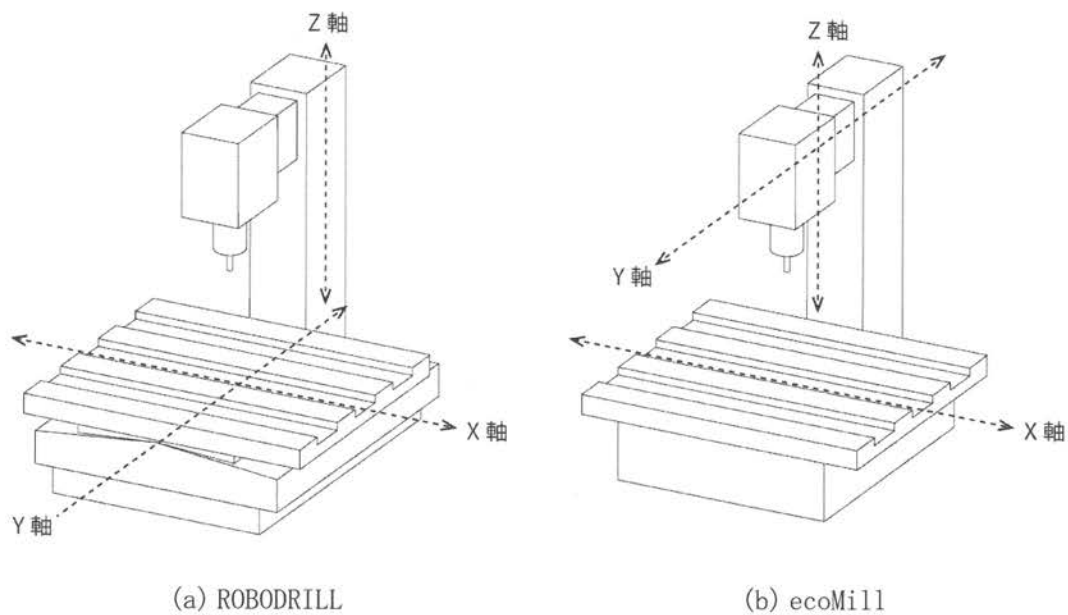


図1 送り駆動系の構造

### 3. 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10mm, 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10mm, 切り込み深さ2mm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15mmから30mm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2(iii)に示すように被削材を固定している治具を $45^\circ$ 傾けて設置した。各軸の送り速度と主軸回転数は, 表1に示すとおりとした。ただし表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。

