

2014年度

博士学位論文

工作機械の省エネルギー技術に関する研究

中部大学大学院

工学研究科 機械工学専攻

小田 陽平

要 旨

近年の工作機械の大きな進歩により、生産性は格段に向上してきたと同時に、エネルギー消費量も非常に増加してきた。そのため、工作機械の省エネルギー開発指針となる技術開発を目指し、工作機械の運転状態ごとの消費電力量の測定、検証を行った。さらに、それらの結果を踏まえた省エネルギー技術方策の提案およびその検証を行った。

第1章「緒論」では、工作機械の変遷、工作機械の消費電力量、工作機械の環境対応に関する規格、工作機械の省エネルギー開発の狙いについて述べた。

第2章「工作機械の構成と電力消費」では、工作機械の構成要素と電力消費、運転状態と使用される機器の関係などについて、旋盤型複合工作機械を例にとって考察した。

第3章「工作機械における消費電力量の分類および評価方法」では、工作機械において消費される電力量を運転状態から分類し、それらの評価方法、測定方法について述べた。工作機械における消費電力量を待機電力量、加工消費電力量の2つに分類した。

第4章「切削加工試験」では第3章で分類した加工消費電力量の評価に用いた工作機械、工具、切削条件、被削材などを述べた。

第5章「加工消費電力量の測定」では、旋削、ミリング、傾斜ミリング加工における消費電力量を測定し、省エネルギーとなる加工条件を検証した。また、複合工作機械においては各加工を行い、最も省エネルギーとなる加工形態について検証した。まず、CNC旋盤による外径旋削加工、端面加工において主軸回転数を適切にすることで、消費電力量削減が可能であることを明らかにした。また、3軸制御マシニングセンタにおけるミリング加工においては、工具寿命に悪影響を及ぼさない範囲内で切削条件を高く設定することで消費電力量削減が可能であることを明らかにした。5軸制御マシニングセンタにおける傾斜ミリング加工においては、傾斜角度を15度に設定することで消費電力量削減が可能であることを明らかにした。複合工作機械における旋削、フェイスミル、エンドミル、ドリル加工においては、各加工法の消費電力量を分析し、ドリル加工が最も省エネルギーな加工法であることを明らかにした。

第6章「待機電力量の測定」では、準備状態の消費電力量において、各周辺機器の割合分析を行ない、周辺機器最適化、工程集約、切りくず吸引システムの採用などの方法で消費電力量削減が可能であることを明らかにした。

第7章「省エネルギー技術の複合工作機械への適用」では、旋盤型複合工作機械における実加工に、本研究で提案した省エネルギー技術を適用し、消費電力量削減が可能であることを実証した。

第8章「結論」は以上をまとめた、工作機械の省エネルギー技術について研究した本論文のまとめである。

目次

第 1 章 緒論.....	1
1.1 工作機械の変遷.....	1
1.2 工作機械の消費電力量.....	2
1.3 工作機械の環境対応に関する規格.....	3
1.4 工作機械の省エネルギー技術開発の狙い.....	6
1.5 本論文の構成.....	7
参考文献.....	9
第 2 章 工作機械の構成と電力消費.....	12
2.1 はじめに.....	12
2.2 工作機械の構成要素.....	12
2.3 電力消費が生じる機器の配置と運転状態.....	22
2.4 消費電力量の削減方策の分類.....	28
2.5 まとめ.....	29
参考文献.....	30
第 3 章 工作機械における消費電力量の分類および評価方法.....	31
3.1 はじめに.....	31
3.2 工作機械における消費電力量の分類.....	31
3.3 消費電力量の評価方法.....	36
3.4 消費電力量の測定方法.....	36
3.5 まとめ.....	38
参考文献.....	38
第 4 章 切削加工試験.....	39
4.1 はじめに.....	39
4.2 使用工作機械および加工方法.....	39
4.2.1 旋削加工.....	39
4.2.2 ミリング加工.....	41
4.2.3 傾斜ミリング加工.....	42
4.2.4 複合工作機械における旋削およびミリング加工.....	44
4.3 使用工具、切削条件および被削材.....	46
4.3.1 CNC旋盤における旋削加工.....	46

4.3.2	3軸制御立形マシニングセンタにおけるミリング加工	50
4.3.3	5軸制御立形マシニングセンタにおける傾斜ミリング加工	57
4.3.4	旋盤型複合工作機械における旋削, ミリング加工	60
4.4	工具摩耗観察方法および工具寿命判断基準	70
4.4.1	工具摩耗観察方法	70
4.4.2	旋削工具, フェイスミルおよびエンドミルの工具摩耗形態	71
4.4.3	エンドミルの工具摩耗形態	72
4.4.4	ドリルの工具摩耗形態	72
4.5	まとめ	73
	参考文献	74
第 5 章	加工消費電力量の測定	75
5.1	はじめに	75
5.2	旋削加工における主軸回転数が消費電力量に及ぼす影響	76
5.2.1	外径旋削加工における消費電力量	76
5.2.2	端面旋削加工における消費電力量	78
5.2.3	ケーススタディ	79
5.3	ミリング加工における切削条件が消費電力量に及ぼす影響	81
5.3.1	フライス加工における消費電力量	81
5.3.2	エンドミル加工における消費電力量	83
5.3.3	ドリル加工における消費電力量	85
5.3.4	工具寿命を考慮した省エネルギー切削条件の選定	87
5.3.5	ケーススタディ1 (実ワークにおける評価)	98
5.3.6	ケーススタディ2 (深穴加工における消費電力量削減)	100
5.3.7	ケーススタディ3 (主軸加速・送り軸位置決め時の消費電力量削減)	102
5.4	傾斜ミリング加工における傾斜角度が消費電力量に及ぼす影響	104
5.4.1	傾斜ミリング加工時における消費電力量	104
5.4.2	傾斜ミリング加工時の仕上げ面粗さ測定	105
5.4.3	工具摩耗が消費電力量に及ぼす影響	106
5.4.3	考察	109
5.4.4	ケーススタディ	116
5.5	旋盤型複合工作機械における消費電力量	118
5.5.1	旋削加工における消費電力量	118
5.5.2	フェイスミル加工における消費電力量	120
5.5.3	エンドミル加工における消費電力量	122
5.5.4	ドリル加工における消費電力量	123

5.5.5	旋削加工とフェイスミル加工の加工消費電力量の比較.....	125
5.5.6	寿命試験結果.....	126
5.6	まとめ.....	128
	参考文献.....	129
第 6 章	待機電力量の測定.....	131
6.1	はじめに.....	131
6.2	大量生産ラインにおける周辺機器最適化による省エネルギー化.....	131
6.2.1	対象生産ライン.....	132
6.2.2	周辺機器による消費電力量割合.....	135
6.2.3	クーラントポンプの集約および最適化.....	135
6.2.4	油圧機器の最適化.....	138
6.2.5	更なる改善および第2工程への適用.....	139
6.3	工程集約における省エネルギー化.....	140
6.3.1	使用工作機械.....	140
6.3.2	工程集約後の消費電力量.....	141
6.4	切りくず吸引システムによる省エネルギー化.....	142
6.4.1	使用工作機械.....	142
6.4.2	使用工具および切削条件.....	144
6.4.3	切りくず吸引状態検証および工具，ワーク温度測定結果.....	147
6.4.5	省エネルギー効果検証結果.....	152
6.5	まとめ.....	154
	参考文献.....	155
第 7 章	省エネルギー技術の複合工作機械への適用.....	156
7.1	はじめに.....	156
7.2	適用した省エネルギー技術.....	156
7.3	使用工作機械，ワークおよび切削条件.....	158
7.3.1	使用工作機械.....	158
7.3.2	対象ワーク.....	158
7.2.3	工程，工具および切削条件.....	159
7.4	省エネルギー技術の検証.....	162
7.5	まとめ.....	164
	参考文献.....	164
第 8 章	結 論.....	165

謝 辭.....	168
業 績.....	169
經 歷.....	171

第 1 章 緒 論

1.1 工作機械の変遷

工作機械は広く用いられている産業機械の 1 つであるため、ユーザーから常にその生産性と加工精度を高めることが要求されてきた。なぜなら、工作機械の性能は機械工業の基礎をなす機械部品の性能と製造コストに支配的な影響を与えているからである。その結果、メーカーの努力が実を結び大きな進歩を遂げてきた。それらの変遷を旋盤について述べる。

旋盤は 1970 年ごろまでは、普通旋盤（非 NC 旋盤ともいう）が使用され、オペレータが 1 人 1 台持ちで作業を行ってきた。それが NC 装置の普及により、1 次的なワークの寸法管理の作業は NC が行うようになった。そのため、オペレータが寸法管理をする必要がなくなり、1 人のオペレータで 2 台、3 台と複数台の旋盤を同時に操作することが多く見られるようになった。また NC 旋盤では、約 20 本程度までに限られるが工具の自動交換が行えるので、自動運転時間が以前よりも長く取れ、人的生産性と物的生産性がともに大きく向上した。

この旋盤は軸中心にある穴は従来からドリルを用いて加工されてきたが、そうではないところにある穴（＝非対称穴と呼ばれている）はフライス盤、マシニングセンタなどで加工されてきた。その場合、ワークを旋盤から取り外し、他の機械に移送してそこで穴加工を行うため非常に準備時間がかかる。そのため、NC 旋盤に小径のドリル加工用主軸を装備し、非対称穴形状も同一機械で加工できるようにした機械が出現してきた。

やがて穴形状のみでなく、非対称な平面形状や溝形状も旋盤で加工したいという要求から、ドリル加工用主軸ではなく、フライス、エンドミル加工なども可能なミリング主軸をこの種の機械に装備するようになった。このような NC 旋盤は、複合旋盤と呼ばれる。さらに、このミリング主軸も当初は直径 45 mm 以下の小さいものであったが、徐々に大径化し、現在では直径が 80 mm にも達し、通常のマシニングセンタと同程度のミリング加工能力を備えるに至った。このような本格的なミリング主軸を備えた工作機械が、旋盤型複合工作機械である。これらの発展過程をまとめた結果を図 1.1 に示す^{1)1,2)}。

マシニングセンタも同様に、オペレータが手動で操作する汎用フライス盤、CNC を装備した NC フライス盤、ATC を装備したマシニングセンタ、5 軸同時制御加工が行えるマシニング型複合工作機械と発展を遂げてきた。

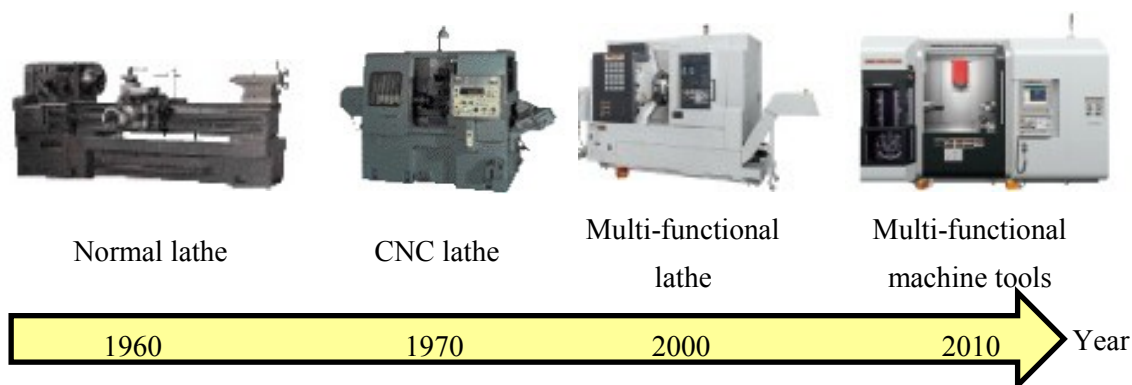


Fig.1.1 The transition of lathe

1.2 工作機械の消費電力量

前節で述べたように工作機械は大きな進歩をし、今や工作機械はほぼ無人運転が可能になり、人的生産性と物的生産性は格段に向上してきた。同時に工作機械のエネルギー消費量も非常に増加している。このエネルギーの大半は電力という形で供給されているので、CO₂排出量に換算すれば、1台当たりでもかなりの排出量になっている。

図 1.2 に示すような比較的小型の旋盤型複合工作機械 NTX2000(DMG 森精機(株)製)は約 200 台の販売実績がある。これらの稼働率を平均約 36%，待機電力を約 2.0 kW(ともに実測値)とすると、少なくとも 1 年間で約 1,260,000 kWh の電力を消費していると推定できる。これを CO₂ 排出量に換算すると、1 年間で約 518 トンになる^{1.3)}。これは平均的な自家用車の 1 年間の CO₂ 排出量の約 250 台分に相当し、無視できない排出量である。さらに、工作機械は平均して 10 年間程度は使用されるので、生涯における総 CO₂ 排出量は 1 台あたり約 26 トンになる。この旋盤型複合工作機械 NTX2000 は、Z 軸ストロークが 1500 mm，チャックサイズが 8 インチと比較的小さい棒状のワークの複雑形状部品を加工するための機械である。平均的には旋盤型複合工作機械としてはもっとサイズの大きいものが使用されているので、それらの機械では消費電力量も当然これよりずっと多くなる。

一方で、京都議定書に代表されるように、全世界においてこの CO₂ やメタンなどの温室効果ガスによる地球温暖化を初めとした、環境の悪化を抑制しようという動きが非常に高まってきている^{1.4)}。さらに、2011 年東日本大震災による原子力発電所の事故が原因となった電力供給不足の問題もある。例えば、図 1.3 は 1990 年から 2012 年までの日本国内における発電量とその内訳である^{1.5)}。図 1.3 より、近年は 2007 年をピークにして年間発電量が低下している。また、2012 年の原子力発電の割合が急激に低下していることから、一層省エネルギーに関する関心が高まっていることがわかる。これより、産業界においても電力不足は特に夏季において緊迫した問題であり、また業界全体で環境に与える負荷は大きい。したがって、環境悪化を抑制する技術の開発が必須のものとなっている。自動車、家電製品など多くのメーカーが環境対応技術を開発し、グリーン製品としてアピールをしている。工作機械

においても同様の傾向にあり, 後述するように多くのメーカーや研究者が省エネルギー技術の研究開発を進めている。



Fig.1.2 The overview of multi-functional machine tools NTX2000

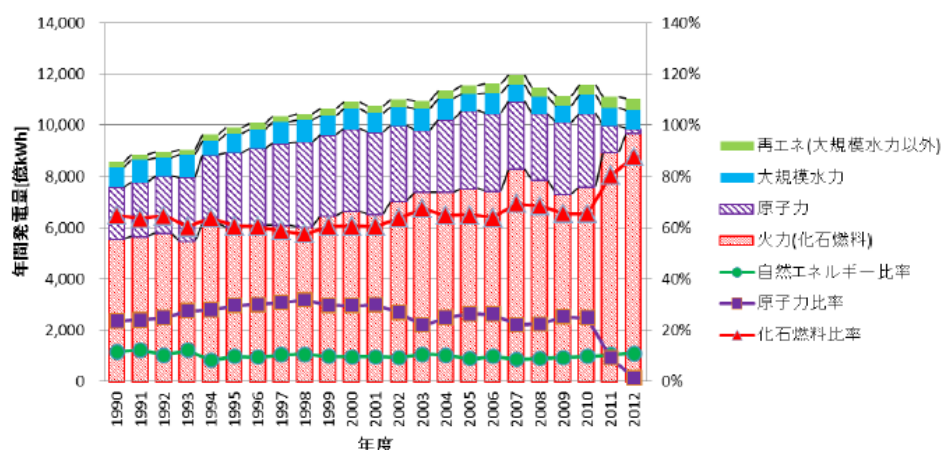


Fig.1.3 Total power generation and power supply composition in Japan

1.3 工作機械の環境対応に関する規格

業界全体で環境への関心が高まるなか, 日本工作機械工業会でも環境対応に関する規格制定の動きがあり, 平成 22 年 3 月に JIS/TS として下記の 5 件の制定がなされた。

- (1) 工作機械の環境適合設計ガイドライン : TS B 0023
- (2) 工作機械—消費電力測定方法 TS B 0024 1~4 マシニングセンタ, 数値制御旋盤及びターニングセンタ, 横軸各テーブル形平面研削盤, 円筒研削盤

ここで上記のうち、本研究の対象となる(2) 工作機械—消費電力測定法—TS B 0024 1,2 のマシニングセンタ、数値制御旋盤及びターニングセンタについて述べる。

まず、マシニングセンタの規格について述べる。図 1.4 はマシニングセンタの電源投入時からある一定時間までの電力測定結果例である。図 1.4 より以下の項目別の消費電力量を算出する。

1. 機械非常停止状態+主電源 On+NC 装置電源 On 時の消費電力量 [Wh]
 2. 機械運転準備完了状態の消費電力量 [Wh]
 - 3.クーラントポンプの電源 On 時の消費電力量 [Wh]
- A.機械非常停止状態+主電源 On+NC 装置電源 On 時に要した平均電力 [W]
 B. 機械運転準備完了状態時に要した平均電力 [W]
 C. クーラントポンプの電源 On 時に要した平均消費電力 [W]

各状態における消費電力量を評価することで、各項目別の消費電力を評価する手順となっている。さらに、加工時の消費電力量は図 1.5 に示す形状を加工して評価を行う。120×120×50 mm の S50C の角材を用いて、Φ125 mm フェイスミル、Φ10, 16 mm のエンドミル、Φ10, 16 mm のドリルにて加工を行い、消費電力量を評価する方法を定義している。

一方、数値制御旋盤及びターニングセンタの評価方法においては、各項目別の消費電力量はマシニングセンタと共通である。加工時の消費電力量に関しては、図 1.6(a),(b)に示すように、(a)Y 軸移動を伴うミリング、(b)ミリングのみを要する 2 つの形状が定義されている。また、加工方法は Φ32 mm フェイスミル、ノーズ R0.4 または 0.8 mm の旋削バイト、Φ10 mm エンドミルを用いて加工を行うように定義している^{1.6)1.7)}。

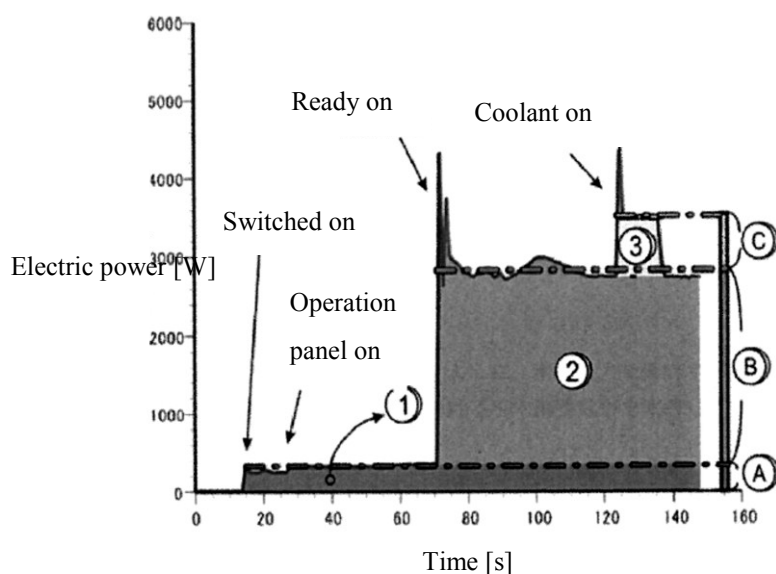


Fig.1.4 Electric power as function of time on machining center

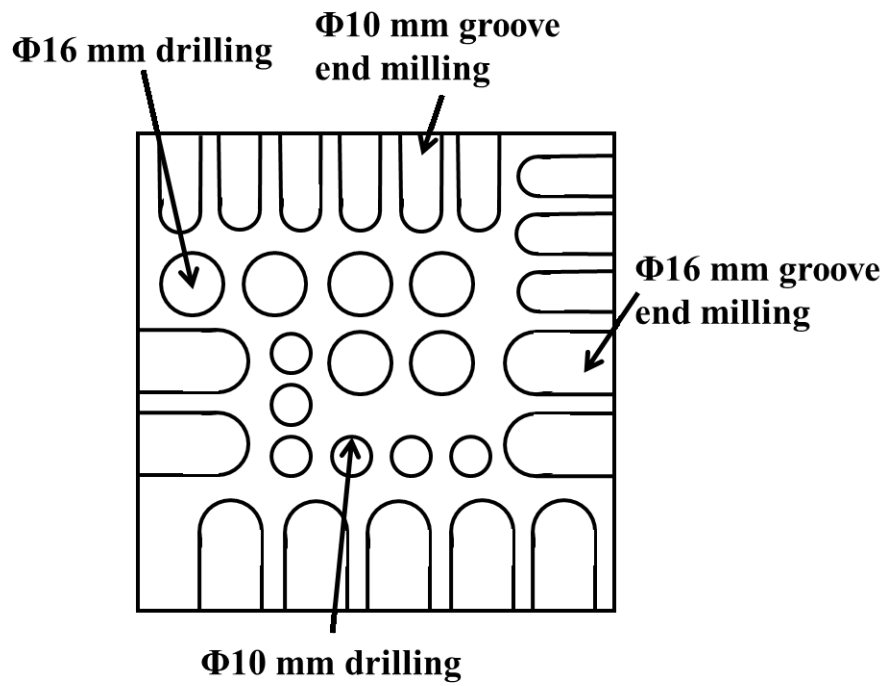


Fig.1.5 Workpiece for investigation of electric energy on machining center

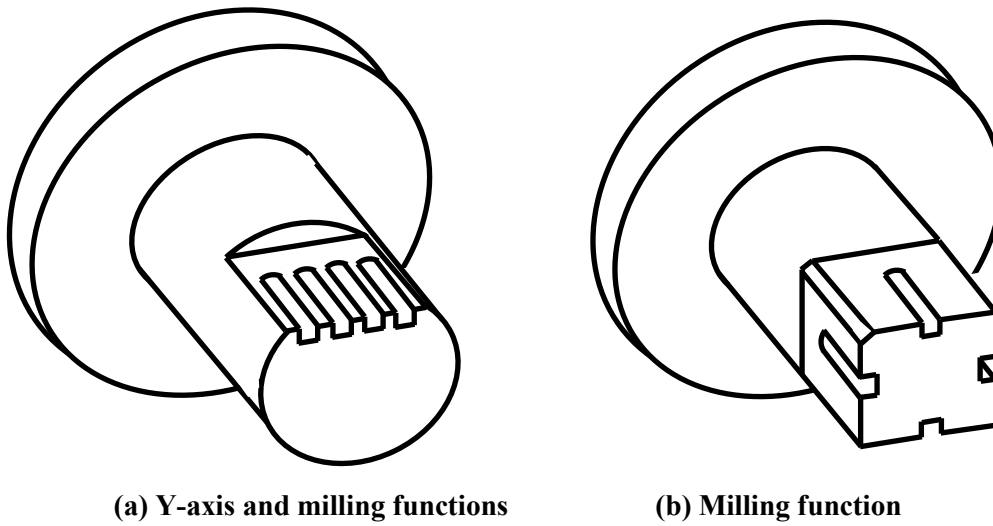


Fig.1.6 Workpiece for investigation of electric energy on lathe

1.4 工作機械の省エネルギー技術開発の狙い

工作機械の省エネルギー技術は関心が高まっているが、可能な限り信頼性を高く保ち、生産性を上げつつ、エネルギー消費量を低減することが望ましいことは言うまでもない。これらの動向を踏まえた多くの研究が行われている。これらの研究は手法から分けると、次の5つのグループに分けることができる。

- (1) 切削条件の改良によって省エネルギー化を図る研究
- (2) CAM などによって工程設計を改良して省エネルギー化を図る研究（ただし、切削条件の変更は除く）
- (3) 機械システムのハードウェアの改良によって省エネルギー化を図る研究
- (4) 機械システムのソフトウェアの改良、予測モデリングによって省エネルギー化を図る研究
- (5) その他、エネルギー消費量の分析、環境負荷の検証など

(1)のグループに属するものとして次のものがある。Guo らは旋削の仕上げ加工における消費電力量と仕上げ面粗さの関係について省エネルギーの観点から考察している^{1.8)}。また、松浦らは消費電力削減も考慮した切削抵抗予測モデルの研究を行っている^{1.9)}。

(2)のグループに属するものとして、Rangarajan らは効率的なツールパスとワークのセットアップ法について研究している^{1.10)}。

(3)のグループに属するものとして次のものがある。主軸の省エネルギー化に関しては、Diaz らは主軸モータからエネルギーを回収する方法を提案している^{1.11)}。送り系の省エネルギー化に関しては、小川は小型マシニングセンタ、小型旋盤^{1.12)}、内山らはガントリータイプの工作機械の消費電力の測定^{1.13)}、および消費電力量削減法を提案している^{1.14)}。また、林らは5軸制御マシニングセンタの消費電力量評価を行っている^{1.15)}。工作機械全体の省エネルギー化に関しては、中南らが多軸工作機械の消費電力削減のため、最適構造設計手法の開発を行っている^{1.16)}。また、金子らは超小型 CNC 旋盤の消費電力削減の手法を開発している^{1.17)}。周辺機器の省エネルギー化に関しては、桜井らが油圧ユニットにおける油温度変化が消費電力に及ぼす影響を検証している^{1.18)}。さらに、杉村らは省エネルギー化のため、アキュムレータを搭載した油圧ユニットを開発している^{1.19)}。

(4)のグループに属するものとして次のものがある。日比野らは生産システムにおける消費電力の評価方法を開発している^{1.20)}。また、Behrendt ら^{1.21)}、Vijayaraghavan らは消費電力量モニタリングシステムの開発を行っている^{1.22)}。さらに、Kara らは実験的手法により消費電力量モデルを開発している^{1.23)}。

(5)その他に属するものとして次のものがある。斉藤らはマシニングセンタ^{1.24)1.25)}、Driscoll らは製造ラインにおける消費電力量の分類を行っている^{1.26)}。さらに、工作機械によって引

き起こされる環境負荷についての研究も行われており、成田らによる環境負荷予測システムの開発や^{1.27)1.28)1.29)1.30)}、LCA手法を用いた例として廣垣らのデスクトップ型5軸制御工作機械^{1.31)}、當麻らの旋削加工^{1.32)}、Avramららの複合工作機械を対象とした研究などがあげられる^{1.33)}。

以上にあげた研究の大半は、特定の加工法や特定の工作機械の省エネルギー技術といった個別の研究開発に留まっていると言わざるを得ない。より効果的な、全体としての省エネルギーの観点からの総合的な技術開発が望まれている。そこで、工作機械メーカーの観点から工作機械の省エネルギー技術開発を行ない、今後の開発指針となる研究を進めることとする。そのために、まず工作機械において電力量は主にどの箇所でどの程度消費されているかを究明し、工作機械の運転状態によってそれらがどのように変動するかを総合的な視野に立って、あきらかにすることとした。そして次のステップとして、消費電力量の大きい機器や切削条件について、効果的な消費電力量の削減法について考察することとした。

1.5 本論文の構成

本論文は、緒論、結論を含む全8章から構成されている。

第1章「緒論」では、工作機械の変遷、工作機械の消費電力量、工作機械の環境対応に関する規格、工作機械の省エネルギー開発の狙いについて述べている。

第2章「工作機械の構成と電力消費」においては、単独で使用されることの多い最新型の旋盤型複合工作機械を例にとり、工作機械の構成と電力が消費される箇所について考察し、それらと運転内容の関係について検討している。

第3章「工作機械における消費電力量の分類および評価方法」においては、第2章で述べた工作機械の運転状態を基に、消費電力量の分類を行っている。また、消費電力量の評価方法および測定方法についても述べている。

第4章「切削加工試験」においては、第3章で分類した加工時に消費される電力の検証に用いる工作機械、工具、被削材などについて述べている。

第5章「加工消費電力量の測定」においては、第4章で述べた工作機械、工具などを用いた加工状態における消費電力量の検証結果を述べている。代表的な加工である旋削加工、フライス加工、エンドミル加工、ドリル加工、ボールエンドミルを用いた傾斜加工および複合工作機械における各加工形態における消費電力量を測定、評価している。

第6章「待機電力量の測定」においては、第3章で分類した待機電力量の検証結果について述べている。大量生産ラインにて消費される待機電力量の分析、および周辺機器最適化、工程集約による省エネルギー方策について述べている。さらに、複合材料を対象とした切りくず吸引システムの省エネルギー効果も検討している。

第7章「省エネルギー技術の複合工作機械への適用」においては、ケーススタディとして前章まで提案した工作機械の省エネルギー技術を複合工作機械の実加工に適用し、その効果を検証している。

第8章は以上をまとめた工作機械の省エネルギー技術について研究した本論文のまとめである。

(脚注)

本研究においては消費電力または電力(electric power)という用語は[kWまたはW]という単位で示される用語として用い、電力量または消費電力量(electric energy)という用語は[kWhまたはWh]という単位で表される用語として用いる。本研究ではこの消費電力量を対象とし、これを削減することを大目的とする。

参考文献

- 1.1) DMG 森精機株式会社 HP, <http://www.dmgmoriseiki.co.jp/company/profile/history.html>, DMG 森精機の沿革.
- 1.2) 長江昭充, 村木俊之, 山本博雅, 複合工作機械の歴史と現状, SME 東京支部, 40.
- 1.3) 環境省 HP <https://www.env.go.jp/press/press.php?serial=15912>, 関西電力調整後排出係数
- 1.4) 環境省 HP, <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/cop.html>, 気候変動枠組条約・京都議定書
- 1.5) 自然エネルギー白書 2013, 特定非営利活動法人環境エネルギー政策研究所, (2013).
- 1.6) 工作機械－消費電力測定方法 TS B 0024 1～4 マシニングセンタ, 数値制御旋盤及びターニングセンタ, 横軸各テーブル形平面研削盤, 円筒研削盤.
- 1.7) 斉藤義夫, 工作機械の環境対応に関する規格, 精密工学会誌, **78**, 7 (2012) 573.
- 1.8) Y. Guoa, J. Loendersb, J. Dufloua and B. Lauwers, Optimization of energy consumption and surface quality in finish turning, Proceedings of 5th CIRP International conference on High Performacne Cutting, (2012) 551.
- 1.9) T. Matsumura, M. Shimada, K. Teramoto and E. Usui, Predictive Cutting Force Model and Cutting Force Chart for Milling with Cutter Axis Inclination, International Journal of Automation Technology, **7**, 1 (2013) 30.
- 1.10) A. Rangarajan and D. Dornfeld, Efficient tool paths and part orientation for face milling, CIRP Annals, **53**, 1 (2004) 73.
- 1.11) N. DIAZ, S. CHOI, M. HERU, Y. CHEN, S. JAYANATHAN, Y. YASUI, D. KONG, S. PAVANSKAR and D. DORNFELD, Machine tool design and operation strategies for green manufacturing, Proceedings of 4th CIRP International conference on High Performacne Cutting, (2010) 271.
- 1.12) 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) 150.
- 1.13) N. Uchiyama, Y. Ogawa and S. Sano, Energy Saving for Gantry-Type Feed Drives by Synchronous and Contouring Control, International Journal of Automation Technology, **6**, 3 (2012) 401.
- 1.14) N. Uchiyama, T. Nakamura and K. Yamazaki, Reduction of Consumed Energy and Control Input Variance in Machine Tool Feed Drives by Contouring Control, International Journal of Automation Technology, **3**, 4 (2009) 363.
- 1.15) 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) 930.

- 1.16) M. Nakaminami, T. Tokuma, K. Matsumoto, S. Sakashita, T. Moriwaki and K. Nakamoto, Optimal Structure Design Methodology for Compound Multiaxis Machine Tools-III - Performance Evaluation -, International Journal of Automation Technology, **2**, 1 (2008) 71.
- 1.17) 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, **4**, 2 (2010) 138.
- 1.18) Y. Sakurai, T. Suzuki, K. Aiba, T. Yoshinari, K. Kawashima and K. Kihara, Proposal of a Mechanism to Restrict Pressure Change by Oil Temperature Change, International Journal of Automation Technology, **6**, 4 (2012) 502.
- 1.19) K. Sugimura and K. Suzuki, Using Intermittently Operated Oil Hydraulic Pump Unit with Accumulator to Save Energy, International Journal of Automation Technology, **6**, 4 (2012) 426.
- 1.20) H. Hibino, T. Sakuma, and M. Yamaguchi, Evaluation System for Energy Consumption and Productivity in Manufacturing System Simulation, International Journal of Automation Technology, **6**, 3 (2012) 279.
- 1.21) T. Behrendt, A. Zeina and S. Min, Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools, CIRP Annals, **61**, 1 (2012) 43.
- 1.22) A. Vijayaraghavan and D. Dornfeld, Automated energy monitoring of machine tools, CIRP Annals, **59**, 1 (2010) 21.
- 1.23) S. Kara and W. Li, Unit process energy consumption models for material removal processes, CIRP Annals, **60**, 1 (2011) 37.
- 1.24) 原雄太, 田中智久, 斉藤義夫, 工作機械の消費電力評価方法の構築, 2005年精密工学会春季大会学術講演論文集, (2005) 743.
- 1.25) 下河辺学, 原雄太, 田中智久, 斉藤義夫, 工作機械の消費電力に関する測定と評価, 2004年精密工学会秋季大会学術講演論文集, (2004) 107.
- 1.26) E. O'Driscoll, D. Óg Cusack and G. E. O'Donnell, The Characterisation of Energy Consumption in Manufacturing Facilities - A Hierarchical Approach. International Journal of Automation Technology, **7**, 6 (2013) 727.
- 1.27) 成田浩久, 河村浩志, 則久孝志, 陳連怡, 藤本英雄, 長谷部考男, 工作機械による加工の環境負荷予測システムの開発(第1報, 環境負荷の算出手法の提案), 日本機械学会論文集(C編), **71**, 704 (2005) 280.
- 1.28) 成田浩久, 河村浩志, 陳連怡, 藤本英雄, 則久孝志, 長谷部考男, 工作機械による加工の環境負荷予測システムの開発(第2報, 環境効率指標の提案), 日本機械学会論文集(C編), **72**, 715 (2005) 923.

- 1.29) H. Narita, H. Kawamura, T. Norihisa, L. Chen, H. Fujimoto and T. Hasebe, Development of Prediction System for Environmental Burden for Machine Tool Operation (1st Report, Proposal of Calculation Method for Environmental Burden). JSME International Journal Series C, **49**, 4 (2006) 1188.
- 1.30) H. Narita, H. Kawamura, L. Chen, H. Fujimoto, T. Norihisa and T. Hasebe, Development of Prediction System for Environmental Burden for Machine Tool Operation (2nd Report, Proposal of evaluation indicator for eco-efficiency), Journal of Environment and Engineering, **3**, 2 (2008) 307.
- 1.31) 廣垣俊樹, 青山栄一, 小川圭二, 新山徹, 鈴木雅史, 岩間正俊, デスクトップ型 5 軸制御工作機械の LCA を用いた環境負荷の考察, 日本機械学会論文集(C 編), **75**, 752 (2009) 1135.
- 1.32) 當麻昭次郎, 大森茂俊, 小久保邦雄, 立野昌義, LCA 手法を用いた環境対応加工の環境負荷評価-環境対応旋削加工における二酸化炭素排出量-, 精密工学会誌, **69**, 6 (2003) 825.
- 1.33) OI. AVRAM and P. Xirouchakis, Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system, Journal of Cleaner Production, **19**, 6-7 (2011) 699.

第 2 章 工作機械の構成と電力消費

2.1 はじめに

本章では、研究対象である最新の工作機械の代表として、単独で使用されることの多い旋盤型複合工作機械を例にとり、工作機械の構成と電力が消費される箇所について考察した。つぎに、それらと運転状態の関係について検討し、さらに具体的な消費電力量の削減方策について考察を行うこととした。

本章の第2.2節では旋盤型複合工作機械の構成要素、第2.3節では電力が生じる機器の配置とそれぞれの運転状態、第2.4節では消費電力量の削減方策の分類、第2.5節では以上をまとめた第2章の結論について述べる。

2.2 工作機械の構成要素

工作機械は、主軸系と送り系を使ってワークと工具の間に相対運動(切削運動と送り運動からなっている)を行わせ、素形材から不要部分を切りくずとして除去し、機械部品を製作するために作られた機械である。その目的を高能率に達成するために、工作機械は通常次の5つの要素から構成されている。

- (1) 主軸系 (回転軸である主軸を駆動するシステム)
- (2) 送り軸系 (直進軸と旋回軸からなる送り系を駆動するシステム)
- (3) 構造体 (主軸系と送り系を支持している構造体、ベッド、コラム等)
- (4) CNC 装置 (主軸系と送り系に適切な相対運動を与え、適切に周辺機器を作動させる制御システム)
- (5) 周辺機器 (その他、加工が適切に行われるために必要な補助的なシステム)

これらのうち、(1)主軸系、(2)送り軸系、(3)構造体は工作機械の誕生当初から存在したが、(4)CNC装置は約40年前に開発されたものである^{2,1)}。しかし、現在では全工作機械の80%以上がCNC装置を装備しているほどになり、工作機械に不可欠な構成要素となっている。(5)周辺機器は、古くからあるクーラント供給装置を除いて、(4)CNC装置の進化とともに主として自動運転の効率を高め、生産能率と加工精度をより一層向上させるために開発されてきたものであり、近年ますますその数は増加し、性能が高まりつつある。

以下，図2.1に示した旋盤型複合工作機械を例にとって，これらの構成要素と機器について詳細に考察する．



Fig.2.1 The overview of multi-functional machine tools NTX2000

(1) 主軸系

旋盤型複合工作機械においては，少なくとも旋削用主軸1本とミリング用主軸1本を有している．さらに，対向する旋削用主軸をもう1本有する仕様もある．また，これらの駆動用として，旋削用主軸モータ（M1，M2），ミリング用主軸モータ（M3）が使用されている．旋削用主軸モータを1個しか有しない仕様の場合もあるが，その場合はワークを把持している側の端面，外径部は加工できず，ワークを反転させ把握しなおす，またはほかの機械で行わねばならない．ワークの両外径，端面部ともに1台の機械にてワンチャッキンで加工しようとする，旋削用主軸を2本有する構成が必要となる．これらの旋削用主軸モータはベルト駆動とビルトイン形式のものがある．ビルトイン形式の場合，それぞれの旋回軸（C軸）の割り出し用のモータとして，送り系としても使用される．そのため，高精度な位置検出センサーを備えている．ミリング主軸駆動用のモータは，大半の機械がビルトイン形式のものを使用し，前部軸受と後部軸受の中間に配置されている．また，工具着脱のために，ATC（Automatic Tool Changer，自動工具交換装置）が装備されている．近年は高能率加工を目指して，旋削主軸の最高回転数は $6,000\text{min}^{-1}$ 程度になり，ミリング主軸の最高回転数は $20,000\text{min}^{-1}$ に達している．このように高速回転すると軸受部などの発熱が増大するので，熱変形による精度低下を防止するため，軸受部にはジャケットが設けられており，厳密に温度制御された油を循環させて一定温度範囲内に温度を制御している^{2,2)}．また，旋削主軸，ミリング主軸用にこれらの冷却油を送油するポンプが備えられている．

旋削主軸の概要の一例を図2.2に、ミリング主軸のそれを図2.3に示す。なお、対向主軸を内蔵している第2主軸台は、Z軸方向に移動可能であり、通常はその制御軸を補助軸Aと称している。旋削主軸の場合には、ワークとのインターフェイスとして、チャックを備え、ミリング主軸の場合には、工具とのインターフェイスとして、テーパ面を備えている。

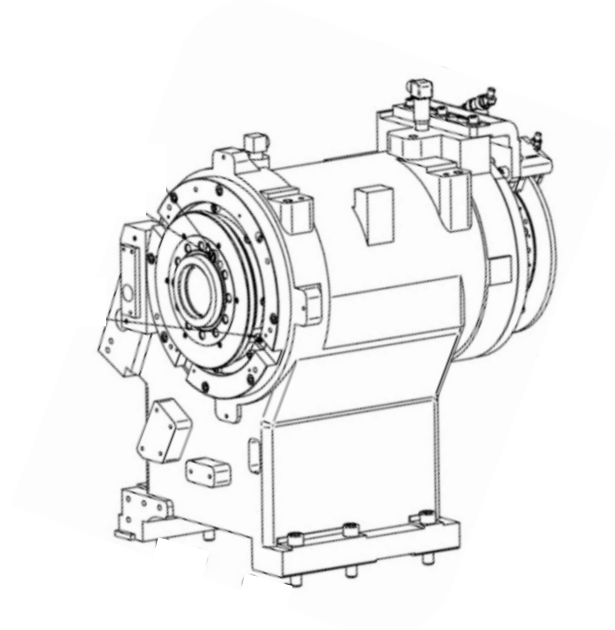


Fig.2.2 The overview of turning spindle (Main spindle)

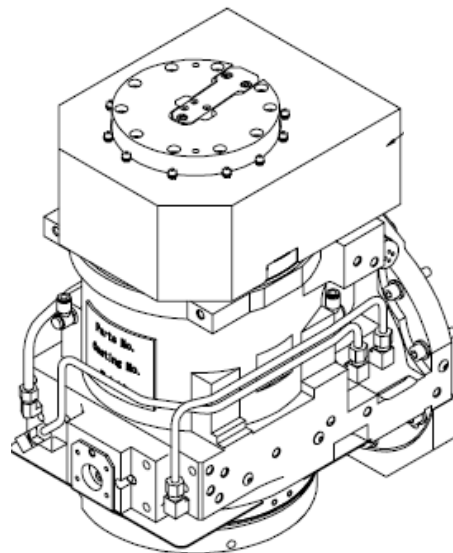


Fig.2.3 The overview of milling spindle

(2) 送り系

送り系には直進軸系と旋回軸系がある。直進軸にはX, Y, Z軸の3軸があり, 旋回軸にはB, C軸の2軸がある。これらの駆動機構として, X軸はミリング主軸の上下運動からなり, DCG駆動方式(Driven of Center of Gravity, 重心駆動)を採用している^{2.3)}。Y軸は八角形形状のラム構造ORC(Octagonal Ram Construction)を採用しており^{2.3)}, ラムの前後の動きからなっている。Z軸はコラムの水平移動からなっている。つまり直進軸送りはX1, X2, Y, Zの計4個のサーボモータと4本のボールねじが使用されている。さらに直進軸の補助軸としてU, V, W軸を有するものもある。また, 前述したように図2.1に示した機械では, 第2主軸台の水平方向の動きをA軸と称している。

2つの旋回軸はダイレクトドライブモータ方式DDM(Direct Drive Motor)を採用し^{2.2)}, B, C軸ともにDDモータにて駆動されている。以前は旋回軸の駆動には回転式のサーボモータ, ウォームとウォームギアを用いた変速機を用いて行われていたが, 最近はDDモータが多く使用されている^{2.4)}。ボールねじの回転数と送り速度は 2000 min^{-1} , 30 m/min 程度とかなり高速化してきた。それに比べると, 旋回軸の回転数はせいぜい 200 min^{-1} 程度である。

直進軸送り系の構造の一例を図2.4に, 旋回軸送り系のそれを図2.5に示す。これらの駆動系で駆動される要素は刃物台(サドルを含む)とミリング主軸である。また, 刃物台を2個有している, 送り駆動用に回転式のサーボモータでなく, リニアモータを使用するものもある^{2.5)}。

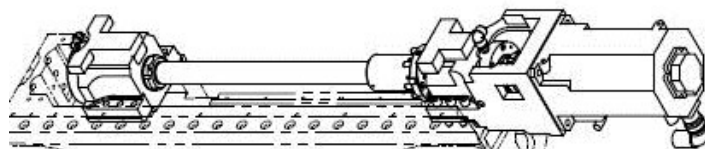


Fig.2.4 The overview of liner drive

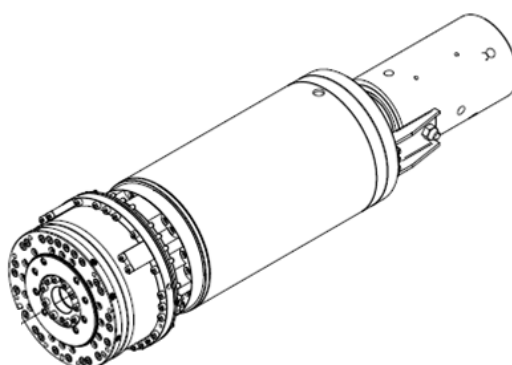


Fig.2.5 The overview of rotary drive (B-axis)

(3) 構造体

構造体は、工作機械の最も下部を構成するベッドと垂直に自立するコラムの2つで構成されている。それらには直進軸の案内用のボールガイドと旋回軸支持用の大径の軸受が取り付けられている。また、後述する周辺機器の相当部分は構造体に取り付けられている。図2.1に示した旋盤型複合工作機械の場合には、コラムがZ軸方向に直進移動する送り駆動系の一部となっている。ベッドは通常は移動せず、基礎、または地面に設置されている。構造体であるベッドの構造の概要の一例を図2.6に示し、コラムのそれを図2.7に示す。

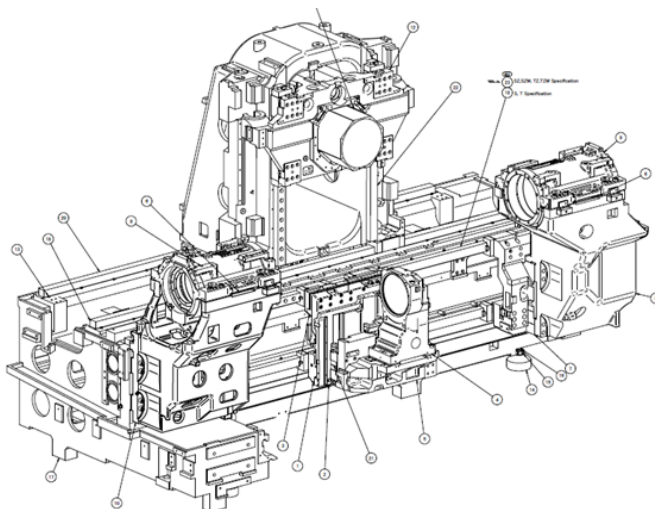


Fig.2.6 The overview of bed

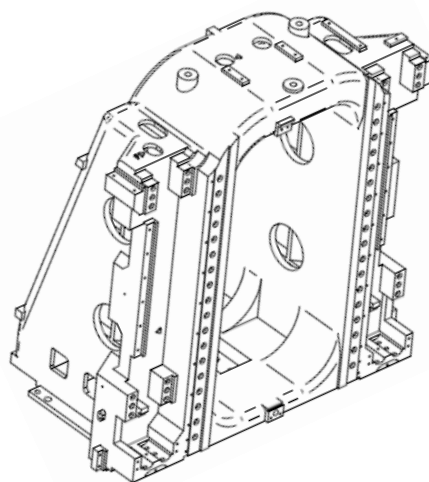


Fig.2.7 The overview of column

(4) CNC 装置

CNC装置は、操作盤と強電盤の2つからなっている。操作盤はプログラムされた入力指令にしたがって、主軸系と送り系に適切な相對運動を与えるフィードバック制御を行う部分と工具交換やクーラント供給用モータのOn・Off制御などのシーケンス制御を行う部分からなっている。図2.8に示すように、入力プログラムが処理され、補間計算などが行われて、位置フィードバックループに指令値として与えられ、位置の制御が行われる^{2,6)}。

後者のシーケンス制御を行うシーケンサーは強電盤と一緒に設置されることが多い。通常、操作盤はオペレータが機械の操作をしやすいように構造体に接して配置され、強電盤は大きな熱源になるので、構造体とは別置されている。

図2.1に示した旋盤型複合工作機械の場合は、直進軸X1, X2, Y, Zと旋回軸B, Cの制御用に6個のサーボモータを制御している。そのうち、5軸については同時制御の補間処理が行え、複雑形状の加工ができるようになっている。X1, X2軸は同じ指令値を用いて制御されている。

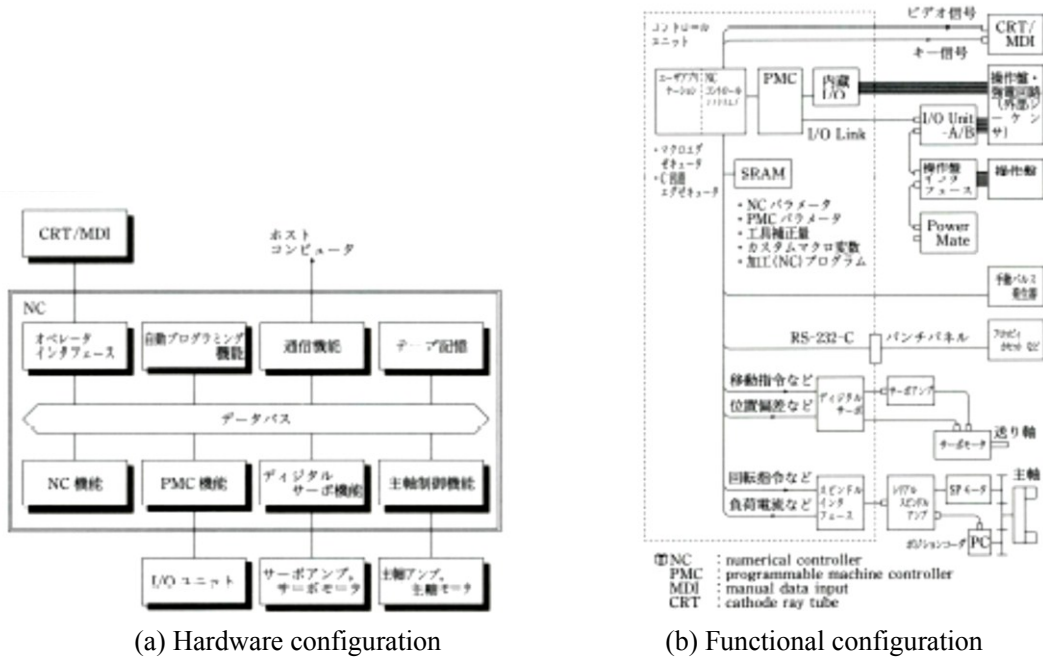


Fig.2.8 The overview of CNC device process

(5) 周辺機器

周辺機器は、つぎにあげるように多数のものが用途別に使用されている。

(5.1) 工具交換装置 (ATC, Automatic Tool Changer)