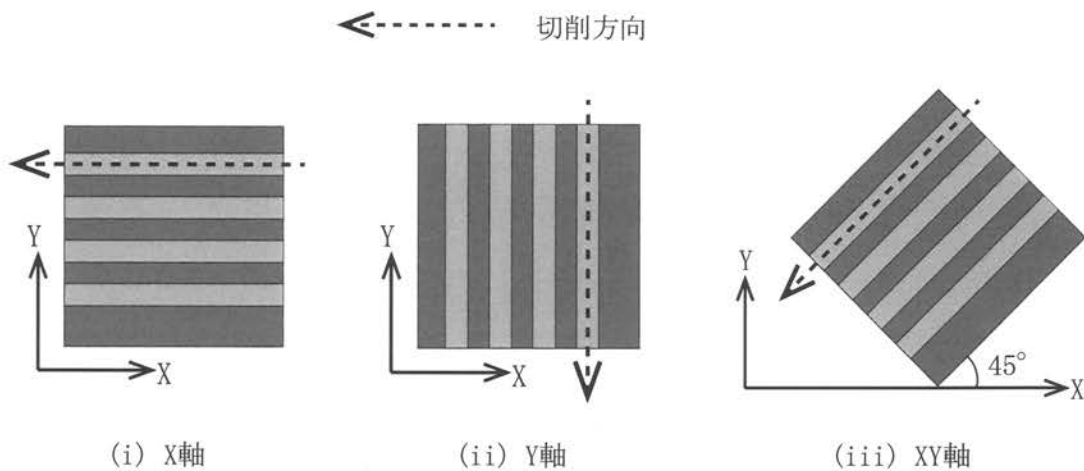
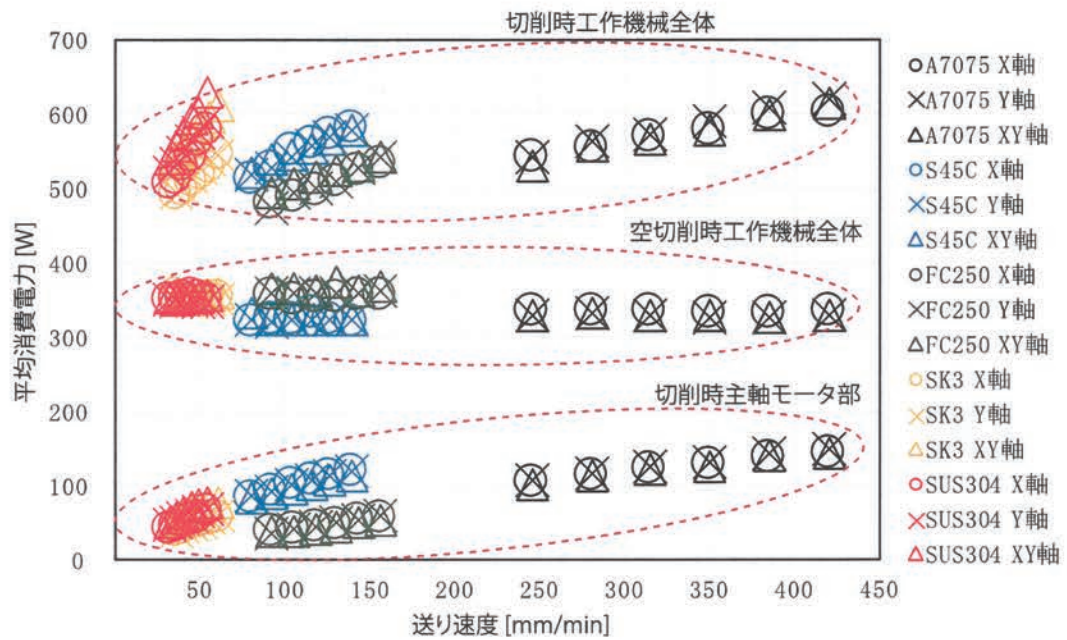


図2 切削方向

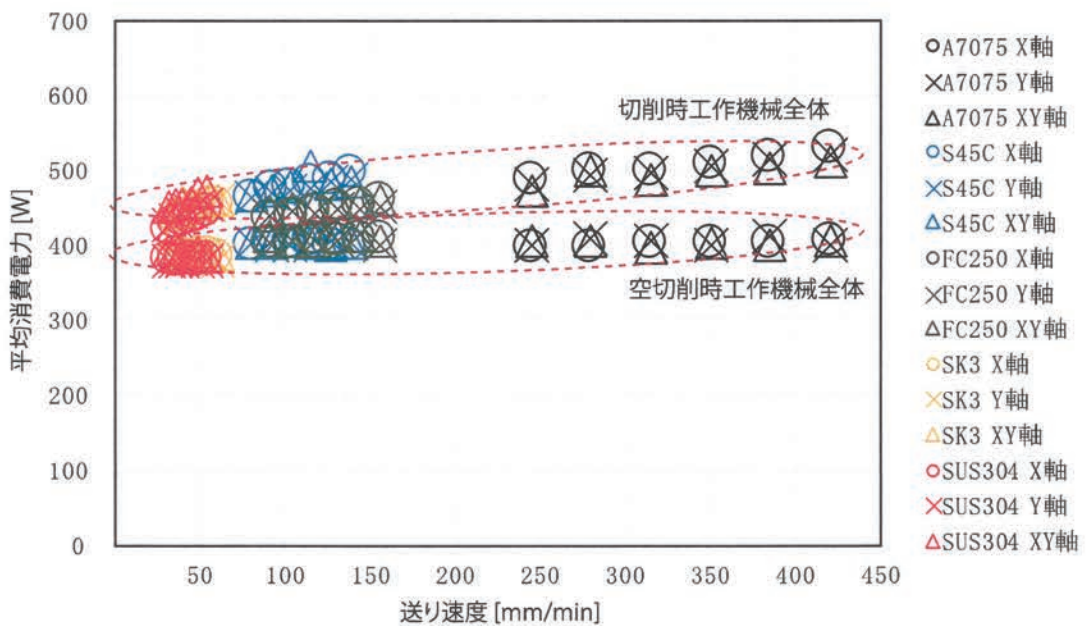
表1 切削条件

被削材	主軸回転数 [ $\text{min}^{-1}$ ]	送り速度[ $\text{mm}/\text{min}$ ]					
		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 3(a)および図 3(b)に示す。図 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 3(a)の ROBODRILL における切削時工作機械全体の消費電力を



(a) ROBODRILL の消費電力計測結果



(b) ecoMill の消費電力計測結果

図 3 消費電力計測結果



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を送り速度80mm/minで切削した時、X軸のみ駆動時は512.9W、XY軸駆動時は524.3Wとなっている。ここから送り速度を138mm/minまで増加させた時、X軸のみ駆動時は581.9W、XY軸駆動時は578.6Wと、いずれにおいても消費電力の増加分は69.0Wおよび54.3W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35mm/minの時の消費電力はX軸使用時で493.1W、XY使用時で542.6Wと、49.5Wの差である。また、送り速度の増加にともない消費電力は増大し、送り速度60mm/minの時の消費電力はX軸使用時で547.1W、XY軸使用時で612.3Wと、その差は65.2W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、使用する送り軸系による増加量の差異はほとんどない。以上のことから、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3(b)のecoMillにおける計測結果でも同様に見られた。ただし、ROBODRILLにおいてSK3を送り速度35mm/minで切削時にはX軸のみ駆動時とXY軸同時駆動時で49.5W(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437.4Wおよび446.4Wと9.0W(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202.8Wの差となっているもののecoMillでは平均で68.7W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。高負荷時にXY軸駆動時消費電力が増加する原因とあわせ、送り駆動系が消費電力の増加にどのように影響しているのかを明らかにするのが今後の課題となる。

#### 4. 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。ここでは、S45C および相対的に切削性が悪い SK3 を対象に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。

#### 4-1 消費電力モデル

従前研究[12]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 MRR ( $v_m$ ) および SEC 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3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)

$$\dot{E} = 460.51v_m^{0.044} \quad (1)$$

- 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)

$$\dot{E} = 465.64v_m^{0.046} \quad (2)$$

- 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)

$$\dot{E} = 554.38v_m^{0.003} \quad (3)$$

これらのモデルを用いて、S45C および SK3 の消費電力を予測し、計測値と比較する。

#### 4-2 予測結果と予測精度

比較対象とした切削条件は第3節の実験における S45C を送り速度 115mm/min で切削したときの平均消費電力と、SK3 を送り速度 50mm/min で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(1)、式(2)および(3)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 2 に示す。S45C 加工時には使用する送り軸が異なっても計測値に大きな差がなく、予測値についても最大で 19.7W の差しかないため、予測精度の結果に大きなばらつきはなく、いずれのモデルを用いても 96.0%を超えている。一方で、SK3 加工時についてみると切削負荷の増大から X 軸の切削では 521.6W, XY 軸の切削では 612.4W と、使用する送り軸によって消費電力の計測値は大きく異なる。予測値を見ると、X 軸モデルや Y 軸モデルでは 8.8W の差があるものの、X 軸のみ駆動および Y 軸のみ駆動の切削時消費電力に対して最低でも 98.5%の予測精度を得ている。一方で、XY 軸同時駆動切削時消費電力について見ると、X 軸モデルと Y 軸モデルではそれぞれ 85.0%と 86.5%の精度、XY 軸モデルを用いた場合には 92.3%の精度となった。以上のことから、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。また、XY 軸同時駆動切削時消費電力に対しては、XY 軸消費電力モデルを構築すると 92%以上の予測精度が得られたが、切削負荷が大きい場合において予測精度の低下が見られたことから、より精緻に予測するには被