図2.9に示すようにミリング主軸に加工の際に使用する工具を自動的に脱着するための装置で、その交換に要する時間は0.2秒程度と非常に早くなっている^{2.2)}。工具は工具マガジンに格納されており、旋削用工具も含めて、通常は40本程度装備されている。図2.1の旋盤型複合工作機械においては、これは構造体であるベッドに取り付けられている。

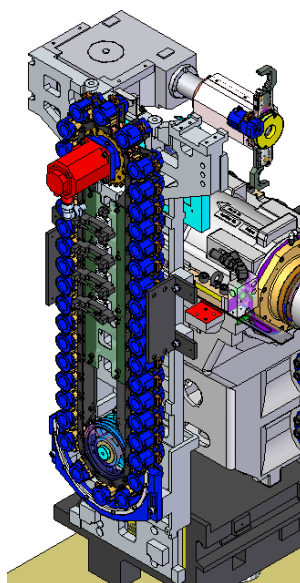


Fig.2.9 The overview of ATC

(5.2) ワーク交換装置 (AWC, Auto Work Changer)

複合工作機械においては複雑な形状の部品を加工することが多いため、1個のワークを加工するのに要する加工時間は、数時間から数十時間におよぶのが通例であり、ワーク交換が行われる回数はそう多くない。したがって、ワークの交換はそれほど早く行う必要はない。図2.10に示すワーク交換装置は構造体に取り付けられている。ワーク交換を汎用の産業用ロボットで行わせるものもある。



Fig.2.10 The overview of AWC

(5.3) 油圧装置

油圧装置は、工具交換の際のように作動時に大負荷がかかる装置の駆動源として多用されている。その最大圧力は7 MPa程度であり、最大吐出量は28 l/min程度のものが使用されている^{2.7)}。油圧装置に取り付けられている。後述するように、油圧装置は常時運転される必要があり、多大の電力を消費する。本研究ではこの消費電力量の削減も対象とする。

(5.4) クーラント供給装置

工作機械では、加工中に大量に発生する加工熱を低下させるため、切りくずを加工部から速やかに排除するため、およびワークの温度上昇を抑制するために大量のクーラントを使用する。図 2.1 に示す複合工作機械では、刃先冷却用のサイドスルー、センタースルークーラント、切りくず除去クーラントなど5つのモータが使用されている。その供給量は最大で67 l/min程度にもなっている^{2.8)}。クーラント供給装置は構造体とは別置されている。また、深穴ドリル加工の切りくず詰まり対策、難削材加工用として高圧クーラント装置も別置される場合がある。

(5.5) 潤滑油供給装置

軸受、ボールねじには潤滑油の供給が不可欠である。潤滑油の必要量はクーラントに比べれば、はるかに少なく0.12 l/min程度である^{2.9)}。しかし、それが供給される箇所は、機械精度影響を及ぼす要素であるため、厳密に室温 ± 0.2 °C程度に温度管理された潤滑油を供給する必要がある。この潤滑油供給装置は構造体に取り付けられている。

(5.6) 油温制御装置

工作機械で使用される作動油は、厳密な温度管理が必要である。しかし、その程度は使用目的によって異なる。潤滑油は、室温 ± 0.2 °C程度、クーラントと作動油は室温 ± 2 °C程度に温度制御されたものを使用する。この油温制御装置は構造体に取り付けられている。

(5.7) 空気供給装置

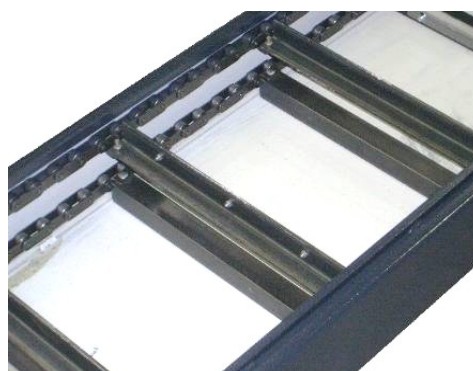
工作機械に供給される圧縮空気は切りくずを吹き飛ばして機械外に排出したり，クランプ装置に供給して大荷重に増幅して作動させたりと，その用途は多岐にわたっている．ただし，この目的のために独自のコンプレッサは装備せずに，圧縮空気供給装置から供給することが多い．

(5.8) 切りくず搬出装置

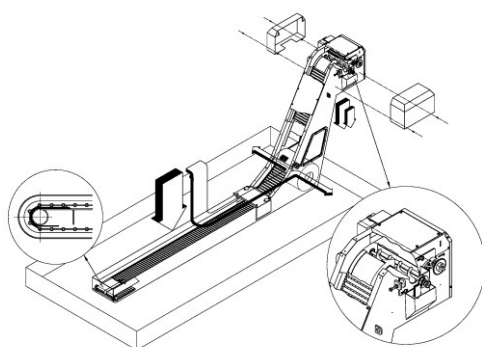
ワークから削り取られて切りくずとなった材料は，迅速に機外に搬出する必要がある．これにはベルトコンベアタイプのヒンジ式（図 2.11 (a)），切りくずをすくい上げるタイプのスクレーパ式（図 2.11(b)），ドラムフィルタを追加した上部ヒンジ式，下部スクレーパ式の複合型（図 2.11(c)）^{2.10)}，螺旋状のスパイラル式（図 2.11(d)）^{2.11)}，発生する切りくずによって最適なものを選定する．これは構造体であるベッドの空洞部へ挿入し，取り外すことも可能である．



(a) Hinge conveyor



(b) Scraper conveyor



(c) Hinge and scraper combination conveyor



(d) Spiral conveyor

Fig.2.11 The overview of chip conveyer

(5.9) 機内照明装置

切りくずやクーラントの飛び散りからオペレータを保護するためのカバーが取り付けられており、その中で加工が行われる。したがって、オペレータが目視で作業や加工状態のモニターをするため、照明装置が取り付けられている。

5.10) 振れ止め装置

図2.1には見られないが、長尺ワークのびびり振動防止のために、振れ止め装置を使用する場合がある。長尺ワークの中央付近は剛性が低く、縄跳びのようにワークが跳ねるときがある。これを防止するため、油圧を用いてワークを把持する。この振止め装置は自走するタイプもあり、その場合サーボモータを用いて移動させる。振れ止め装置の概要を図2.12に示す。

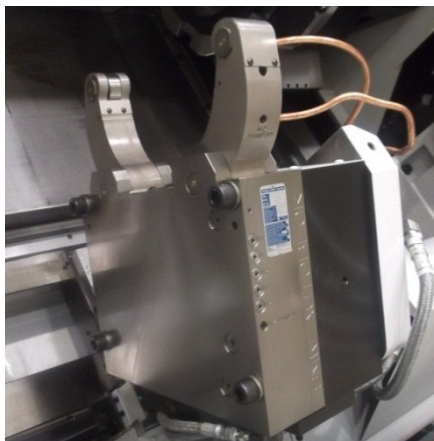


Fig.2.12 The overview of steady rest

以上に述べた周辺機器用の装置やモータにおいては、作動状態が他の装置やモータの作動状態によって自動的に決まるものと、単独で任意に運転状態を変えられるものがある。例えば、油圧装置、潤滑油供給装置は機械の電源が投入された時点で作動する。一方、クーラント供給装置、切りくず搬出装置は単独で任意に作動状態を変更できる。

2.3 電力消費が生じる機器の配置と運転状態

工作機械を構成する上記の5つの構成要素のうち、直接は運動を行わない3)構造体のベッドを除いて、他の4要素にはすべて電気エネルギーを供給されるモータなどを用いて所要の動作を行っている。電気容量で0.1 kW以下の小さいモータは無視し、比較的大きなもののみを取り上げると、それらは図2.13に示す場所に配置されている。また、それらのモータの電気容量を表2.1に示す。その他、NC電源、機内照明装置などでも電力量は消費される。

一方、工作機械の運転状態は通常次のように4つの状態に分けられている。

- (1) 電源が投入されていない休眠状態（休眠状態）
- (2) 電源が投入されているが、運転準備は完了されていない状態（未準備状態）
- (3) 電源が投入され、運転準備が完了されている状態(運転準備状態)
- (4) 加工サイクル中の作業状態（加工状態）

- (1) 電源が投入されていない休眠状態（休眠状態）

平均では年間5942 hである^{2.12)}。電源が投入されていないため、電力量消費は発生しない。この休眠状態にある時間は全体の67%と最も長い。

- (2) 電源が投入されているが、運転準備は完了されていない状態（未準備状態）

平均では年間16 hである^{2.12)}。この状態で稼働している機器はNC装置、油圧装置、潤滑油供給装置、油温制御装置、油温制御装置、空気供給装置、機内照明装置などがある。この状態で稼働している機器の電気容量は総計5.39 kWである。

- (3) 電源が投入され、運転準備が完了している状態(運転準備状態)。

平均では年間1136 hである^{2.12)}。稼働している機器は、(2)の機器に加えて、サーボモータブレーキなどがあげられる。この状態で稼働している機器の電気容量は総計24.59 kWである。

- 4)加工サイクルの作業状態（加工状態）

平均では年間1666 hである^{2.12)}。稼働している機器はクーラント供給装置、切りくず搬送装置、送り駆動系モータ、主軸駆動系モータ、工具交換装置、工具マガジン旋回モータなどすべての機器があげられる。加工状態は早送り時の無負荷運転状態と切削送り時の切削状態に分けられる。切削状態ではエアカット時を除いて切削抵抗が発生するため、主軸駆動系と送り駆動系のモータの負荷が増加する。これによる消費電力量も含まれる。この状態で稼働している機器の電気容量は総計90.56 kWである。

これより、主軸駆動用モータの電気容量は総計55 kWに達し、その他の機器の電気容量に比べて格段に大きいことがわかる。つぎに大きいのは、送り駆動用モータであり、総計21 kWである。周辺機器の種類は多いが、電気容量としては小さいものが多く、総計8 kWに過ぎない。CNC装置はさらに電気容量は小さく、わずか1.36 kWでしかない。

これら4種の運転状態におけるモータの稼働状態をまとめると、表2.2のようになる。また、この表に基づいて、各要素に取り付けられているモータの電気容量を総和したものを表2.3に示す。

(脚注)

以前は、暖機運転と称する無負荷運転を1時間程度行って、機械の温度上昇がある程度安定するのを待って、実加工に移るのが普通であった。しかし、近年の工作機械はメーカーの努力により、機械の温度上昇による精度低下はかなり抑制されている。よって、この暖機運転を行わず、すぐに実作業状態に移行するのが普通となってきた。したがって、本研究では原則として、暖機運転は行わないものとして考察している。

Table 2.1 Specifications of each element

Element	Name	Electirc capacitance [kW]
Spindle	Turning spindle M1	22
	Turning spindle M2	22
	Milling spindel M3	11
Feed drive	X1 axis	5.5
	X2 axis	5.5
	Y axis	2.7
	Z axis	5.5
	B axis	1.2
	C axis	1.0
	A axis	3.0
Auxiliary machine	ATC motor	2.4
	AWC motor	—
	Turing spindle cooling pump	0.4
	Milling spindle cooling pump	0.4
	Hydraulic unit	2.2
	Coolant supply unit	3.27
	Lubricant deviece	0.034
	Oil cooler	0.97
	Air supply unit	—
	Chip conveyer	0.10
	Machine light	0.024
Steady rest	-	
CNC	Operator control panel	0.45
	Electiral cabinet	0.91

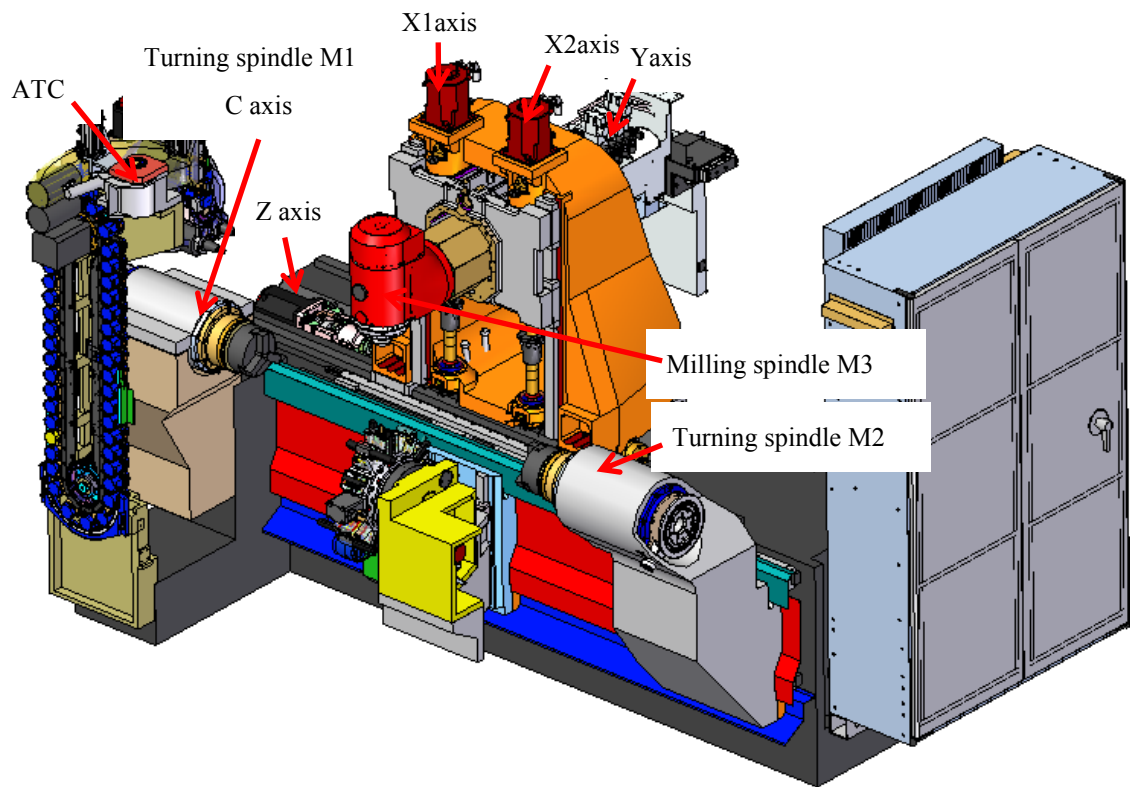


Fig.2.13 (a) Arrangement of electric power consumption equipment (cover was removed)

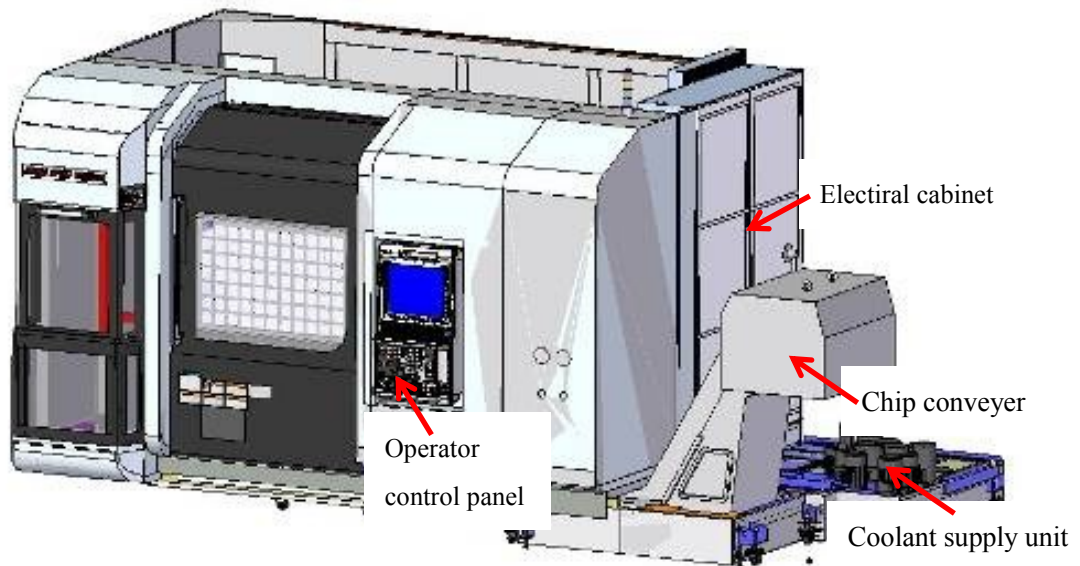


Fig.2.13 (b) Arrangement of electric power consumption equipment (front elevation)

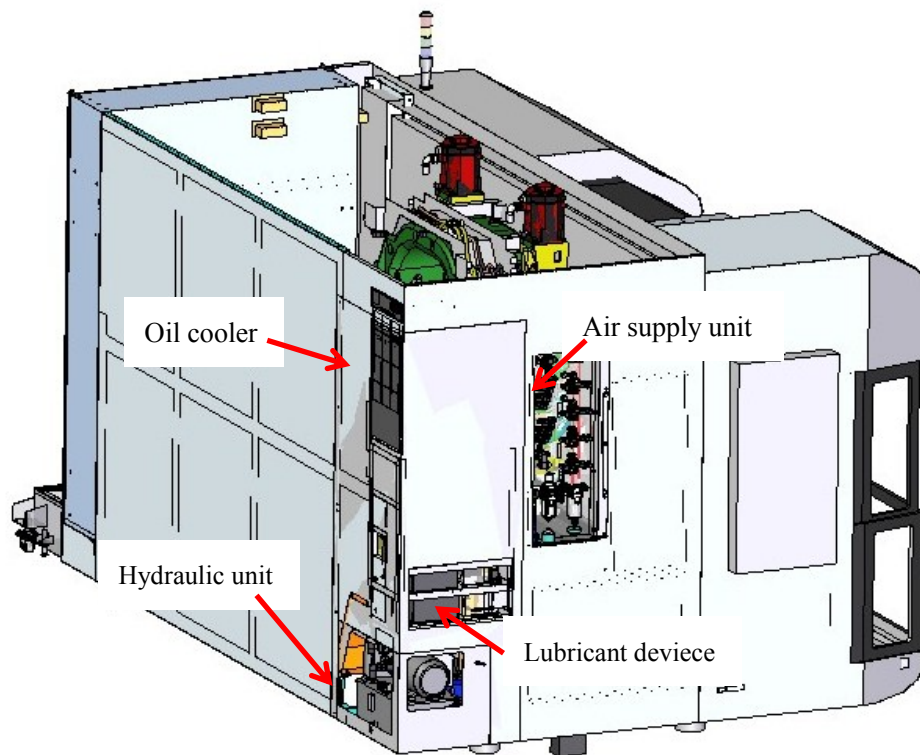


Fig.2.13(c) Arrangement of electric power consumption equipment (side elevation)

Table 2.2 Operate state of the electrical equipment with multi-function machine tools

Element	Name	Not ready	Ready	Machining
Spindle	Turning spindle M1	×	×	○
	Turning spindle M2	×	×	○
	Milling spindle M3	×	×	○
Feed drive	X1 axis	×	○	○
	X2 axis	×	○	○
	Y axis	×	○	○
	Z axis	×	○	○
	B axis	×	×	○
	C axis	×	×	○
	A axis	×	×	○
Auxiliary machine	ATC motor	×	×	○
	AWC motor	×	×	×
	Turning spindle cooling pump	○	○	○
	Milling spindle cooling pump	○	○	○
	Hydraulic unit	○	○	○
	Coolant supply unit	×	×	○
	Lubricant device	○	○	○
	Oil cooler	○	○	○
	Air supply unit	○	○	○
	Chip conveyer	×	×	○
	Machine light	○	○	○
	Steady rest	×	×	○
CNC	Operator control panel	○	○	○
	Electrical cabinet	○	○	○

Table 2.3 Motor electric capacitance total result

	Not ready	Ready	Machining
Total of electric capacity [kW]	5.39	11.06	90.56

2.4 消費電力量の削減方策の分類

前節までの考察に基づいて、工作機械のトータルとしての消費電力量を削減するための有効な方策を分類すると次のようになる。

- (1) 消費電力量の少ない機器や方法の使用
- (2) 作業内容に応じたきめ細かい周辺機器の運転形態の導入
- (3) 切削条件の適切な選択
- (4) 無駄時間の減少（エアカットの減少，暖機運転の廃止など）

これらの方策についてその有効性を詳細に考察する。

(1) 切削条件の適切な選択

工作機械のオペレータが、常に適切な切削条件を選択しているとは考えにくい。むしろ、旋盤型複合工作機械では加工の種類が多岐にわたっているため、切削条件の決定と加工手順からなる工程設計が適切に行われているとは言い難い。よって、CAMシステムなどを用いて、より適切なものにして行けるような環境が望ましい。本研究では、この方策の指針となるように第5章で検証する。

2) 消費電力量の少ない機器や方法の使用

消費電力量の少ない機器を使用することの重要性は言うまでもない。しかし、工作機械の寿命期間において、トータルとして消費電力量と調達コストが少なくとも釣り合っている必要がある。一例として、工作機械の熱変形による精度低下を抑制するために機械各部の温度制御が行われているが、その場合の目標温度の設定法をあげることができる。すなわち、ヨーロッパでは20℃という一定温度に目標値を設定しているが、日本国内では室温±2℃に入るように目標値が設定されている。これは国内では1日における室温の変動が10数℃と激しいので、定値温度に制御しようとする容量の大きい温度制御装置を必要とする。一方、室温同調と呼ばれているこの方法を使うことにより、消費電力量を大いに削減することができた。ただし、非常に精密な加工が必要な場合は、定値温度に制御する必要があることは言うまでもない。

また、案内面としてすべり案内に代わって導入された転がり案内も、この範疇に入る有力な発熱低減法である。

3) 作業内容に応じたきめ細かい周辺機器の運転形態の導入

第2.3節で述べたように一律の運転基準によって、使用（作動）する周辺機器が決められていた。第6章で後述するように、周辺機器の消費電力量はかなり大きく、運転形態によっては全消費電力量の10%を超えるケースが出現している。したがって、周辺機器の機能と作

業内容をよく吟味して、不要な周辺機器の消費電力量を削減する必要がある。本研究ではこの方策に関しては第6章にて検証する。

4) 無駄時間の減少

前述したように、以前は暖機運転を行うことは普通とされていたが、近年の工作機械はメーカーの努力により、機械の温度上昇による精度低下はかなり抑制されている。しかし、これも要求される加工精度とのかねあいでは決まるのであり、一律に廃止することはできない。またエアカット時間も無駄であり、極力エアカットは小さくすべきであるが、供給される素形材の精度が低い場合には実行不可能である。そのために、ニアネットシェープの素形材の供給が必要になる。

2.5 まとめ

本章では、工作機械の構成要素と電力消費、運転状態と使用される機器の関係などについて、旋盤型複合工作機械を例にとって考察した。本章の研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 工作機械は、主軸系、送り系、構造体、CNC装置および周辺機器の5つの要素から構成されている。
- (2) これらの要素の詳細を調査し、それらの内部に多数のモータがあり多量の電力量が消費され、大きな発熱源となっていることを確かめた。また、これらのモータの回転と負荷は、工作機械の運転（作業）状態によって、支配されている。
- (3) これらのモータにおいては、作動状態が他のモータによって決まるものと、単独で運転できるものがある。
- (4) 工作機械のトータルとしての消費電力量を削減するためには、有効な方策について考察した。

参考文献

- 2.1) ファナック株式会社HP, <http://www.fanuc.co.jp/ja/profile/history/index.html>, ファナックの歴史.
- 2.2) DMG森精機株式会社, NTX2000カタログ, (2010) 5.
- 2.3) 安松谷薫, 平本一之, 杉本好昭, 高井康文, 松井聖, 重心駆動を採用した高精度マシニングセンタの開発, 精密工学会誌, **71**, 6 (2005) 663.
- 2.4) 高山直士, ディレクトドライブモータによる5軸加工機の高速度高精度化, 日本機械学会誌, **111**, 1075 (2008) 539.
- 2.5) DMG森精機株式会社, DMU60 eVo linear カタログ, (2014) 11.
- 2.6) 社団法人 工作機械設計技術専門委員会, 工作機械の設計学(基礎編)ーマザーマシンを知るためにー, 社団法人 日本工作機械工業会, (1998) 147.
- 2.7) 株式会社不二越, 標準油圧機器カタログ, (2014) B-39.
- 2.8) グルンドフォス株式会社, 浸漬型クーラントポンプカタログ, 11.
- 2.9) 株式会社正和HP, <https://www.net-showa.co.jp/products/lcb3/>, ルブリーユニットLCB3形
- 2.10) 椿本メイフラン株式会社 HP, <http://www.tsubakimoto.jp/materials-handling/scrap-coolant-handling/metal-scrap/>, 金属切り屑搬送.
- 2.11) 東京精密発條株式会社 HP, http://www.to-hatsu.co.jp/products/spalcon_fa.html, スパイラル式排出コンベア.
- 2.12) DMG森精機株式会社, MORI-NETデータ, NTX2000 稼働率.

第 3 章 工作機械における消費電力量の分類 および評価方法

3.1 はじめに

本章では前章で述べた運転状態において、どの箇所でどの程度の電力量消費が生じているかを考察し、消費電力量の分類を行う。さらに、その考察に基づいて消費電力量の測定方法、評価方法について述べる。

本章の第3.2節では前章の運動状態に基づいて、消費電力量を分類し、第3.3節ではそれらの評価方法、第3.4節では消費電力量測定方法、第3.5節では以上をまとめた第3章の結論について述べる。

3.2 工作機械における消費電力量の分類

第2章でも述べたように、工作機械の運転状態は通常次のように4つの状態に分けられている。表3.1は前章で表記した表2.2を再掲載する。

- (1) 電源が投入されていない休眠状態（休眠状態）年間平均 5942 h.
- (2) 電源が投入されているが、運転準備は完了されていない状態（未準備状態）年間平均 16 h.
- (3) 電源が投入され、運転準備が完了されている状態（運転準備状態）年間平均 1136 h.
- (4) 加工サイクル中の作業状態（加工状態）年間平均 1666 h.

各運転状態の消費電力の時間変化は図3.1の概略図で示すことができる。縦軸が消費電力、横軸が時間となり、この面積が消費電力量となる。工作機械の稼働時間はほとんどが、(1) 休眠状態、(3) 運転準備状態および(4) 加工状態であることがわかる。休眠状態は電力量を消費しないため、本研究では下記のように消費電力量を分類、評価することとする。なお、第1.3節で述べたJIS/TS案も考慮している。

Table 3.1 Operate state of the electrical equipment with multi-function machine tools

Element	Name	Not ready	Ready	Machining
Spindle	Turning spindle M1	×	×	○
	Turning spindle M2	×	×	○
	Milling spindle M3	×	×	○
Feed drive	X1 axis	×	○	○
	X2 axis	×	○	○
	Y axis	×	○	○
	Z axis	×	○	○
	B axis	×	×	○
	C axis	×	×	○
	A axis	×	×	○
Auxiliary machine	ATC motor	×	×	○
	AWC motor	×	×	×
	Turning spindle cooling pump	○	○	○
	Milling spindle cooling pump	○	○	○
	Hydraulic unit	○	○	○
	Coolant supply unit	×	×	○
	Lubricant deviece	○	○	○
	Oil cooler	○	○	○
	Air supply unit	○	○	○
	Chip conveyer	×	×	○
	Machine light	○	○	○
Steady rest	×	○	○	
CNC	Operator control panel	○	○	○
	Electiral cabinet	○	○	○

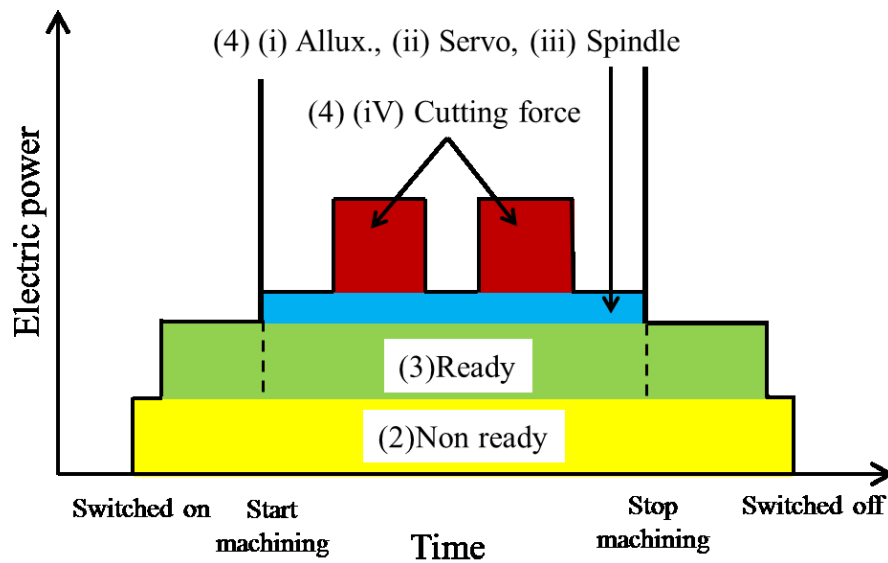


Fig.3.1 The Change in electric power during machining

(I) 待機電力量(運転準備状態電力量)

(3)運転準備状態電力量を待機電力量と表記し，分類および評価する．これは，待機電力量という表現が一般的に用いられるためである．待機電力量の削減には，稼働している周辺機器の消費電力の削減，段取り時間の短縮が重要となる．例えば，周辺機器の消費電力の削減として，油圧制御装置制御方法の変更，油温制御装置の変更などがあげられる．複合工作機械においては，これらの周辺機器が多く備えられており，待機電力量が大きくなる．複雑形状の加工が可能となるが，消費電力量に見合ったワークの加工ができるかが重要である．また，サーボロックに関しては，稼働時間が一定時間を越えても動作が無い場合，メカロックをして動力を遮断する方法がある^{3.1)}．なお，待機電力量 E_{NR} は式(3.1)のように示すことができる．

$$E_{ST} = P_{ST} \times R_{CL} \times t_{ST} \quad (3.1)$$

P_{ST} ：稼働している周辺機器の電気容量総和 [kW]

R_{CL} ：周辺機器の稼働率 [%]

t_{ST} ：準備状態時間 [h]

(II) 加工消費電力量

4)加工消費電力量のうち3)運転準備状態電力量を減算したものとして分類，評価する．加工消費電力量は主に4つの項目に分けられる．

(i) 周辺機器電力量

クーラント供給装置, 切りくず搬送装置, ATC装置など加工中に稼動する補機により消費される電力量である. これらの電力量削減はドライ加工, 切りくず搬送装置の間欠運転, 複合ツール使用によるATC回数の削減などによる消費電力の削減, サイクルタイムの短縮が重要となる. 補機電力量 E_{PD} は式(3.2)で示すことができる. なお, 後述する第5章の加工消費電力量評価ではこれらの周辺機器を稼動させないため, 評価対象としない. 第7章のケーススタディでは実製品を加工するために, 評価対象としている.

$$E_{PD} = (P_{CL} \times R_{CL} + P_{CC} \times R_{CC}) \times t_{CR} + P_{TC} \times R_{TC} \quad (3.2)$$

P_{CL} : クーラント供給装置の電気容量 [kW]

P_{CC} : 切りくず搬送装置の電気容量 [kW]

P_{TC} : ATC装置の電気容量 [kW]

R_{CL} : クーラント供給装置の加工状態中の稼働率 [%]

R_{CC} : 切りくず搬送装置の加工状態中の稼働率 [%]

R_{TC} : ATC装置の加工状態中の稼働数 [回]

t_{CR} : ワーク1個当たりのサイクルタイム [h]

(ii) 送り系電力量

工具アプローチ, エスケープなどの加工サイクルの無負荷運動時において送り系によって消費される電力量である. これには軸の加減速も含まれ, 送り速度が大きくなるほど, 消費電力量も大きくなる. 送り系電力量 E_{SV} は式(3.3), (3.4)で示すことができる^{3,2)}.

$$E_{SV} = 2\pi / 60 \times n \times T_{SV} \times t_{SV} \quad (3.3)$$

$$T_{SV} = T_U + T_M \quad (3.4)$$

n : ボールねじ回転数 [min^{-1}]

T_{SV} : サーボモータトルク [Nm]

T_U : 軸摩擦トルク [Nm]

T_M : ボールねじの作動トルク [Nm]

t_{SV} : 送り軸稼働時間 [h]

(iii) 主軸系電力量

加工サイクル中の工具, ワーク回転において主軸系にて消費される電力量である. これには主軸の加減速も含まれ, イナーシャが大きい, 回転数が大きいほど消費電力量も大きくな

る。また、主軸予圧の影響も受けると考えられる。主軸系電力量 E_{SP} は式(3.5)で示すことができる^{3.2)}

$$E_{SP} = 2\pi / 60 \times n \times T_{SP} \times t_{SP} \quad (3.5)$$

T_{SP} : スピンドルモータトルク [Nm]

t_{SP} : 主軸軸稼働時間 [h]

(iV) 切削負荷電力量

切削負荷により送り系、主軸系モータに生じる消費電力となる。切削負荷電力は切削抵抗とサイクルタイムに影響される。切削抵抗は加工方法、工具によって異なる。また、サイクルタイム短縮を図り切削条件を高く設定すると、切削抵抗が増加するというトレードオフの関係となる。これらより、切削負荷電力量は単位除去量あたりにどの程度の電力量が消費されるかを評価するため、発生した消費電力量を単位除去量で除した E_{CF} Wh/mlという関数で評価とする。旋削加工負荷電力 E_{CT} 、ミリング加工負荷電力 E_{CM} は式(3.6)^{3.3)}、ドリル加工 E_{CD} は式(3.7)^{3.4)}、切削負荷電力 E_{CF} は式(3.8)で示すことができる。

$$E_{CT} = E_{CM} = Q \times k_c / 60000 / \eta / A_c \quad (3.6)$$

$$E_{CD} = HB \times D^{0.68} \times V^{1.27} \times f^{0.59} / 3600 / A_c \quad (3.7)$$

$$E_{CF} = E_{CT} + E_{CM} + E_{CD} \quad (3.8)$$

Q : 加工能率 [ml/min]

k_c : 比切削抵抗 [MPa]

η : 機械効率

HB : 被削材ブリネル硬さ[HB]

D : ドリル直径 [mm]

V : 切削速度 [m/min]

f : 送り速度 [mm/rev.]

A_c : 各工程あたりの切削除去量 [ml]

3.3 消費電力量の評価方法

第3.2節より，本研究では工作機械における消費電力量を2つに分類した．これらの総和が工作機械で消費される電力量となる．一方，工作機械はいかにダウンタイムをなくし，多くのワークを生産することが重要である．つまり，ワーク1個あたりのコストが非常に重要となる．そこで，本研究では電源投入時よりワーク1個加工する際の総消費電力量 E_{TO} を評価関数とする． E_{TO} は式(3.9)のように示すことができる．

$$E_{TO} = E_{ST} + E_{PD} + E_{SV} + E_{SP} + E_{CF} \times A_{CW} \quad (3.9)$$

A_{CW} : ワーク1個あたりの切削除去量 [ml]

以上より，この式(3.9)を用いて工作機械における消費電力量を評価する．なお，これらの消費電力量は旋削用主軸モータの駆動方式，つまりベルト駆動やダイレクトドライブによる機械効率などによる機械特性，低抵抗工具による切削負荷電力量の低減などの加工特性が大きな影響を及ぼす．

3.4 消費電力量の測定方法

消費電力量の測定には，つぎに述べる方法がある．

- (1) 電力計を用いた測定法
- (2) NCデータ用ソフトウェアを用いた測定

本研究では(1)の方法を用いた．まず，図 3.2 に示すように機械入力電源部および各周辺機器ブレーカーにクランプ式のワットメータ CW240(横河メータ&インスツルメンツ(株)製)を取り付け，有効電力 P_{ac} [W]を測定した．そして，この有効電力 P_{ac} を測定時間 t [s]で積算した値を消費電力量 E [Wh]とした(式(3.10))．ワットメータの仕様を表 3.2，概要を図 3.3 に示す^{3,5)}．各状態での消費電力量測定方法を下記に述べる．なお，ばらつきを考慮するため，消費電力量の測定は 3 回行ない，平均値で評価した．

$$E = \int_0^t P_{ac} dt \quad (3.10)$$

(I) 待機電力量

運転準備状態にし，機械電源入力部にワットメータを取り付けて機械の総有効電力を測定し，式(3.10)を用いて待機電力量 E_{ST} を測定した．

(II)加工消費電力量

(ii) 送り系電力量

(iii) 主軸系電力量

前述の消費電力量を測定するためには、送り系、主軸系のサーボアンプにワットメータのプローブを接続する必要がある。しかし、これらのアンプは高周波で動作をしており、本研究で使用したワットメータでは測定が困難である。そのため、同じ加工サイクルにて無負荷運転を行ない、その際の消費電力量を機械入力部にて測定した。その後、(I)待機電力量を減算したものを合わせて送り系、主軸系電力量とした。

(iv) 切削負荷電力量

実加工を行い、その際の消費電力量を機械電源入力部にて測定した。その後、(II)待機電力量、(ii)送り系電力量、(iii)主軸系電力量を減算した値を切削負荷電力量 E_{CF} とした。

Table 3.2 The specification of Wattmeter

Voltage range	150.0/300.0/600.0/1000V
Current range	20.00/50.00/100.0/200.0A
Sampling time	1/2/5/10/15/30sec, 1/2/5/10/15/30/60min



(a) Input power supply



(b) Auxiliary machine breaker

Fig.3.2 The method of measurement on electric power



Fig.3.3 Wattmeter CW240

3.5 まとめ

本章では，工作機械において消費される電力量を運転状態から分類した．また，それらの評価方法，測定方法について述べた．本章の研究で得られた主な結論は以下の通りである．

- (1) 工作機械における消費電力量を待機電力量，加工消費電力量の2つに分類した．
- (2) 待機電力量は運転準備状態における油圧機器，クーラントポンプなどの周辺機器により消費される電力量である．
- (3) 加工消費電力量は加工状態における消費電力量であり，周辺機器，主軸系，送り系による消費電力量，および加工により消費される電力量が含まれる．
- (4) 加工消費電力量は切削除去量で除算した値にて評価した．
- (5) 消費電力量は機械電源入力部，周辺機器ブレーカーにクランプ式ワットメータを接続し，測定した．

参考文献

- 3.1) DMG森精機株式会社，MPO-M-0344 省電力を考慮したNCプログラム生成装置，平成26年 1月20日．
- 3.2) 成田浩久，河村浩志，則久孝志，陳連怡，藤本英雄，長谷部考男，工作機械による加工の環境負荷予測システムの開発(第1報，環境負荷の算出手法の提案)，日本機械学会論文集(C編)，**71**，704 (2005) 280.
- 3.3) 例えば住友電工ハードメタル株式会社，切削工具カタログ，(2014) N15.
- 3.4) 例えば住友電工ハードメタル株式会社，切削工具カタログ，(2014) N25.
- 3.5) 横河メータ&インスツルメンツ株式会社 HP，
<http://www.yokogawa.com/jp-yimi/gmi/clamp-on-powermeters/gmi-cw240-001-jp.htm>，CW240クランプ電力計.

第 4 章 切削加工試験

4.1 はじめに

本章では、本研究で使用した工作機械，加工方法，使用工具を述べる．第2章で述べた旋盤型複合工作機械のみならず，旋盤，マシニングセンタなど多くの工作機械があるが，DMG森精機で製作している工作機械を対象とし，各工作機械において一般的に行われる加工について考察をする．

本章の第4.2節では使用工作機械および加工方法，第4.3節では使用工具，切削条件，被削材の概要，第4.4節では工具摩耗観察方法，第4.5節では以上をまとめた第4章の結論について述べる．

4.2 使用工作機械および加工方法

DMG森精機で製作している工作機械を用いて行われる加工は，大きく分けて下記の3つである．(2),(3)は広義においてはミリング加工であるが，ワークを傾斜させるため加工パラメータが増え，加工現象が異なるために分けることとした．この3つの加工を行うために使用した工作機械の概要および仕様について述べる．

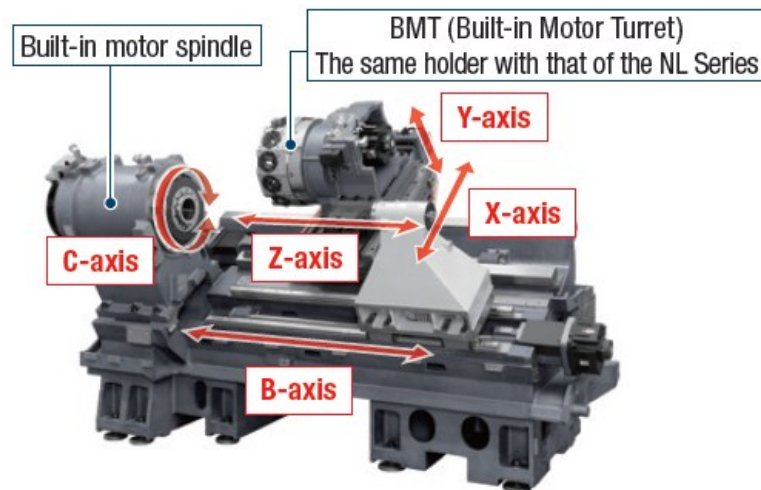
- (1) 旋削加工(外径加工，内径加工，溝入れ加工，ねじ切加工など)
- (2) ミリング加工(正面加工，側面加工，穴あけ加工，ねじ切加工など)
- (3) 傾斜ミリング加工

4.2.1 旋削加工

旋削加工はCNC複合旋盤NLX2500を使用した．この機械は第1.1節で述べた複合旋盤にあたる．図4.1はNLX2500の概観および構造，表4.1は機械仕様を示す^{4.1)}．この機械は刃物台を備えた旋盤であり，刃物台の回転により工具交換を行う．また，直進軸であるX，Y，Z軸の3軸にて構成されている．X軸は刃物台の上下運動，Z軸は水平運動，Y軸は30度傾斜軸とX軸を同期運動させる創生軸である．なお，ミリング機能，第2主軸を備えている複合旋盤であるが，Y軸とともに本研究では使用していない．本研究では最も多く行われる外径，端面加工を対象とした．そのほか，内径加工，溝入れ加工などもあるが，広義において内径加工は外径加工，溝入れ加工は端面加工と同様とみなすことができる．



(a) Overview



(b) Structure

Fig.4.1 The overview and structure of CNC lathe NLX2500SY

Table 4.1 The specification of CNC lathe NLX2500SY

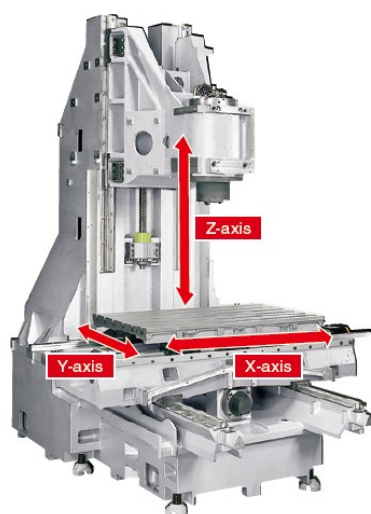
Max. turning diameter [mm]	366
Max. turning length [mm]	705
Stroke X/Z [mm]	260/795
Spindle max. speed [min^{-1}]	4000
Basal spindle speed N_b [min^{-1}]	350
Chuck size [inch]	10
Max. feed rate [m/min]	30
Spindle motor power output [kW]	18.5/15 [20 %ED/const.]
Linear-axis motor output X/Y/Z [kW]	3.0

4.2.2 ミリング加工

ミリング加工は3軸制御立形マシニングセンタNV5000 α 1/40を使用した。図4.2はNV5000の概観および構造、表4.2は機械仕様を示す^{4.2)}。この機械は直線軸であるX、Y、Z軸の3軸にて構成されている。X軸はテーブルの左右運動、Y軸はサドルの前後運動、Z軸は主軸の上下運動である。工具交換はATC(Automatic Tool Changer)にて行う。本研究では面加工であるフェイスミル加工、側面加工であるエンドミル加工、穴あけ加工であるドリル加工を対象とした。そのほか、ポケット加工、タップ加工、ボーリング加工などもあるが、広義においてポケット加工はエンドミル加工、タップ加工、ボーリング加工はドリル加工と同様とみなすことができる。



(a) Over view



(b) Structure

Fig.4.2 The overview and structure of 3axis vertical machining center NV5000 α 1/40

Table 4.2 The specification of 3axis vertical machining center NV5000α1/40

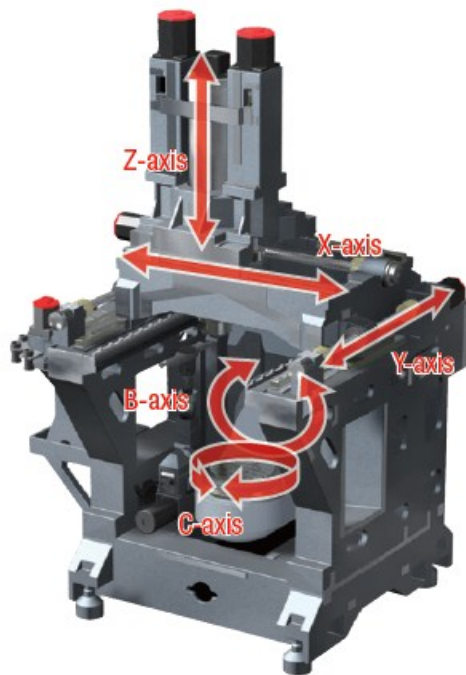
Spindle power [kW]	22/18.5 [30min. / const.]
Spindle speed [min^{-1}]	14000
Spindle bearing inner diameter [mm]	65
Type of spindle taper	7/24 taper , No.40
Max. feed rate X/Y/Z [m/min]	42
Feed acceleration X/Y/Z [G]	0.43/0.39/0.74
Stroke X/Y/Z [mm]	800/510/510
Servo motor output X/Y/Z [kW]	3.0/3.0/5.5
Guide way	Liner roller guide

4.2.3 傾斜ミリング加工

傾斜ミリング加工は5軸制御立形マシニングセンタNMV3000DCGを使用した。図4.3はNMV3000DCGの概観および構造、表4.3は機械仕様を示す^{4,3)}。この機械は直線軸であるX, Y, Z軸の3軸とB軸とC軸の旋回、回転の2軸にて構成されている。X軸は主軸の左右運動、Y軸は主軸の前後運動、Z軸は主軸の上下運動、B軸はテーブルの旋回運動、C軸はテーブルの回転運動であり、B軸の旋回運動により工具を相対的に傾斜させる。工具交換はATCにて行う。本研究ではB軸を傾斜し加工を行う、傾斜ミリング加工を対象とした。5軸制御マシニングセンタは全軸同時運動を行う同時5軸加工も行われるが、加工現象としては傾斜ミリング加工と同様とみなすことができる。



(a) Overview



(b) Structure

Fig.4.3 The overview and structure of 5axis vertical machining center NMV3000DCG

Table 4.3 The specification of 5 axis vertical machining center NMV3000DCG

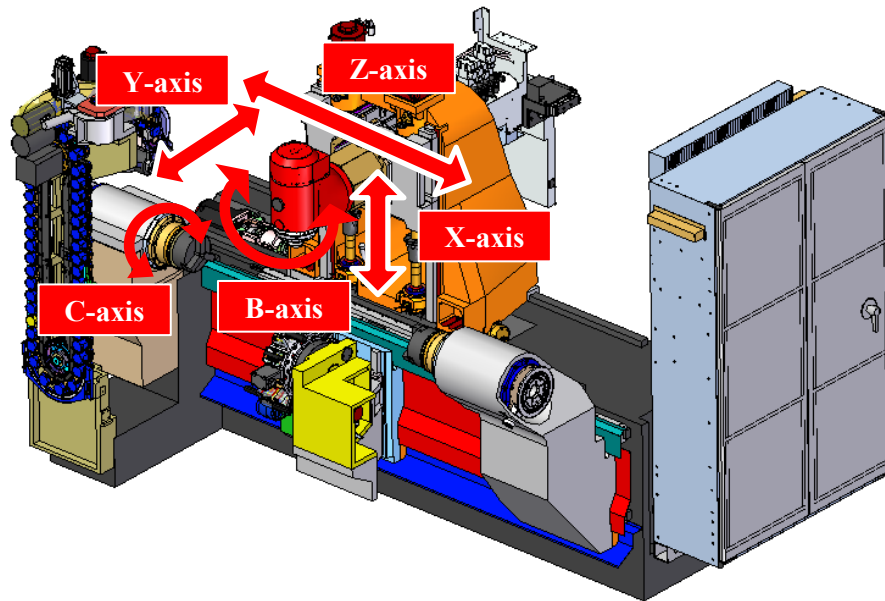
Spindle power [kW]	18.5
Spindle speed [min^{-1}]	12000
Spindle bearing inner diameter [mm]	70
Type of spindle taper	7/24 taper , No.40
Maximum feed rate [m/min]	50
Feed acceleration [G]	1.0
Stroke X/Y/Z [mm]	500×350×510
Servo motor output X/Y/Z [kW]	4.0/3.0/3.0
Guide way	Linear roller guide