表2 消費電力予測結果

被削材	切削加工	計測値 [W]	予測値 [W]			予測精度 [%]		
			X 軸 モデル	Y 軸 モデル	XY 軸 モデル	X 軸 モデル	Y 軸 モデル	XY 軸 モデル
S45C	切削(X)	559.0				96.7	98.5	99.7
	切削(Y)	556.6	540.8	550.8	560.5	97.2	99.0	99.3
	切削(XY)	562.8				96.1	97.9	99.6
SK3	切削(X)	521.6				99.8	98.5	92.8
	切削(Y)	530.5	520.8	529.6	559.1	98.2	99.8	94.6
	切削(XY)	612.4				85.0	86.5	92.3

削材の特性を考慮した新たなモデル構築手法の検討が必要となる。

## 5. 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軸またはY軸の一方のみを用いた切削実験から消費電力モデル構築することで、96%以上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。

#### 参考文献

- (1) Diaz, N., Choi, S., Helu, M., Chen, Y., Jayanathan, S., and Yasui, Y., “Machine Tool Design and Operation Strategies for Green Manufacturing”, *Proceeding of 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting*, (2010).
- (2) Mori, M., Fujishima, M., Inamasuand, Y., and Oda, Y., “A study on energy efficiency improvement for machine tools”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60 (2011), pp. 145-148.
- (3) Samukawa, T., and Suwa, H., “An Optimization of Energy-Efficiency in Machining Manufacturing Systems based on a Framework of Multi-mode RCPS”, *International Journal of Automation Technology*, 10-6(2016), pp. 985-992.
- (4) Gutowski, T., Dahmusand, J., and Thiriez, A., “Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes”, *Proceedings of 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, (2006).
- (5) Diaz-Elsayed, N., and Dornfeld, D., “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.
- (6) Kara, S., and Li, W., “Unit process energy consumption models for material removal processes”, *CIRP Annals - Manufacturing technology*, 60(2011), pp. 37-40.
- (7) Lee, J., Shin, Y., Kim, M., Kim, E., Yoon, H., Kim, S., Yoon, Y., and Ahn, S., “A Simplified Machine-Tool Power-Consumption Measurement Procedure and Methodology for Estimating Total Energy Consumption”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138(2016), pp. 051004-1-051004-9.
- (8) Zhou, L., Li, J., Li, F., Xu, X., and Wang, L., “An improved cutting power model of machine tools in milling process”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(2017), pp. 2383-2400.
- (9) Hu, L., Peng, C., Evans, S., Peng, T., Liu, Y., Tangand, R., and Tiwari, A. “Minimising the machining energy consumption of a machine tool by sequencing the features of a part”, *Energy*, 121(2017), pp. 292-305.
- (10) Guo, Y., Loenders, J., Duflou, J., and Lauwers, B., “Optimization of energy consumption and surface quality in finish turning”, *Procedia CIRP*, 1(2012), pp. 512-517.
- (11) Velchev, S., Kolev, I., Ivanov, K., and Gechevski, S., “Empirical models for specific energy consumption and optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption during turning”, *Journal of Cleaner Production*, 80(2014), pp. 139-149.
- (12) 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.

- (13) 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, 79-10(2013), pp. 930-936.
- (14) Suwa, H. and Samukawa, T., “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.
- (15) 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.