4.2.4 複合工作機械における旋削およびミリング加工

さらに、前述した旋削、ミリング、傾斜加工は第2章で述べた旋盤型複合工作機械でも加工が可能である。そこで、従来は旋盤、マシニングセンタを用いて工程分割を行っていた旋削加工、ミリング加工を対象とし、工程集約が可能な旋盤型複合工作機械NTX2000/1500SZを使用した。図4.4はNTX2000/1500SZの概観および構造、表4.4は機械仕様を示す^{4,4)}。この機械は旋削主軸2本とミリング主軸1本を有している。また、第2章で述べたように送り系には直進軸系と旋回軸系があり、直進軸にはX、Y、Z軸の3軸、旋回軸にはB、C軸の2軸にて構成されている。工具交換はマシニングセンタと同様に、ATCにて行う。



(a) Overview



(b) Structure

Fig.4.4 The overview and structure of multi-functional machine tool NTX2000/1500SZ

Table 4.4 The specification of multi-functional machine tool NTX2000/1500SZ

Max. turning diameter [mm]	610
Max. turning length [mm]	1540
Stroke X/Z/Y [mm]	495/125/1560
Turning spindle power [kW]	22.5/18.5 [30min. / const.]
Turning spindle max. speed [min^{-1}]	5000
Basal spindle speed N_b [min^{-1}]	1100
Chuck size [inch]	8
Milling spindle power [kW]	18.5/11 [10min. / const.]
Milling spindle max. speed [min^{-1}]	12000
Type of spindle taper	Capto 6
Max. feed rate [m/min]	40
Linear-axis motor X/Y/Z [kW]	5.5/2.7/6.0
B axis stroke [deg.]	± 120
Rotary-axis motor B [kW]	1.2

4.3 使用工具，切削条件および被削材

旋削加工やミリング加工などの一般的な加工においては，専用工具を用いる加工と比較し，切削速度，送り速度，切込み量などの切削条件が比較的自由に選択できる．そのため，本研究では各加工において，工具メーカ推奨条件範囲内にて切削条件を種々変化させて加工を行った．また，被削材は対象ワークにあわせて選定した．なお，本節で述べる工具，切削条件等は基礎実験である消費電力量測定に用いるものであり，ケーススタディに用いるものは第7章にて述べる．ここで実用条件範囲にてテストするとは，次のことを意味する．

- (1) メーカの推奨条件範囲内に工具寿命があること．これは本研究において工具コストを計算に入れないことの代替えである．
- (2) 生産性が妥当な範囲内にあること．これは最適化のプロセスで機械チャージを計算に入れないことの代替えである．妥当性は使用工具に応じた単位時間当たりの切りくず除去量 ml/minで判断する．この値が適切な範囲内になければならない．
- (3) 切削条件が過酷で，切削抵抗が機械の許容限界を超えて，過大にならないこと．
- (4) クーラントは使用しない．これを使用すると，クーラント供給ポンプを常時稼働させねばならず，その消費電力量はかなりの量に達する．つまり消費電力量は，クーラント供給ポンプの運転時間に大きく依存するためである．なお，ドリル加工においては切りくず詰まりによる工具破損の可能性があり，(1)の条件を満たすことができないため，クーラントを使用することとする．

4.3.1 CNC旋盤における旋削加工

CNC旋盤における旋削加工は，被削材をチャックに取り付けた生爪にて把握して加工を行った．図4.5は加工実験の概要を示す．

被削材は機械構造用として広く用いられている炭素鋼S45Cとし，直径120 mm，長さ120 mmのものを用いた．工具は25 mm角バイトに刃先角度80°，ノーズ半径0.8 mmのAl₂O₃+TiCN系コーティングインサートを取り付けて用いた．図4.6は工具の概観，表4.5は工具仕様^{4,5)}，表4.6は切削条件を示す．切削条件は工具メーカ推奨条件内にて決定した．加工パスは被削材外周における直線旋削加工，被削材端面における直線端面加工とした．図4.7は加工パスを示す．図4.7に示すように，工具交換位置より早送りG00，切削送りG01にてアプローチ，切削送りG01にて旋削加工を行い，早送りG00にて工具交換位置まで戻るというサイクルを用いた．

一般的に，旋削加工は切削速度一定制御を用いて加工が行われる．つまり，外径，端面加工のように加工径が徐々に変化していく加工においては，そのつど主軸回転数が変化する．一方，CNC旋盤の主軸に用いられるサーボモータには，回転数により主軸特性が異なる．具

体的には、主軸回転数が高くなるほど出力が大きくなる一方で、トルクが小さくなる。この主軸出力が大きくなり一定になり、かつ主軸トルクが小さくなり始める回転数を基底回転数という。すなわち、切削速度一定制御を用いる加工においては、この基底回転数が大きな影響を及ぼすと考えられる。そこで、基底回転数に着目し、主軸回転数が消費電力量に及ぼす影響を検証した。なお、旋削加工の場合、主軸回転数を変更すると切削速度も変化するが、工具推奨条件範囲内に切削速度が設定されるよう、ワーク加工径も変更しながら行った。

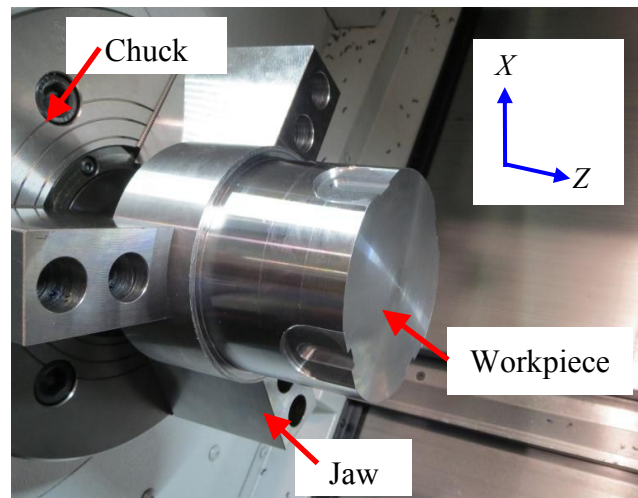


Fig.4.5 The overview of experimental method using CNC lathe



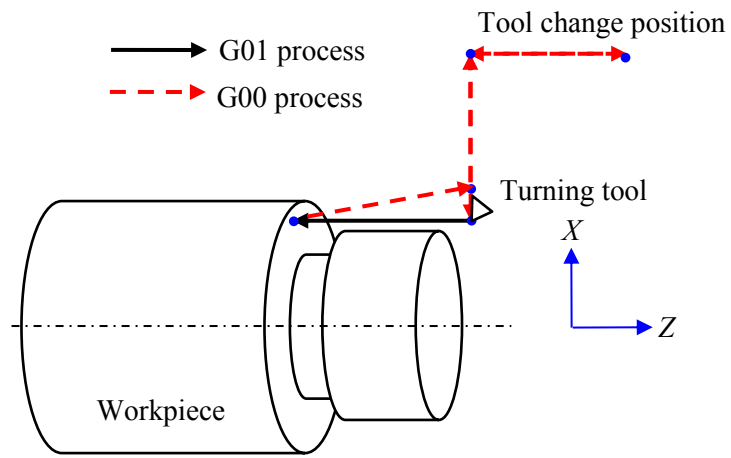
Fig.4.6 The overview of turning tool

Table 4.5 The specification of turning tool

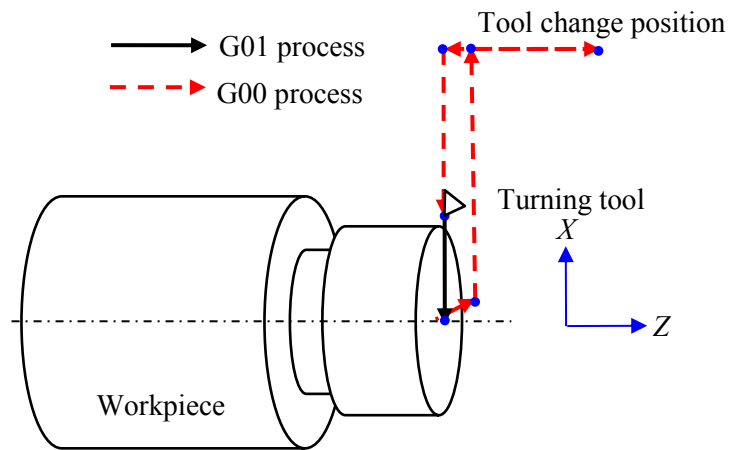
Holder	Type	PCLNR2525-43 (SUMITOMO ELECTRIC HARDMETAL CORP.)
	Insert holding	Lever lock system
	Insert shape [deg.]	80
	Approach angle [deg.]	95
	Insert flank angle [deg.]	0
	Hand	Right
	Shank size [mm]	25
Insert	Type	CNMG120408N-GU AC820P (SUMITOMO ELECTRIC HARDMETAL CORP.)
	Insert shape [deg.]	80
	Flank angle [deg.]	0
	Inscribed circle[mm]	12
	Thickness [mm]	4.76
	Nose radius [mm]	0.8
	Coating	Al ₂ O ₃ /TiCN series

Table 4.6 Cutting conditions on turning

Cutting speed V [m/min]	120~200
Feed rate f [mm/rev.]	0.2
Depth of cut a_p [mm]	2
Cutting length L [mm]	10
Material removal Q [ml]	7.4
Coolant	Dry



(a) Outside turning



(b) Face turning

Fig.4.7 The cutting path on outside and face turning

4.3.2 3軸制御立形マシニングセンタにおけるミリング加工

3軸制御立形マシニングセンタにおけるフェイスミル，エンドミル，ドリル加工は全て同じ段取りとし，被削材をテーブル上面に固定したマシンバイスにてクランプし，加工を行った．図4.8は加工実験の概要を示す．被削材は機械構造用として広く用いられている炭素鋼S45Cとし，120 mm×120 mm×50 mmのものを用いた．

ミリング加工は切削速度，送り速度などの切削条件が比較的自由に選定できる．また，旋削加工よりも切削パラメータが多い．これらのパラメータを工具メーカ推奨条件内で総当り実験を行うと，非常に実験回数が多くなる．そこで，実験計画法のL9直交表にて実験条件を決定し^{4,6)}，省エネルギーとなる切削条件を検証した．

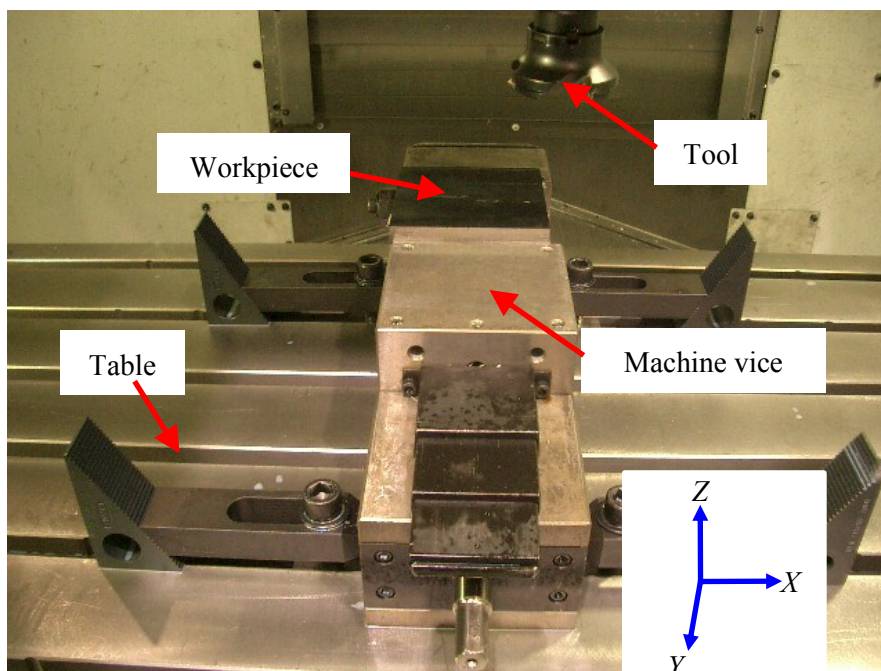


Fig.4.8 The overview of experimental method using 3 axis machining center

フェイスミル加工においては， $\Phi 80$ mmの4枚刃フェイスミルにTiAlN/AlCrN系コーティングインサートを取り付けて用いた．図4.9はフェイスミルの概観，表4.7は切削条件，表4.8はフェイスミルの仕様^{4,7)}，表4.9はL9直交表に当てはめた実験条件を示す．直交表の3水準は工具メーカ推奨条件の下限值，中央値，上限値とした．図4.10はフェイスミル加工の加工パスを示す．図4.10に示すように，被削材上面をフェイスミルにて2パスで加工した．工具交換位置より早送りG00，切削送りG01にてアプローチ，切削送りG01にて上面加工を行い，早送りG00にて次の加工位置へ移動，加工終了後，早送りG00にて工具交換位置まで戻るといふサイクルを用いた．



Fig.4.9 The overview of face mill

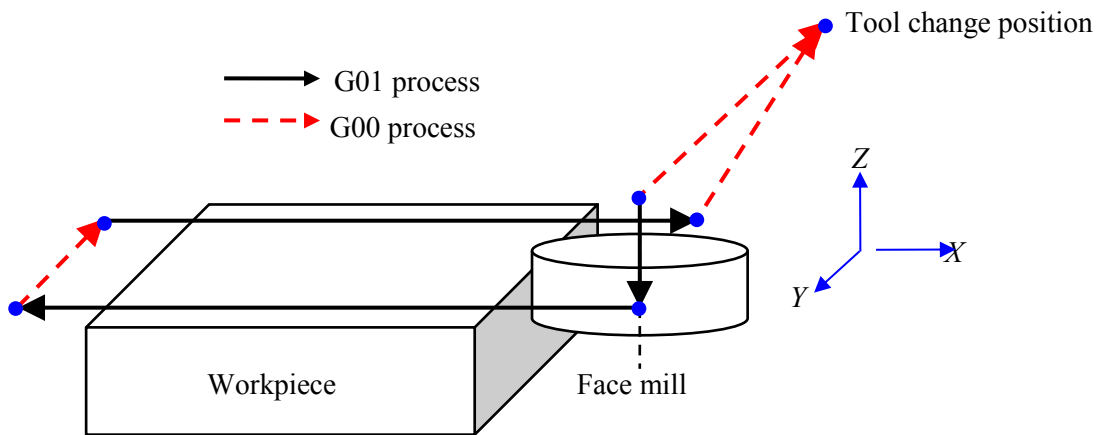


Fig.4.10 The cutting path on face milling

Table 4.7 Cutting conditions on face milling

Cutting speed V [m/min]	175, 200, 250
Feed rate f [mm/tooth]	0.1, 0.2, 0.3
Axial depth of cut a_p [mm]	1.0, 1.5, 2.0
Radial depth of cut a_e [mm]	30, 45, 60
Material removal Q [ml]	10, 15, 20
Coolant	Dry

Table 4.8 The specification of face milling

Holder	Type	MBT40-FMA25.4-45 (Nikken Kosakusho Works, Ltd)
Body	Type	WGC4080R (SUMITOMO ELECTRIC HARDMETAL CORP.)
	Diameter [mm]	80
	The number of teeth	4
	Approach angle [deg.]	45
	Axial rake angle [deg.]	20~22
	Radial rake angle [deg.]	-20~-24
Insert	Type	SEMT13T3AGSN-G ACP200 (SUMITOMO ELECTRIC HARDMETAL CORP.)
	Length [mm]	13.4
	Thickness [mm]	3.97
	Rake angle [deg.]	20
	Flank angle [deg.]	20
	Coating	TiAlN/AlCrN series multi-layer

Table 4.9 Experimental conditions of end milling using L9 orthogonal array

Experimental number	Parameter				
	No.	V [m/min]	f [mm/tooth]	a_p [mm]	a_e [mm]
1	175	0.1	1.0	30	
2	175	0.2	1.5	45	
3	175	0.3	2.0	60	
4	200	0.1	1.5	60	
5	200	0.2	1.0	30	
6	200	0.3	1.0	45	
7	250	0.1	2.0	45	
8	250	0.2	1.0	60	
9	250	0.3	1.5	30	

エンドミル加工においてはTiAlCr/TiSi系コーティングを施した $\Phi 10$ mmの2枚刃エンドミルを用いた。図4.11はエンドミルの概観、表4.10はエンドミルの仕様^{4,8)}、表4.11は切削条件、表4.12はL9直交表に当てはめた実験条件を示す。直交表の3水準は工具メーカー推奨条件の下限値、中央値、上限値とした。図4.12はエンドミル加工の加工パスを示す。図4.12に示すように、被削材の側面をエンドミルにて1パスで加工した。工具交換位置より早送りG00、切削送りG01にてアプローチを行ない、切削送りG01にて側面加工後、早送りG00にて工具交換位置まで戻るというサイクルを用いた。



Fig.4.11 The overview of end mill

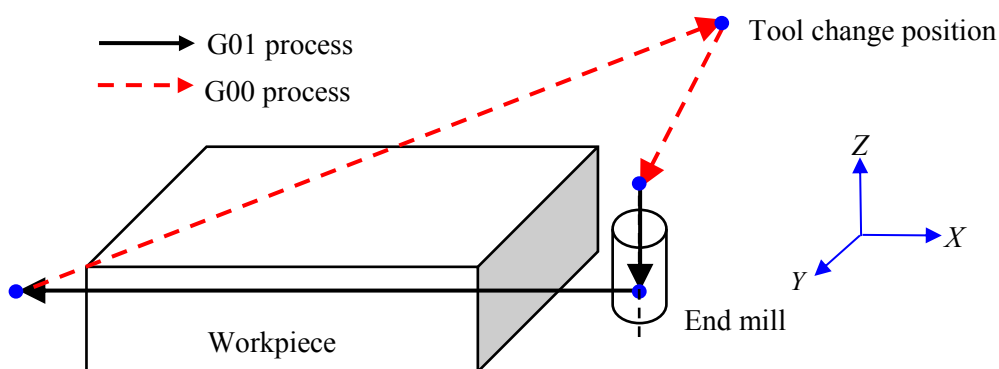


Fig.4.12 The cutting path of end milling

Table 4.10 The specification of end milling

Holder	Type	BT40-FHMC20-75 (BIG DAISHOWA SEIKI CO LTD)
Collet	Type	CCK20-16 (Nikken Kosakusho Works, Ltd)
End mill	Type	GSX21000C-3D (SUMITOMO ELECTRIC HARDMETAL CORP.)
	Diameter [mm]	10
	The number of flute	2
	Helix angle [deg.]	30
	Flute length [mm]	30
	Nose radius [deg.]	0 (with gash land)
	Coating	TiAlCr/TiSi series multi-layer
	Overhang [mm]	42

Table 4.11 Cutting conditions on end milling

Cutting speed V [m/min]	50, 90, 130
Feed rate f [mm/tooth]	0.05, 0.10, 0.15
Axial depth of cut a_p [mm]	5, 10, 15
Radial depth of cut a_e [mm]	0.5, 1.0, 1.5
Material removal Q [mm]	0.25~2.25
Coolant	Dry

Table 4.12 Experimental conditions of end milling using L9 orthogonal array

	No.	Parameter			
		V [m/min]	f [mm/tooth]	a_p [mm]	a_e [mm]
Experimental number	1	50	0.05	5.0	0.5
	2	50	0.10	10.0	1.0
	3	50	0.15	15.0	1.5
	4	90	0.05	10.0	1.5
	5	90	0.10	15.0	0.5
	6	90	0.15	5.0	1.0
	7	130	0.05	15.0	1.0
	8	130	0.10	5.0	1.5
	9	130	0.15	10.0	0.5

ドリル加工においては、TiAlCr/TiSi系コーティングを施した $\Phi 10$ mmドリルを用いた。図4.13はドリルの概観、表4.13はドリルの仕様^{4,9)}、表4.14は切削条件、表4.15はL9直交表に当てはめた実験条件を示す。なお、ドリル加工は切削パラメータが2つのみのため、実質総当り実験となる。直交表の3水準は工具メーカー推奨条件の下限値、中央値、上限値とした。図4.14はドリル加工の加工パスを示す。被削材上面に対して3回穴あけ加工を行い、平均の消費電力量を評価した。工具交換位置より早送りG00、切削送りG01にてアプローチ、切削送りG01にて穴あけ加工、早送りG00にて次の加工位置への移動を行ない、加工終了後、早送りG00にて工具交換位置まで戻るといふサイクルを用いた。なお、ドリル加工は切りくず詰まりによる工具破損が懸念されたため、クーラント(バスコ7000(ブラザー・スイスループ(株)製、希釈率7%)を使用した。



Fig.4.13 The overview of drill

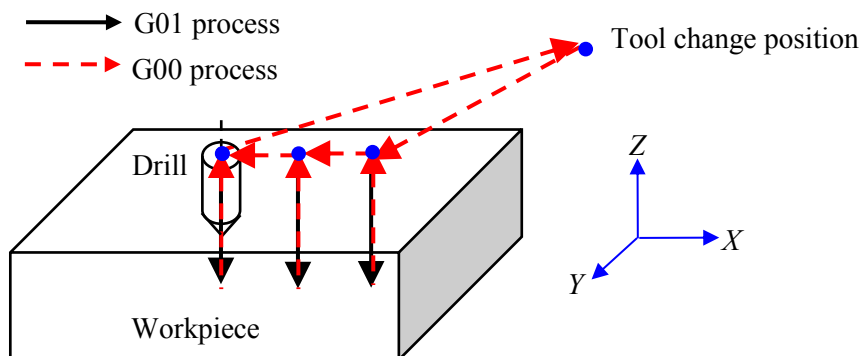


Fig.4.14 The cutting path on drilling

Table 4.13 The specification of drill

Holder	Type	BT40-NBS16-90 (BIG DAISHOWA SEIKI CO LTD)
Collet	Type	NBC16-10 (BIG DAISHOWA SEIKI CO LTD)
Drill	Type	MDW1000GS2 (SUMITOMO ELECTRIC HARDMETAL CORP.)
	Diameter [mm]	10
	Leading edge angle [deg.]	135
	Helix angle [deg.]	30
	Flute length [mm]	41
	Coating	TiAlCr/TiSi series multi-layer
	Overhang [mm]	44

Table 4.14 Cutting conditions on drilling

Cutting conditions V [m/min]	50, 90, 130
Feed rate f [mm/tooth]	0.20, 0.28, 0.35
Depth of hole a_p [mm]	20
Material removal Q [ml]	1.6
Coolant	External

Table 4.15 Experimental conditions of drilling using L9 orthogonal array

Experimental number	Parameter	
	No.	V [m/min]
1	50	0.20
2	50	0.28
3	50	0.35
4	90	0.20
5	90	0.28
6	90	0.35
7	130	0.20
8	130	0.28
9	130	0.35

4.3.3 5軸制御立形マシニングセンタにおける傾斜ミリング加工

5軸制御立形マシニングセンタにおける傾斜ミリング加工においては、 $\Phi 20$ mmのボールエンドミルにTiAlN/AlCrN系コーティングのインサートを取り付けて使用した。図4.15は加工実験の概要を示す。図4.16はボールエンドミルの概観を示す。また、表4.16はボールエンドミルの仕様^{4,10}、表4.17は切削条件を示す。切削条件は工具メーカ推奨条件の中央値とした。図4.17はエンドミル加工の加工パスを示す。図4.17に示すように、ボールエンドミル加工の代表的なモデルとして、傾斜角度 θ を持つ傾斜面を等高線状に切削する場合を検討した。傾斜切削では一般的である1, 2, 3の順のように高さの高い方から低い方へピックフィードが与えられるものとした。切込み深さ a_p は傾斜面の法線方向に1.0 mmとし、1パス加工時の切削除去量は0.38 mlとして加工を行った。なお、傾斜軸であるB軸は機械的にクランプを行った。

傾斜角度 θ と消費電力量の関係を調査するために、傾斜角度 θ を0度から60度まで5度毎に変更し、消費電力量および加工面の仕上げ面粗さを測定した。仕上げ面粗さはForm Talysurf PGI420 (Taylor Hobson(株)製)を用いて算術平均粗さ R_a の測定を行った。図4.18は仕上げ面粗さ測定方法を示す。図4.18に示すように、ピックフィード方向に仕上げ面粗さ測定器の触針を走査させて測定した。また、消費電力量結果の妥当性を確認するため、主軸ロード値も測定した。主軸ロードはPCとCNCをLANケーブルにて接続して、PC上のソフトウェアSERVO GUIDE (FANUC(株)製)を用いて測定した。さらに、実用的な範囲である条件であるかを検証するため、工具寿命試験も行った。

試験は同一工具で加工を行い、逃げ面摩耗量を測定した。逃げ面摩耗量の測定方法は第4.4節にて述べる。傾斜ミリング加工は金型加工などで多く使用されるため、被削材は金型用として広く用いられている熱間工具鋼SKD61とし、100 mm×100 mm×50 mmのサイズのものを用いた。被削材をテーブル上面に固定したマシンバイスにてクランプし、加工を行った。

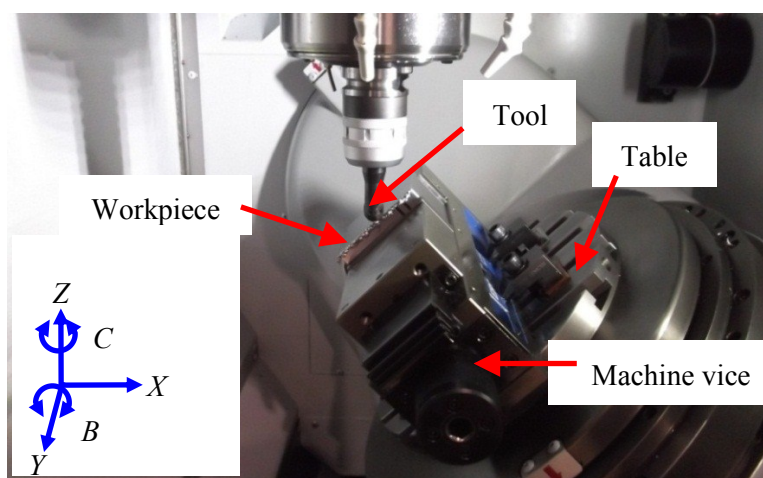


Fig.4.15 The overview of experimental method using 5 axis machining center



Fig.4.16 The overview of ball end mill

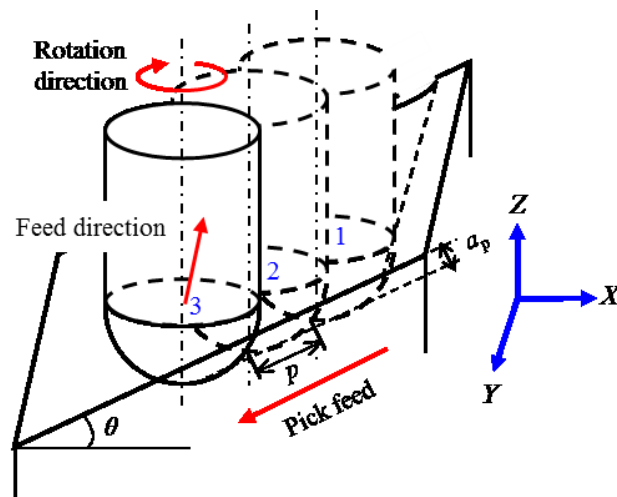


Fig.4.17 The cutting path on inclined milling

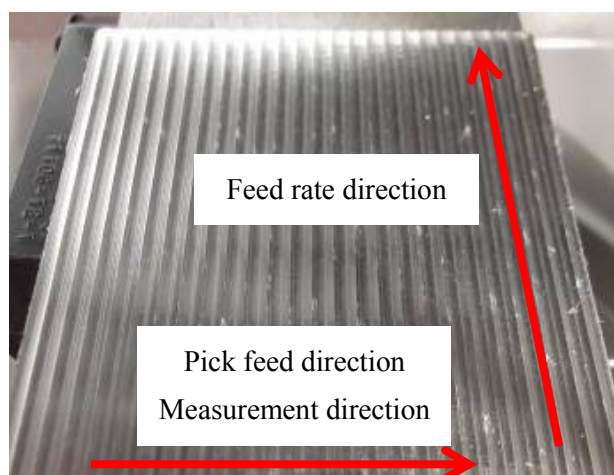


Fig.4.18 The method of measurement for surface roughness

Table 4.16 The specification of ball end mill

Holder	Type	BT40-C25-90 (Nikken Kosakusho Works, Ltd)
Body	Type	WBMR2200S (SUMITOMO ELECTRIC HARDMETAL CORP.)
Insert	Type	Center teeth : ZNMT1804100-C ACP300 Outer teeth : ZNMT2004100-S ACP300 (SUMITOMO ELECTRIC HARDMETAL CORP.)
	Diameter [mm]	20
	Rake angle [deg.]	-10
	Flute length [mm]	20
	Coating	TiAlN/AlCrN series multi-layer
	Overhang [mm]	61

Table 4.17 Cutting conditions on ball end milling

Cutting speed V [m/min]	80
Feed rate f [mm/tooth]	0.15
Normal depth of cut a_p [mm]	1.0
Pick feed p [mm]	4.0
Inclined angle θ [deg.]	0~60
Cutting length [mm]	100
Material removal [ml]	0.38
Coolant	Dry

4.3.4 旋盤型複合工作機械における旋削，ミリング加工

複合工作機械は前述した旋削，ミリング，傾斜ミリング加工の全てが行える．そこで，複合工作機械では各加工における消費電力量の測定，分析を行ない，どの加工方法が最も省エネルギーであるかを検証することとした．そのため，加工消費電力量を主軸系，送り駆動系に分けて評価する．さらに，待機電力量を含む全消費電力量を評価した．アプローチ，エスケープ，加工中などの早送りG00，切削送りG01運動中の消費電力の時間的変化，それらを総和した消費電力量を比較した．なお，傾斜ミリング加工は一般的に中仕上げ，仕上げ加工に用いられ，表4.14からもわかるように切削除去量がほかの加工方法と比較してかなり小さくなるため，対象外とする．

旋盤型複合工作機械における旋削，フェイスミル，エンドミル，ドリル加工は全て同じ段取りとし，被削材をチャックに固定した硬爪にてクランプし，加工を行った．図4.19は加工実験の概要を示す．被削材はとして広く用いられているダクタイル鋳鉄FCD450とし， $\Phi 120$ mm，長さ120 mmのものを用いた．全消費電力量を評価するために，アプローチ，エスケープ等の運動も極力同じであることが望ましい．そのため，加工パスは制御ソフトウェアMAPPSに備わっている自動プロである対話機能を用いて作成した^{4.11)}．

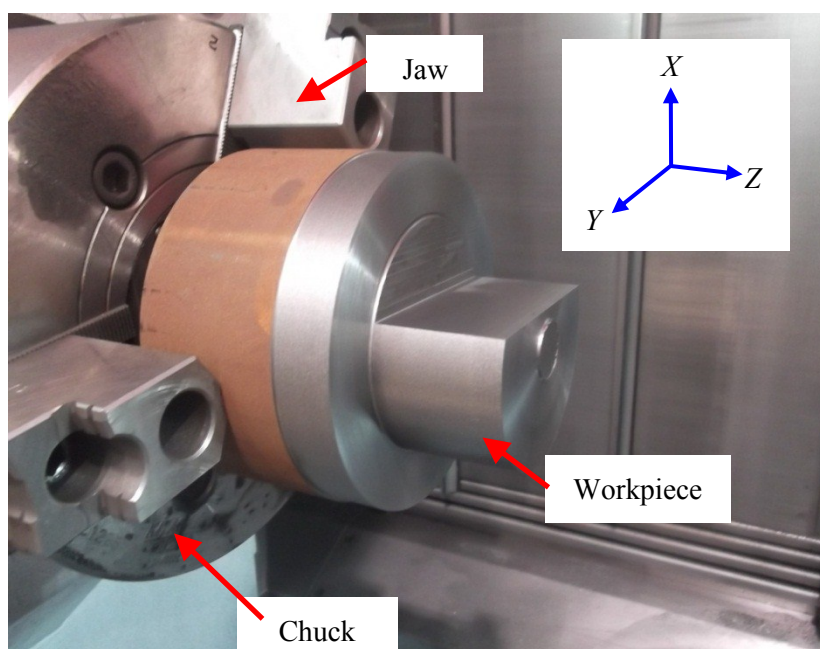


Fig.4.19 The overview of experimental method using multi-function machine tool

(1) 旋削加工

旋削型複合工作機械における旋削加工は25 mm角バイトに刃先角度60°, ノーズ半径0.8 mmのノンコートインサートを取り付けて, ホルダにクランプして用いた. 図4.20は旋削工具の概観, 表4.18は旋削工具の仕様^{4,12)}, 表4.19は切削条件を示す. 切削条件は工具メーカ推奨条件範囲とし, 中央値を太文字で示した. 図4.21は対話機能にて作成した外周旋削加工の加工パスを示す. 図4.21に示すように, 被削材外周を10 ml分だけ, Z軸をマイナス方向へ直線加工を行う. 工具交換位置より早送りG00にてアプローチ点へ運動, 切削送りG01にて切削開始点へ運動, 切削送りG01にて外周旋削加工を行い, 切削送りG01にて切削終了点からエスケープ点まで運動, 早送りG00にて退避位置まで運動, 早送りG00にて工具交換位置まで運動するというサイクルを用いた. また, サイクルスタート時刻を t_0 s, 工具交換位置からアプローチ点に達したときの時刻を t_1 s, 切削開始時刻を t_2 s, 切削終了時刻を t_3 s, 旋削工具がエスケープ点に達したときの時刻を t_4 s, 工具交換位置に達したときの時刻を t_5 sとする.



Fig.4.20 The overview of turning tool

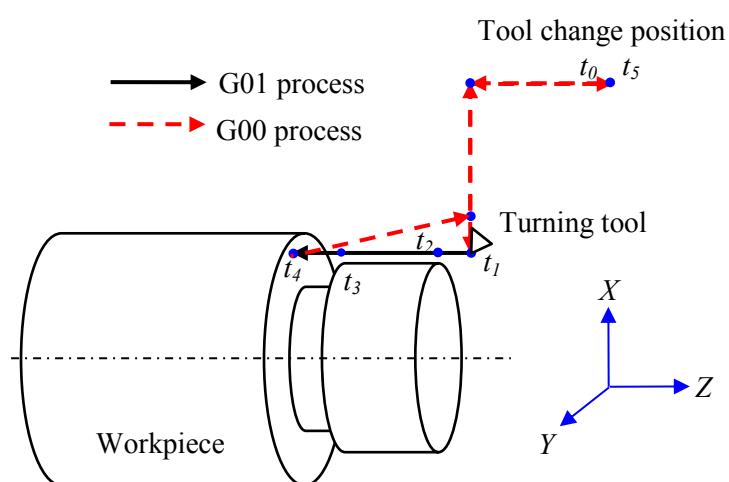


Fig.4.21 The cutting path on outside turning

Table 4.18 The specification of turning tool

Holder	Type	AC6-ABSB101-622R0 (BIG DAISHOWA SEIKI CO LTD)
Body	Type	FP21R-44B (SUMITOMO ELECTRIC HARDMETAL CORP.)
	Insert holding	Clamp on
	Insert shape [deg.]	60
	Approach angle [deg.]	91
	Hand	Right
	Shank size [mm]	25
Insert	Type	TPMN220408 G10E (SUMITOMO ELECTRIC HARDMETAL CORP.)
	Insert shape [deg.]	60
	Flank angle [deg.]	11
	Inscribed circle [mm]	22
	Thickness [mm]	4.76
	Nose radius [mm]	0.8
	Coating	Non coat

Table 4.19 Cutting conditions on turning

Cutting speed V [m/min]	80, 120 , 160
Feed rate f [mm/rev.]	0.1, 0.2 , 0.3
Depth of cut a_p [mm]	1.0, 2.0 , 3.0
Cutting length L [mm]	10
Material removal [ml]	10
Coolant	Dry

(2) フェイスミル加工

フェイスミル加工はΦ80 mmのフェイスミルに刃先角度60°のノンコートインサートを取り付けて用いた. 図4.22はフェイスミルの概観, 表4.20はフェイスミルの仕様^{4.13}, 表4.21は切削条件を示す. 切削条件は工具メーカー推奨条件範囲とし, 中央値を太文字で示した. 図4.23は対話機能にて作成したフェイスミル加工の加工パスを示す. 図4.23に示すように, 被削材上面を10 ml分加工するように, Y軸のプラス方向へ直線加工を行った. 工具交換位置より早送りG00にてアプローチ点へ運動, 切削送りG01にて切削開始点へ運動, 切削送りG01にて上面フライス加工を行い, 切削送りG01にてフェイスミルが抜けきるまで運動, 早送りG00にて退避位置まで運動, 早送りG00にて工具交換位置まで運動というサイクルを用いた. また, サイクルスタート時刻を t_0 s, 工具交換位置からアプローチ点に達したときの時刻を t_1 s, 切削開始時刻を t_2 s, 切削終了時刻を t_3 s, フェイスミルが抜け切ったときの時刻を t_4 s, 工具交換位置に達したときの時刻を t_5 sとする.



Fig.4.22 The overview of face mill

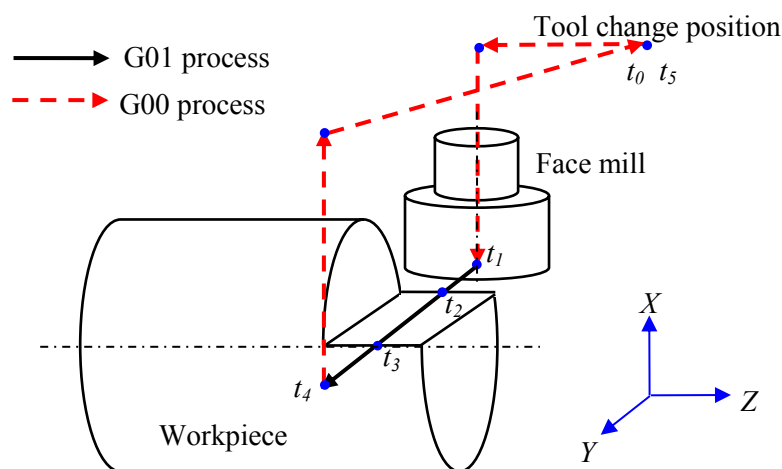


Fig.4.23 The cutting path on face milling

Table 4.20 The specification of face mill

Holder	Type	C6-A391.05-25 030 (BIG DAISHOWA SEIKI CO LTD)
Adopter	Type	(BIG DAISHOWA SEIKI CO LTD)
Body	Type	CPG4080R (SUMITOMO ELECTRIC HARDMETAL CORP.)
	Diameter [mm]	80
	The number of teeth	4
	Approach angle [deg.]	0
	Axial rake angle [deg.]	6
	Radial rake angle [deg.]	0
Insert	Type	TPCH43R G10E (SUMITOMO ELECTRIC HARDMETAL CORP.)
	Thickness [mm]	4.76
	Flank angle [deg.]	11
	Nose radius [mm]	0
	Coating	Non coat

Table 4.21 Cutting condition on face milling

Cutting speed V [m/min]	60, 90 , 120
Feed rate f [mm/tooth]	0.15, 0.20 , 0.25
Axial depth of cut a_p [mm]	1.0, 2.0 , 3.0
Radial depth of cut a_e [mm]	40
Material removal Q [ml]	10
Coolant	Dry

(3) エンドミル加工

エンドミル加工は $\Phi 32\text{mm}$ のエンドミルにTiAlN系コーティングのインサートを取り付けて用いた。図4.24はエンドミルの概観、表4.22はエンドミルの仕様^{4.14)}、表4.23は切削条件を示す。切削条件は工具メーカー推奨条件の中央値とした。図4.25は対話機能にて作成したエンドミル加工の加工パスを示す。図4.25に示すように、被削材側面を10 ml分加工するように、Y軸のプラス方向へ直線加工を行った。工具交換位置より早送りG00にてアプローチ点へ運動、切削送りG01にて切削開始点へ運動、切削送りG01にて側面エンドミル加工を行い、切削送りG01にてエンドミルが抜けきるまで運動、早送りG00にて退避位置まで運動、早送りG00にて工具交換位置まで運動というサイクルを用いた。また、サイクルスタート時刻を $t_0\text{ s}$ 、工具交換位置からアプローチ点に達したときの時刻を $t_1\text{ s}$ 、切削開始時刻を $t_2\text{ s}$ 、切削終了時刻を $t_3\text{ s}$ 、エンドミルが抜け切ったときの時刻を $t_4\text{ s}$ 、工具交換位置に達したときの時刻を $t_5\text{ s}$ とする。



Fig.4.24 The overview of end mill

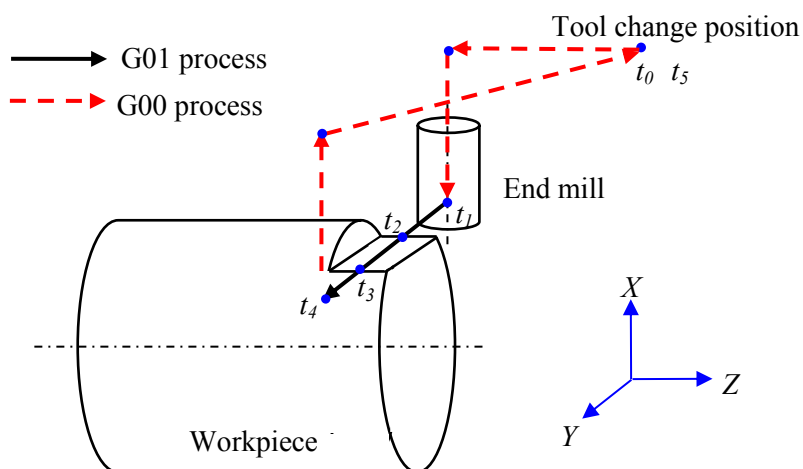


Fig.4.25 The cutting path on end milling

Table 4.22 The specification of end mill

Holder	Type	C6-MEGA32D-90 (BIG DAISHOWA SEIKI CO LTD)
Body	Type	AJX12R322SA32S (Mitsubishi Materials Corporation)
	Diameter [mm]	32
	The number of flute	2
	Helix angle [deg.]	30
	Overhang [mm]	69
Insert	Type	JDMW120420ZDSR-FT VP15TF (Mitsubishi Materials Corporation)
	Thickness	4.76
	Flute length [mm]	12
	Flank angle [deg.]	15
	Nose radius [mm]	2.0
	Coating	TiAlN

Table 4.23 The cutting condition on end milling

Cutting speed V [m/min]	120
Feed rate f [mm/tooth]	0.12
Axial depth of cut a_p [mm]	2.0
Radial depth of cut a_e [mm]	31
Material removal Q [ml]	10
Coolant	Dry

(4) ドリル加工

ドリル加工は $\Phi 16$ mmドリルにTiAlCr/TiSi系コーティングを施したものをを用いた. 図4.26はエンドミルの概観, 表4.24はドリルの仕様^{4.15}, 表4.25は切削条件を示す. 切削条件は工具メーカー推奨条件の中央値とした. 図4.27は対話機能にて作成したドリル加工の加工パスを示す. 図4.27に示すように, 10 ml分除去するよう被削材上面から穴あけ加工を行う. ドリル加工では一般的に用いられる, 図4.28に示すようなスポットドリルサイクルを用いた^{4.16}. 早送りG00にてイニシャル点まで運動, 早送りG00にてアプローチ点であるR点まで運動, 切削送りG01にて穴あけ加工, 早送りG00にてR点, またはイニシャル点まで運動というサイクルである. サイクルスタート時刻を t_0 s, 工具交換位置からR点に達したときの時刻を t_1 s, R点に達したときの時刻を t_2 s, 切削終了時刻を t_3 s, イニシャル点に達したときの時刻を t_4 s, 工具交換位置に達したときの時刻を t_5 sとする.

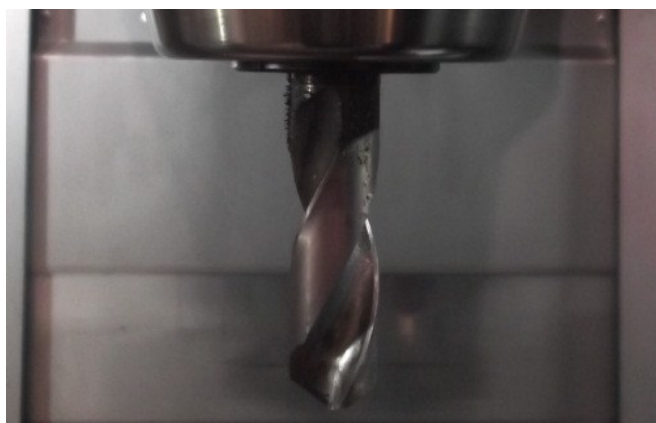


Fig.4.26 The overview of drill

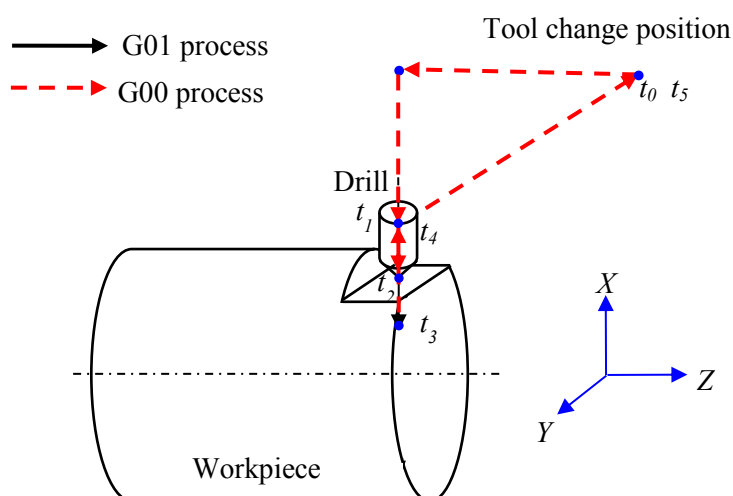


Fig.4.27 The cutting path on drilling

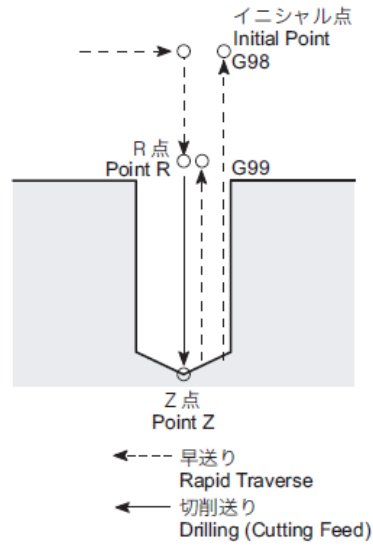


Fig.4.28 Spot drilling cycle

Table 4.24 The specification of drill

Holder	Type	C6-MEGA-32D-90 (BIG DAISHOWA SEIKI CO LTD)
Collet	Type	KM32-16 (Nikken Kosakusho Works, Ltd)
Drill	Type	MDS160SG (SUMITOMO ELECTRIC HARDMETAL CORP.)
	Diameter [mm]	16
	Leading edge angle [deg.]	140
	Helix angle [deg.]	30
	Flute length [mm]	58
	Coating	TiAlCr/TiSi series multi-layer
	Overhang [mm]	60

Table 4.25 The cutting condition on drilling

Cutting speed V [m/min]	65
Feed rate f [mm/rev.]	0.3
Depth of hole a_p [mm]	30
Material removal Q [mm]	10
Coolant	Dry

ここで、図 4.21, 図 4.23 に示した旋削, フェイスミル加工の固定サイクルの中の消費電力量を定式化する. 時間について再度, 送り速度, 距離についても下記に定義する^{4.17)}.

- t_0 [s]: サイクルスタート時刻
- t_1 [s]: 工具交換位置からアプローチ点に達した時刻
- t_2 [s]: 切削開始時刻
- t_3 [s]: 切削終了時刻
- t_4 [s]: 工具がエスケープ点に達したときの時刻
- t_5 [s]: 工具交換位置に達したときの時刻
- F_1 [mm/s]: G00 の早送り速度
- F_2 [mm/s]: G01 の切削送り速度
- D [mm]: フェイスミル工具径
- L_1 [mm]: 工具交換位置からアプローチ点の距離
- L_2 [mm]: アプローチ, エスケープ距離
- L_3 [mm]: 切削距離
- L_4 [mm]: エスケープ点から工具交換位置の距離

フェイスミル加工において, アプローチ, エスケープ距離は工具半径より大きく設定する必要がある. 以上より, 固定サイクル時間 T [s] は式(4.1)で示すことができる. なお, 送り速度の時定数は非常に小さいために無視している.

$$\begin{aligned}
 T &= t_5 - t_0 = (t_1 - t_0) + (t_2 - t_1) + (t_3 - t_2) + (t_4 - t_3) + (t_5 - t_4) \\
 &= L_1/F_1 + (L_2 + D/2)/F_2 + L_3/F_2 + (L_2 + D/2)/F_2 + L_4/F_1
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

一方, 消費電力は以下のように定義する.

- P_w [W]: 待機電力. これは, 式(3.1)の $P_{ST} \times R_{CL}$ となる.
- P_a [W]: 工具交換位置からアプローチ点までの運動時に発生する, 待機電力からの増分電力
- P_e [W]: エスケープ点から工具交換位置までの運動時に発生する, 待機電力からの増分電力
- P_b [W]: アプローチ, エスケープ時に発生する待機電力からの増分電力
- P_m [W]: 加工中の消費電力

以上より, フェイスミル加工時の消費電力量 E_f [Wh] は式(4.2)のように示すことができる.

$$E_f = (t_5 - t_0) \cdot P_w + (L_1/F_1) \cdot P_a + \{(2L_2 + D)/F_2\} \cdot P_b + (L_3/F_2) \cdot P_m + (L_4/F_1) \cdot P_e \tag{4.2}$$

式(4.2)の第1項は加工方法に関係のない待機電力である。第2項以降はアプローチ, エスケープ, 加工時の消費される消費電力量である。

一方, 旋削加工においては工具半径分のアプローチ, エスケープは不必要である。したがって, 旋削加工時の消費電力量 E_t [Wh]は式(4.3)のように示すことができる。

$$E_t = (t_5 - t_0) \cdot P_w + (L_1/F_1) \cdot P_a + (2L_2/F_2) \cdot P_b + (L_3/F_2) \cdot P_m + (L_4/F_1) \cdot P_e \quad (4.3)$$

第2項以降は主軸系モータ, 送り系モータによる加工消費電力量となる。以上の式を用いて, 第5章にて考察を行う。

4.4 工具摩耗観察方法および工具寿命判断基準

4.4.1 工具摩耗観察方法

第4.2節で述べたように, 実用的な範囲である切削条件であるという検証のため, 工具寿命試験を行った。その際の工具摩耗観察方法を示す。デジタルマイクロスコープ KH-1300 ((株)ハイロックス)を用いて機上で工具状態を写真撮影して, 損傷の程度を観察した。図4.29は工具観察方法の一例として複合工作機械での観察方法を示す。個々の実験条件について, 工具寿命試験を行うことは膨大な実験量になるので, 消費電力量が最も小さい切削条件のみにおいて行った。本節は各工程における工具摩耗観察箇所および切削が困難な状態, つまり工具寿命と判断する基準について述べる。



Fig.4.29 The method of tool wear observation in multi-functional machine tool

4.4.2 旋削工具，フェイスミルおよびエンドミルの工具摩耗形態

図4.30は旋削工具の一般的な工具摩耗形態を示す^{4.18)}。工具の摩耗状態を正確に表すためには各部の摩耗量を示す必要があるが，このうち逃げ面平行部摩耗量 V_B とすくい面最大クレータ深さ K_T は，種々の切削条件にたいしてその進行が比較的安定しているので，工具の摩耗量を表す代表値として用いられることが多い。図4.31に逃げ面平行部摩耗量 V_B とすくい面最大クレータ深さ K_T の摩耗量変化を示す^{4.19)}。そこで，本研究では旋削工具，フェイスミル，ボールエンドミルのインサートにおいて，この逃げ面平行部摩耗量 V_B (以下，逃げ面摩耗量 V_B とする)が0.3 mmに達したとき，または大きな欠損が見られたときに工具寿命と判断した。

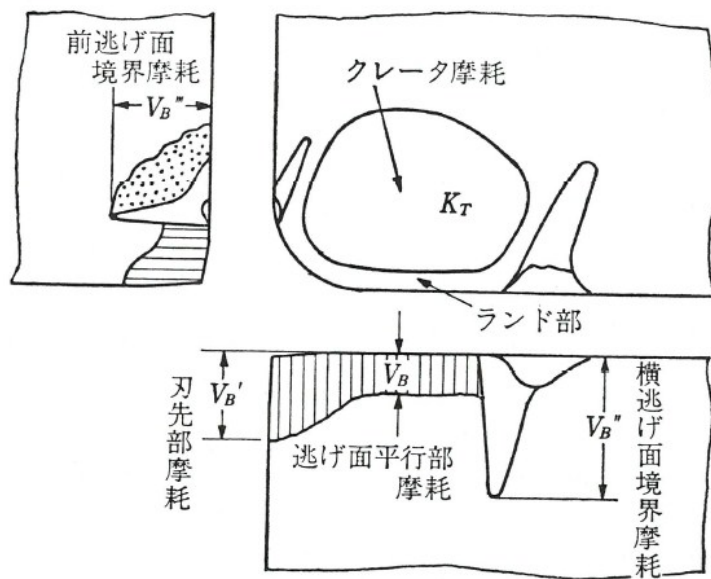


Fig.4.30 Wear mode of turning tool

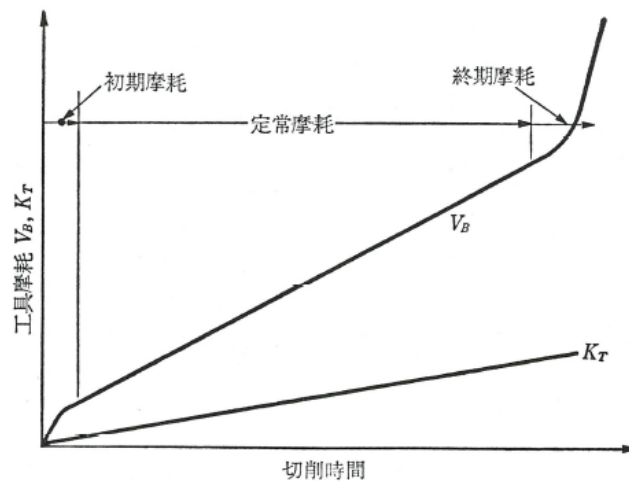


Fig.4.31 Wear progress of turning tool

4.4.3 エンドミルの工具摩耗形態

一般的にエンドミルは摩耗した工具を再研削することが多い。そのため、再研削が可能な状態で工具寿命と判断することが望ましい。図4.32はエンドミルの一般的な摩耗形態を示す^{4.20)}。図4.32に示すように、再研削の際に最も考慮すべきは外周逃げ面摩耗量であり、今回マシニングセンタにおけるミリング加工の評価に用いる直径10 mmのエンドミルは外周逃げ面摩耗幅が0.05 mmを越えると再研削が困難であることが経験上わかっている。そのため、本研究ではエンドミルにおいて、この外周逃げ面摩耗量 V_B (以下、逃げ面摩耗幅 V_B とする)が0.05 mmに達したとき、または大きな欠損が見られたときに工具寿命と判断した。

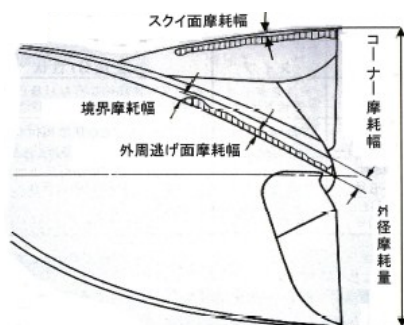


Fig.4.32 Wear mode of end mill

4.4.4 ドリルの工具摩耗形態

一般的にドリルも摩耗した工具を再研削することが多い。図4.33はドリルの一般的な摩耗状態を示す^{4.21)}。図4.33に示すように、再研削に最も考慮するべきは、マージン部の摩耗であり、外周マージン部の幅の2/3以内とすることが望ましいことが経験上わかっている。今回マシニングセンタにおけるミリング加工の評価に用いる直径10 mmのドリルのマージン幅は0.8 mmであり、マージン部摩耗幅 V_{Bc} が0.53 mmに達したとき、または肩部に大きな欠損が見られたときに工具寿命と判断した。

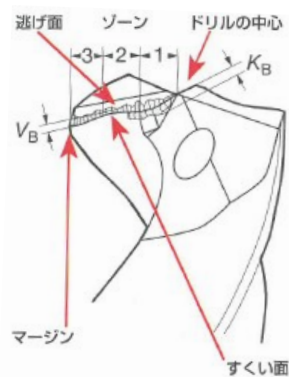


Fig.4.33 Wear mode of drill

4.5 まとめ

本章では，第3章で分類した加工時に消費される電力量の評価に用いた工作機械，工具，被削材などを述べた．本章の研究で得られた主な結論は以下の通りである．

- (1) 各加工で使用する複合CNC旋盤NLX25000，3軸制御立形マシニングセンタNV5000 α 1/40，5軸制御立形マシニングセンタNMV3000DCG，旋盤型複合工作機械NTX2000の概観，軸構成および機械仕様について述べた．
- (2) 旋盤加工，ミリング加工，傾斜ミリング加工で使用した工具，切削条件，加工パスおよび被削材について述べた．
- (3) 複合工作機械における旋削加工，フェイスミル加工の消費電力量を定式化した．
- (4) 工具観察方法および工具寿命判断方法について述べた．

参考文献

- 4.1) DMG森精機株式会社, NLX2500カタログ (2014) 4, 44.
- 4.2) DMG森精機株式会社, NV5100 α 1カタログ (2014) 4, 24.
- 4.3) DMG森精機株式会社, NMV3000DCGカタログ(2014) 4, 18.
- 4.4) DMG森精機株式会社, NTXシリーズカタログ(2014) 4, 37.
- 4.5) 住友電工ハードメタル株式会社, 切削工具カタログ (2014) B20, C7.
- 4.6) 例えば井上清和, 中野恵司, 林裕人, 芝野広志, 大場章司, 入門パラメータ設計-Excel演習でタグチメソッドの考え方と手順を体感できる-, 日科技連出版社, (2008) 29-39.
- 4.7) 住友電工ハードメタル株式会社, 切削工具カタログ (2014) H26-27.
- 4.8) 住友電工ハードメタル株式会社, 切削工具カタログ (2014) I24.
- 4.9) 住友電工ハードメタル株式会社, 切削工具カタログ (2014) J10.
- 4.10) 住友電工ハードメタル株式会社, 切削工具カタログ (2014) H104.
- 4.11) DMG森精機株式会社, MORI-AP Series (2014) 4.
- 4.12) 住友電工ハードメタル株式会社, 切削工具カタログ (2014) B112, C32.
- 4.13) 住友電工ハードメタル株式会社, 切削工具カタログ (2014) H101.
- 4.14) 三菱マテリアル株式会社, 切削工具カタログ (2014) L072, K22.
- 4.15) 住友電工ハードメタル株式会社, 切削工具カタログ (2014) J20.
- 4.16) 例えばDMG森精機株式会社, プログラミングマニュアル (2009) 187.
- 4.17) Y. Oda, M. Fujishima and Y. Takeuchi, Energy saving machining of multi-functional machine tools, International Journal of Automation Technology, **9**, 2 (2015) 135.
- 4.18) 中島利勝, 鳴瀧則彦, ”機械系大学広義シリーズ27 機械加工学, コロナ社, (1983) 84.
- 4.19) 中島利勝, 鳴瀧則彦, ”機械系大学広義シリーズ27 機械加工学, コロナ社, (1983) 85.
- 4.20) 株式会社森精機製作所, 切削加工の基本知識 (2006) 10-9.
- 4.21) サンドビック株式会社, Metal cutting Technical guide (2007) E24.

第 5 章 加工消費電力量の測定

5.1 はじめに

本章では、第3章で述べた工作機械の状態分類のうち、加工状態時に発生した消費電力量(加工消費電力量)を検証した結果を述べる。過去の研究においても、この加工消費電力量の検証については多く行われている。例えば、旋削加工においてGuoらは仕上げ加工における消費電力量と仕上げ面粗さの関係について^{5.1)}、小川は小型旋盤の送り系の消費電力量について研究を行っている^{5.2)}。さらに、マシニングセンタにおいて斉藤らが消費電力量の分析、加工方法の違いによる消費電力量の比較などを行っている^{5.3),5.4)}。ほかにも多くの研究が見られるが、多くの研究が工程、切削条件を制限したものとなっている。そこで、本研究では旋削、ミリング加工(フェイスマイル、エンドミル、ドリル、傾斜ミリング加工)といった幅広い加工方法を対象とし、切削条件を種々変更して消費電力量を測定した。さらに得られた結果を基に、切削条件、モータ選定などをどう行うべきかの方策を示した。このうち切削条件の改善は、実際の生産現場、つまりすでにユーザーに納入済みの機械にも適用が可能であり、すぐに省エネルギー化の達成が可能であるため、非常に重要である。

一方で、この加工消費電力量は切削抵抗とサイクルタイムに影響を受ける。この削減方策としてサイクルタイム短縮、切削抵抗低減があげられるが、サイクルタイム短縮のために切削条件を高く設定すると切削抵抗が増加するという、トレードオフの関係にある。そこで、本研究では加工消費電力量は切削除去量 A_c で除した値、単位除去量あたりの消費電力量Wh/mlを評価関数とした。これにより1 ml除去する際に発生する消費電力量が評価できる。

まず、旋盤における旋削加工においては、切削速度一定制御を用いることが一般的であることから、加工中に主軸回転数が種々変化することとなる。そのため、主軸回転数が消費電力量に及ぼす影響を検討した^{5.5)}。つぎに、3軸制御立形マシニングセンタにおけるフェイスマイル、エンドミル、ドリル加工においては、品質工学を用いて切削条件を種々変更し、工具寿命を考慮した省エネルギー切削条件を検証した^{5.6)}。さらに、5軸制御マシニングセンタを用いた割り出し5軸加工、同時5軸加工も切削現象としては傾斜ミリング加工であることから、傾斜角度が消費電力量に及ぼす影響を検討した^{5.7)5.8)}。最後に、前述した加工は全て複合工作機械にて加工が可能であることから、複合工作機械を用いて各加工を行った際の消費電力量の分析を行った^{5.9)}。

本章は第5.2節ではCNC旋盤の加工消費電力量、第5.3節では3軸制御立形マシニングセンタの加工消費電力量、第5.4節では5軸制御マシニングセンタの加工消費電力量、第5.5節では複合工作機械の加工消費電力量、第5.6節では以上をまとめた第5章の結論について述べる。なお、本章の消費電力量という表現は特に記載が無い限り、この単位除去量あたりの加工消費電力量とし、無負荷状態の消費電力量を減算した結果となっている。

5.2 旋削加工における主軸回転数が消費電力量に及ぼす影響

本節では第4章で述べたCNC旋盤における旋削加工時に発生する消費電力量の測定結果および考察を述べる。本研究では最も一般的な加工である外径、端面直線旋削加工を対象とした。旋削加工は、一般的に切削速度一定制御を行ない、切削速度が一定になるように主軸回転数を変化させながら加工する。この主軸回転数が変化すると、主軸モータ特性および加工時間、しいては消費電力量に大きな影響を及ぼす。そのため、この主軸回転数が消費電力量に及ぼす影響を検討した。

5.2.1 外径旋削加工における消費電力量

表4.6に示した切削速度 $V=120$ m/min, 送り速度 $f=0.20$ mm/rev. 切込み量 $a_p=2.0$ mmの条件にて、被削材の外径直線加工した場合に測定された電力の時間的变化を図5.1に示す。加工パスには、工具交換位置からアプローチ点まで早送りG00, 切削開始点まで切削送りG01, 加工中の切削送りG01, 切削終了点からエスケープ点まで切削送りG01, 工具交換位置まで早送りG00という運動が含まれる。つぎに、図5.2は外径旋削加工時における消費電力量と主軸回転数の関係を示す。また、参考として主軸ロード値, 主軸出力線図も示した。主軸ロードはソフトウェアを用いたNCからのモニタリング結果, 主軸出力線図は設計値である。

図5.2に示すように、消費電力量および主軸ロードは基底回転数領域で最も小さい値となった。また、基底回転数より小さい回転数領域では、基底回転数に近づくほど消費電力量が小さくなった。これは、基底回転数に近づくほど主軸出力が大きくなるためである。一方、基底回転数より大きい回転数領域では、主軸回転数が大きくなるほど消費電力量および主軸ロードは大きくなった。通常、旋削加工は主軸回転数が増加すると加工時間が短くなり、消費電力量が小さくなる傾向になる。しかし、大径ベアリングを備えた旋削主軸を高速回転させると消費する電力量が大きくなる。よって、加工時間が短くなる高速回転領域より、基底回転数領域のほうが省エネルギー、つまり加工時間より主軸回転数のほうが消費電力量に及ぼす影響が大きいことがわかる。

以上より、主軸回転数が基底回転数領域となるように切削条件を設定することで、省エネルギーな旋削加工となる。例えば、主軸回転数を 2355 min^{-1} から基底回転数領域である 450 min^{-1} にとすることで、消費電力量は 1.2 Wh/mlから 0.8 Wh/mlまで抑えることができ、約33%の消費電力量削減が可能となった。

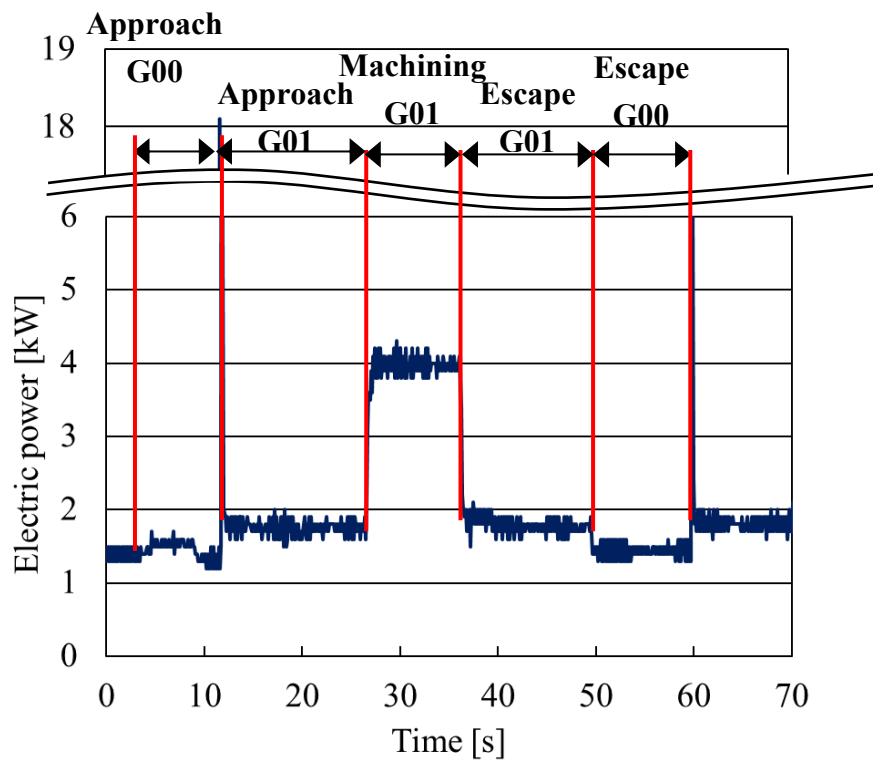


Fig. 5.1 Electric power as function of time during outside turning
Cutting condition: $V=120$, $f=0.20$ $a_p=2.0$

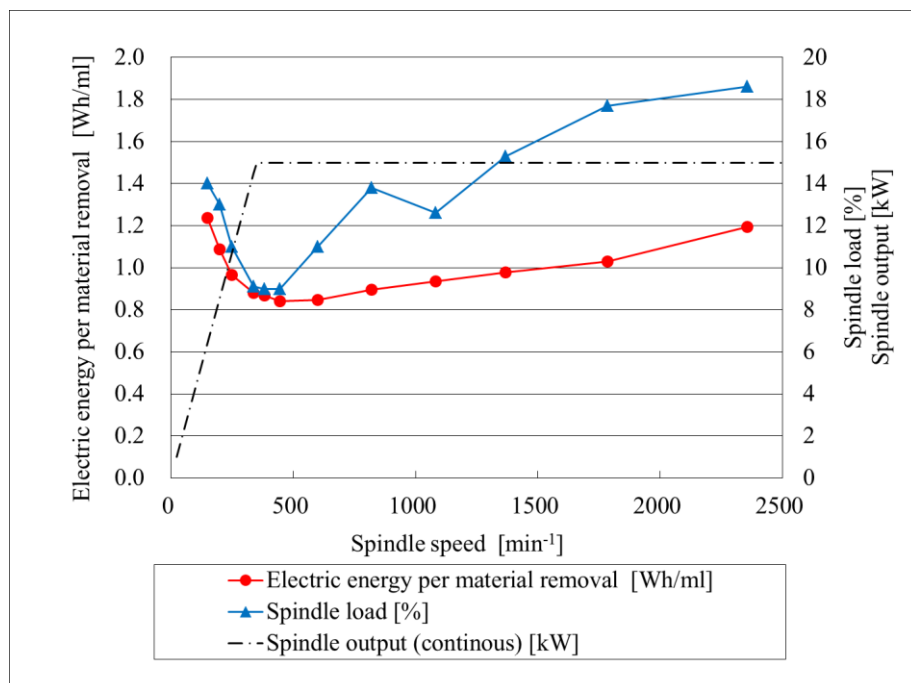


Fig.5.2 The relation between electric energy per material removal and spindle speed

5.2.2 端面旋削加工における消費電力量

表4.6に示した切削速度 $V=120$ m/min, 送り速度 $f=0.2$ mm/rev., 切込み量 $a_p=2.0$ mm, 最高主軸回転数 $N_{max}=2000$ min^{-1} の条件にて, 被削材の端面直線加工した場合に測定された電力の時間的变化を図5.3に示す. 図5.1と同様に, 早送りG00, 切削送りG01のアプローチ, エスケープ, 加工の運動も含まれる. 図5.3に示すように, 端面加工では工具がワーク中心に移動するに伴い, 主軸回転数が大きくなるために消費電力が大きくなっていることがわかる. なお, 加工時間約22秒当たりの消費電力の変化は主軸の巻線切替回転数 680 min^{-1} に達したためである.

つぎに, 図5.4に消費電力量と主軸最高回転数の関係を示す. また, 参考として主軸出力も示した. 図5.4に示すように, 主軸最高回転数が大きくなるに伴い, 消費電力量も大きくなっていることがわかる. これは, 加工中に達する最高主軸回転数が大きくなるためである. よって, 外径旋削加工と同様に, 主軸最高回転数を大きくするほど加工時間は短くなるが, 主軸最高回転数を小さくするほうが省エネルギーとなる.

以上より, 主軸最高回転数を小さくすることで, 省エネルギーな旋削加工となる. 例えば, 主軸最高回転数 2000 min^{-1} から 600 min^{-1} に変更することで, 約30%の消費電力量が削減できる. ただし, 主軸最高回転数を不用意に小さく設定しすぎると, ワーク中心付近では十分な切削速度が得られない. したがって, 切削抵抗の増加による消費電力量増加, さらには工具破損の可能性がある.

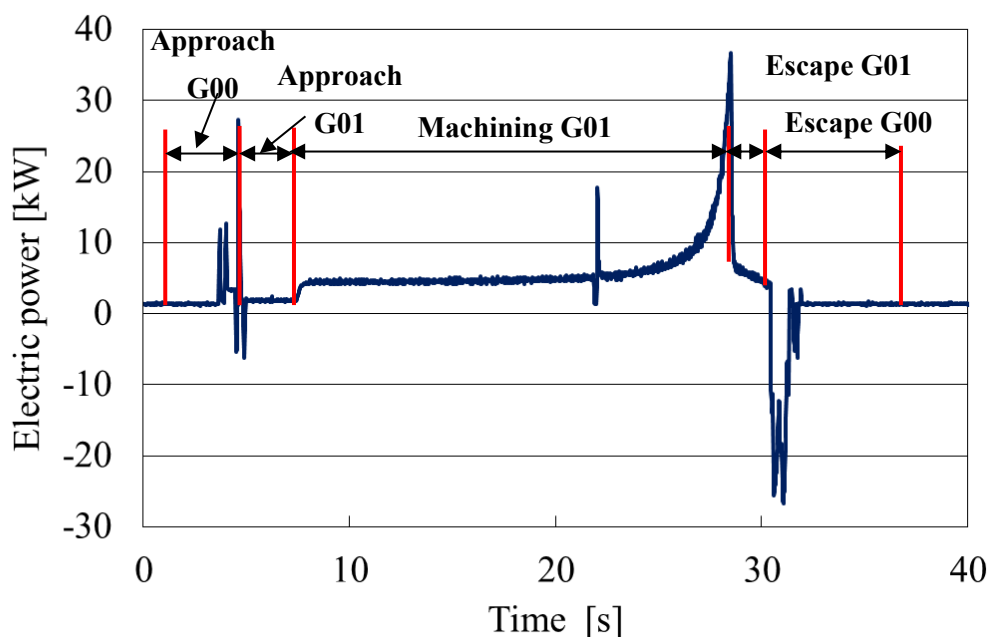


Fig.5.3 Electric power as function of time during face turning

Cutting condition: $V=120, f=0.20, a_p=2.0, N_{max}=2000$

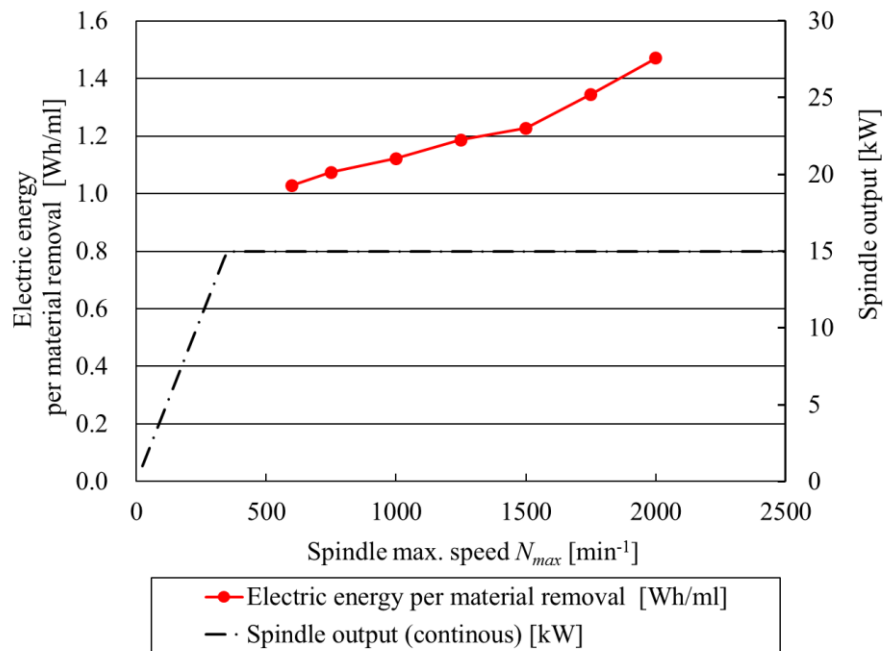


Fig.5.4 The relation between electric energy per material removal and spindle max. speed

5.2.3 ケーススタディ

第5.2.1項で得られた結果の妥当性を検証するため、切削速度一定制御を用いて実ワークを想定した連続外径加工を行った。表5.1に示す切削条件を用いて、その際に発生する消費電力量の比較を行った。切削速度を4段階に変更することで、主軸回転数が基底回転数以下、基底回転数領域、基底回転数以上となるようにした。

図5.5に各主軸回転数領域における連続外径加工時の消費電力量を示す。図5.5に示すように、切削速度 $V=100 \text{ m/min}$ である基底回転数領域が最も消費電力量が小さいことがわかる。また、その他の回転数領域においても図5.2と同様の傾向となっている。

以上より、基底回転数領域で加工することで加工による消費電力量が抑制できることがあきらかとなった。つまり、被削材、切削条件などの情報から多く使用される主軸回転数を推定し、主軸モータの基底回転数を決定することで省エネルギーな工作機械となる。なお、複合工作機械など周辺機器が多く備えられている機械では待機電力量が占める割合が多くなる。そのため、そのような機械において機械全体の消費電力量を考慮する際は、サイクルタイム短縮を狙うため高切削速度領域で加工する必要がある。この課題に関しては、第5.5節で述べることとする。

Table 5.1 Experimental conditions on case study

Cutting speed V [m/min]	50	100	170	300
Spindle speed N [min^{-1}]	140~215	279~430	475~731	838~1290
Cutting diameter D [mm]	114~74			
Depth of cut a_p [mm]	2			
Feed rate f [mm/rev.]	0.2			
Cutting length L [mm]	10			
Coolant	Dry			

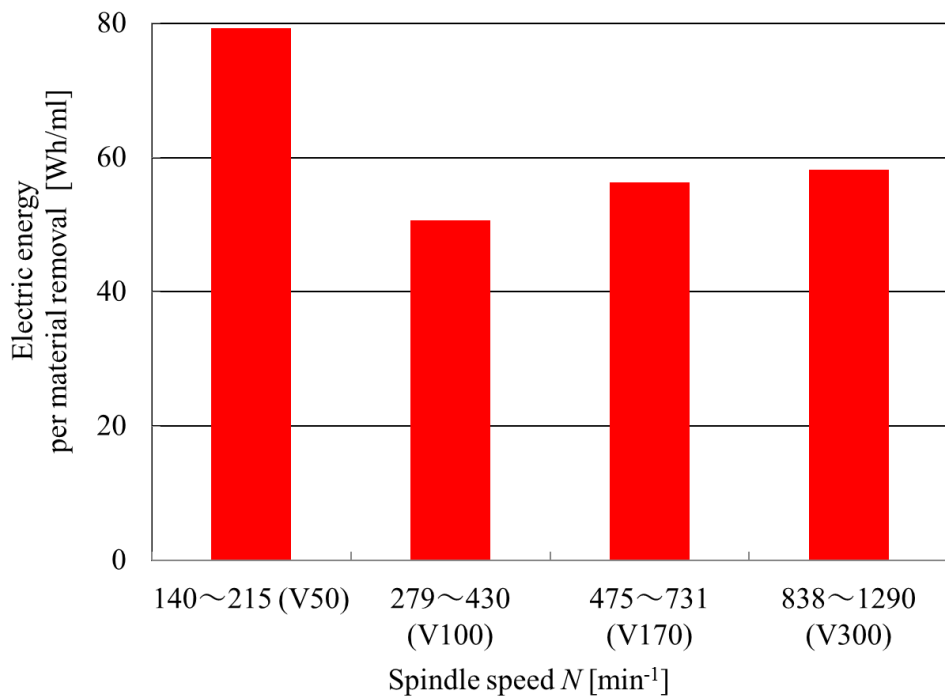


Fig.5.5 Results of power consumption on case study

5.3 ミリング加工における切削条件が消費電力量に及ぼす影響

本節では第4章で述べた3軸制御立形マシニングセンタにおける、ミリング加工時に発生する消費電力量の測定結果および考察を述べる。本研究ではミリング加工において代表的な加工であるフェイスミル、エンドミル、ドリル加工を対象とした。前述したように、切削加工時の消費電力量は切削抵抗とサイクルタイムを考慮する必要がある。しかし、工作機械に求められている良品を安定して生産することを考慮すると、むやみに切削条件を高く設定し、加工時間を短くすることは、本来の要求を満たせない。そこで、良品を安定して生産できる実用的な切削条件において消費電力量を削減することを目的とし、品質工学を用いることとした。さらに、この解析結果および工具寿命試験結果を考慮し、省エネルギーとなる切削条件を検証した。

5.3.1 フライス加工における消費電力量

表4.7に示した切削速度 $V=200$ m/min, 送り速度 $f=0.20$ mm/tooth, 切込み深さ $a_p=1.0$ mm, 切込み幅 $a_e=30$ mmの条件にて、被削材上面をフェイスミル加工した場合に測定された1サイクルの電力の時間的変化の1例を図5.6に示す。加工パスには旋削加工と同様に工具交換位置からアプローチ点まで早送りG00, 切削開始点まで切削送りG01, 加工中の切削送りG01, 切削終了点からエスケープ点まで切削送りG01, 工具交換位置まで早送りG00という運動が含まれる。フライス加工は被削材の平面加工を行うために、フェイスミルのアプローチに要する時間(アプローチ時間)と工具全体が被削材上を通過するまで工具を運動させる時間(エスケープ時間)が必要である。そのため、図5.6のように、加工終了後はなだらかに消費電力が低下していく。

表5.2は切削条件を品質工学のL9直交表に割り当てたときの消費電力量, 切削除去量, 加工時間の結果である。また、この結果を用いてSN比を算出した結果を図5.7に示す。縦軸のSN比が大きくなるほど、消費電力量が小さいことを示す。図5.7に示すように、切削速度, 送り速度, 切込み深さ, 切込み幅の全ての切削条件を大きく設定するほど、加工中の消費電力量が削減できることがわかる。また、各切削条件の中では、送り速度が最も影響を及ぼし、ついで、切込み深さ, 切込み幅が同程度であり、最後に切削速度となった。今回は工具メーカーの推奨条件内で選定したため、このような順となったが、各パラメータとも高く設定するほど、加工時間が短くなる、または切削除去量が大きくなるため、単位除去量あたりの消費電力量が削減できる。この切削条件に対し、良品を安定的に加工できる実用的な条件を選定する必要がある。この考察は第5.3.4項で述べる。

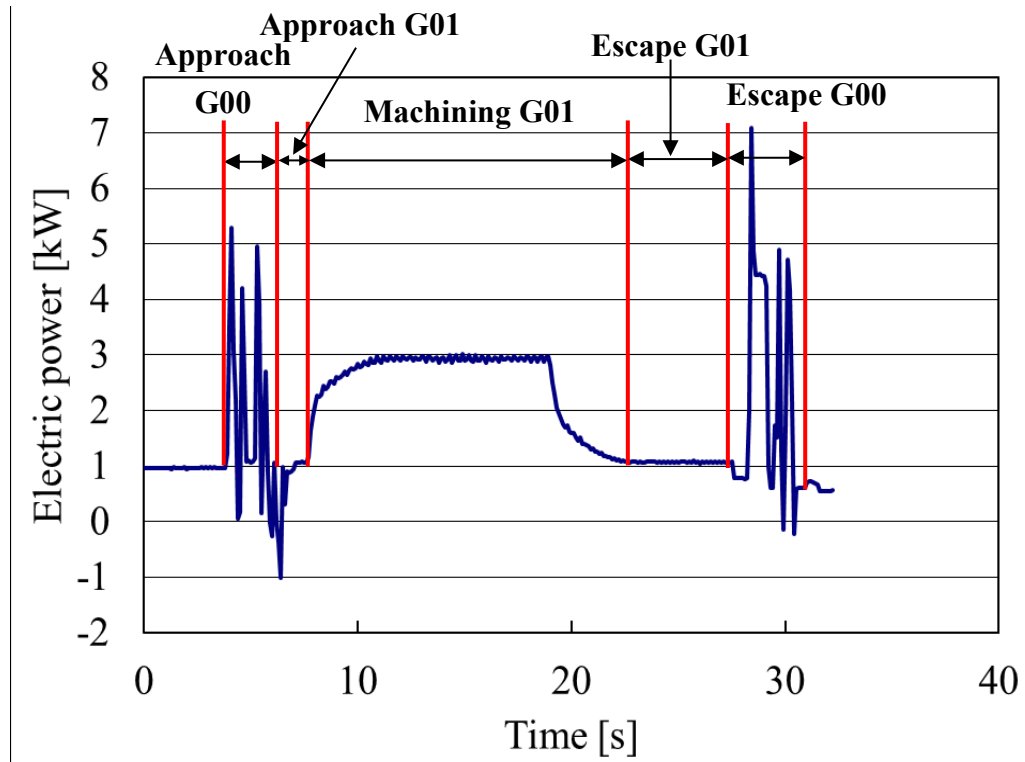


Fig.5.6 Electric power as function of time during face milling
Cutting condition: $V=200, f=0.20, a_p=1.0, a_e=30$

Table 5.2 Experimental results on electric energy
during face milling using L9 orthogonal array

No.	Parameter				Electric energy [Wh]	Electric energy per material removal [Wh/ml]	Material removal rate [ml/min]	Cycle time [s]
	V [m/min]	f [mm/tooth]	a_p [mm]	a_e [mm]				
1	175	0.1	1.0	30	38.4	5.5	8.4	98.3
2	175	0.2	1.5	45	30.4	1.9	37.6	51.0
3	175	0.3	2.0	60	31.2	1.1	100.3	36.0
4	200	0.1	1.5	60	48.8	2.3	28.6	86.7
5	200	0.2	1.0	30	26.4	3.8	19.1	45.3
6	200	0.3	1.0	45	19.8	1.9	43.0	31.7
7	250	0.1	2.0	45	43.8	2.1	35.8	69.7
8	250	0.2	1.0	60	23.7	1.7	47.7	37.0
9	250	0.3	1.5	30	17.6	1.7	53.7	26.0

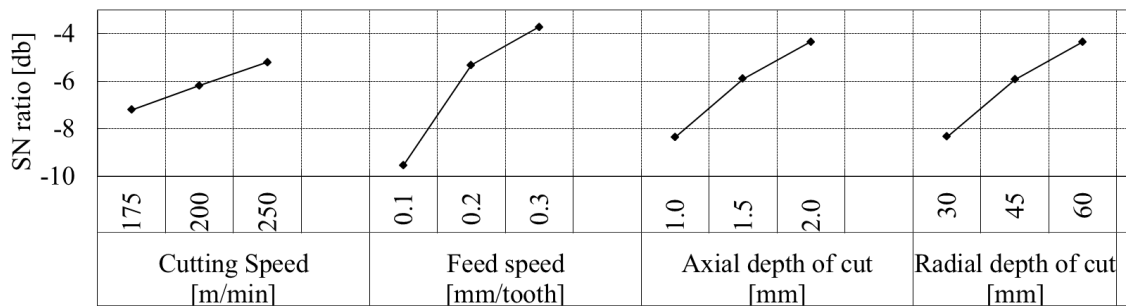


Fig.5.7 Results on SN ratio during face milling using Taguchi' method

5.3.2 エンドミル加工における消費電力量

表4.11に示した切削速度 $V=90$ m/min, 送り速度 $f=0.28$ mm/tooth, 切込み深さ $a_p=15$ mm, 切込み幅 $a_e=0.5$ mmの条件にて, 被削材上面をエンドミル加工した場合に測定された1サイクルの電力の時間的变化の1例を図5.8に示す. 加工パスにはフェイスミル加工と同様に, 早送りG00, 切削送りG01のアプローチ, エスケープ, 加工の動きが含まれる. エンドミル加工はフェイスミル加工と同様に, 被削材の側面加工を行うために工具全体が被削材側面を通過するまで運動させる必要がある. しかし, 一般的にエンドミルの工具径はフェイスミルのそれと比較すると小さい. そのため, 図5.8のように, 加工終了後の電力の低下率は小さくなる.

表5.3は切削条件を品質工具のL9直交表に割り当てたときの消費電力量, 切削除去量, 加工時間の結果である. また, この結果を用いてSN比を算出した結果を図5.9に示す. 各切削条件の中では, 切込み深さ, 切込み量が消費電力量に大きく影響を及ぼし, ついで, 送り速度, 最後に切削速度となった. この結果はフェイスミル加工とは異なる. しかし, 図5.7と図5.9の縦軸のSN比を比較すると, 図5.9のエンドミル加工の方が消費電力量へ大きく影響を及ぼす. これは, エンドミル加工は工具径が小さいため, 切削条件を広く設定することが困難であり, 切削条件が消費電力量に及ぼす影響が大きいためである. すなわち切削条件の設定が重要であることがわかる. 以上より, 同じミリング加工においても, 各工具において最適な切削条件を選定する必要があること考えられる. また, 同様に今回選定した切削条件に対し, 良品を安定的に加工できる実用的な条件を選定する必要がある. この考察は第5.3.4項で述べる.

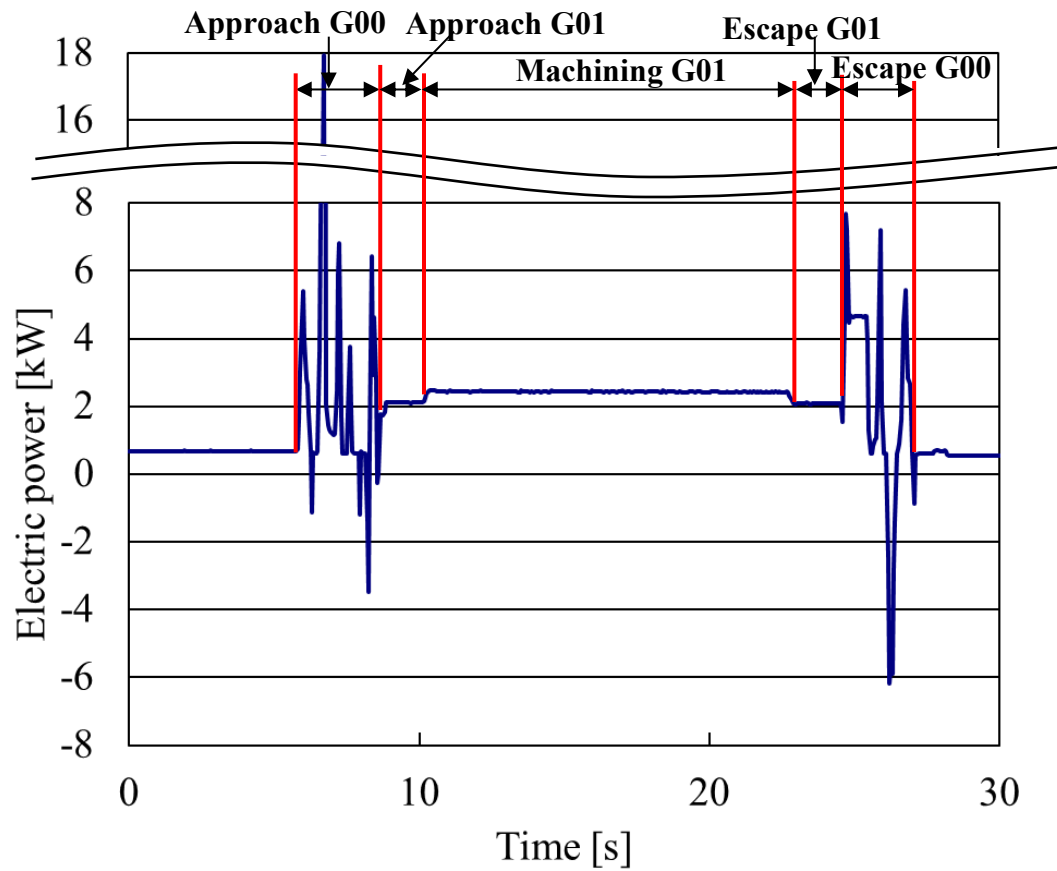


Fig.5.8 Electric power as function of time during end milling
Cutting condition: $V=90, f=0.28, a_p=15, a_e=0.5$

Table 5.3 Experimental results on electric energy
during end milling using L9 orthogonal array

No.	Parameter				Electric energy [Wh]	Electric energy per material removal [Wh/ml]	Material removal rate [ml/min]	Cycle time [s]
	V [m/min]	f [mm/tooth]	a_p [mm]	a_e [mm]				
1	50	0.05	5.0	0.5	38.6	133.0	0.4	60
2	50	0.10	10.0	1.0	21.8	18.8	3.2	32
3	50	0.15	15.0	1.5	17.1	6.5	10.7	22
4	90	0.05	10.0	1.5	28.2	16.2	4.3	35
5	90	0.10	15.0	0.5	16.3	18.7	4.3	19
6	90	0.15	5.0	1.0	11.9	20.5	4.3	14
7	130	0.05	15.0	1.0	22.7	13.0	6.2	25
8	130	0.10	5.0	1.5	14.1	16.2	6.2	14
9	130	0.15	10.0	0.5	11.9	20.5	6.2	11

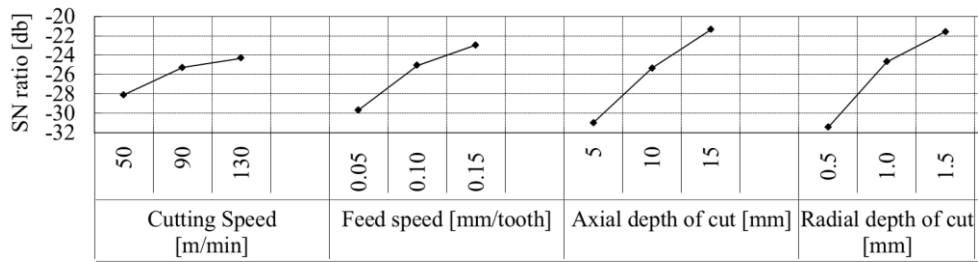


Fig.5.9 Results on SN ratio during end milling using Taguchi' method

5.3.3 ドリル加工における消費電力量

表4.14に示した切削速度 $V=90$ m/min, 送り速度 $f=0.28$ mm/rev.の条件にて, 被削材上面にドリル加工した場合に測定された1サイクルの電力の時間的変化の1例を図5.10に示す. 図5.10より, 加工パスには, 工具交換位置からアプローチ点まで早送りG00, 切削開始点まで切削送りG01, 加工中G01, フェイスミル, エンドミル加工と異なり, 切削終了点からエスケープ点まで切削送りG01は無く, 工具交換位置まで早送りG00という運動が含まれる.

表5.4は切削条件を品質工具のL9直交表に割り当てたときの消費電力量, 切削除去量, 加工時間を示した結果である. また, この結果を用いてSN比を算出した結果を図5.11に示す. 各切削条件の中では, 切削速度, 送り速度は同等の効果であった. この結果より, ドリル加工においては切削条件を高く設定するほど, サイクルタイムが短くなるため省エネルギーな加工となる. また, 同様に今回選定した切削条件に対し, 良品を安定的に加工できる実用的な条件を選定する必要がある. この考察は第5.3.4項で述べる.

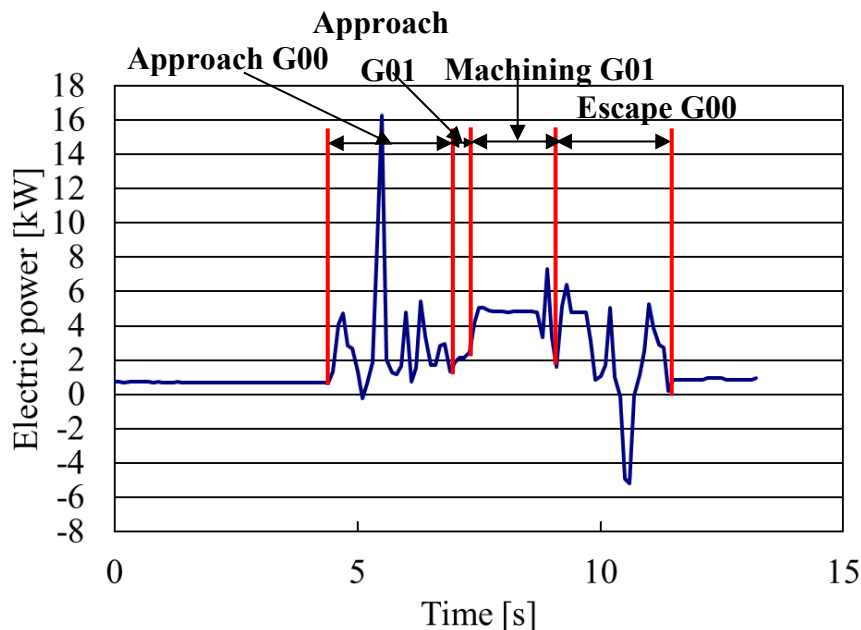


Fig.5.10 Electric power as function of time during drilling Cutting condition: $V=90, f=0.28$

Table 5.4 Experimental results on electric energy during drilling using L9 orthogonal array

No.	Parameter		Electric energy [Wh]	Electric energy per material removal [Wh/ml]	Material removal rate [ml/min]	Cycle time [s]
	V [m/min]	f [mm/rev.]				
1	50	0.20	28.1	3.0	25.0	32
2	50	0.28	23.5	2.5	35.0	24
3	50	0.35	20.9	2.2	43.8	21
4	90	0.20	23.8	2.5	45.0	21
5	90	0.28	20.9	2.2	63.0	16
6	90	0.35	19.8	2.1	78.8	14
7	130	0.20	21.5	2.3	65.0	16
8	130	0.28	19.1	2.0	91.0	13
9	130	0.35	16.5	1.8	113.8	12

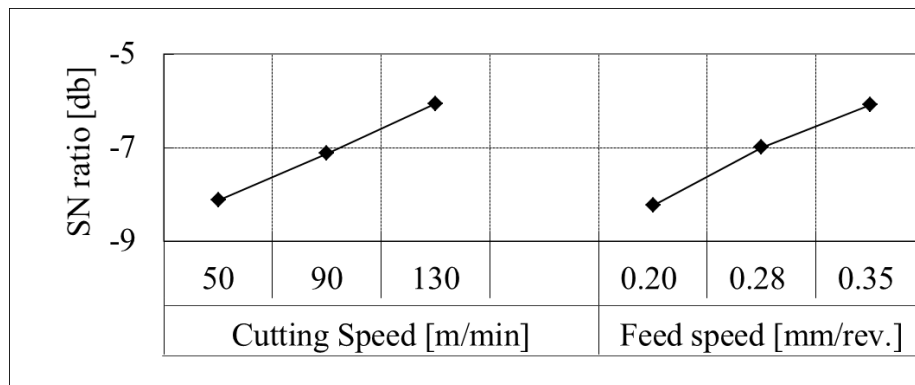


Fig.5.11 Results on SN ratio during drilling using Taguchi' method

5.3.4 工具寿命を考慮した省エネルギー切削条件の選定

前節までに述べた省エネルギーな切削条件は、1パス加工時における消費電力量が最も少ない条件である。しかし、工作機械に求められている良品を安定して生産することを考慮すると、むやみに切削条件を高く設定し、加工時間を短くすることは本来の要求、つまり第4.3節で述べた実用範囲内での切削条件を満たせないことになる。つまり、良品を安定して生産できる実用的な切削条件にて消費電力量削減を検討する必要がある。そこで、工具寿命を含めた最適条件を評価するために工具寿命試験を行った。ここで、安定した条件とは加工面品質が安定している、びびり振動が発生しない、初期の異常摩耗やチッピングが発生しないこととする。

(1) フェイスミル加工

まず、フェイスミル加工における最適切削条件選定を行った。図5.7の品質工学の解析結果より、切削条件が高いほど消費電力量が削減できることがあきらかとなっている。そのため、条件10として切削条件範囲の上限である切削速度 $V=250$ m/min, 送り速度 $f=0.3$ mm/tooth, 切込み幅 $a_e=60$ mm, 切込み深さ $a_p=2.0$ mmの条件にて加工を行った。その結果、消費電力量は0.9 Wh/mlと最も低くとなったが被削材面品位が低下した。したがって、面品位の良い、長寿命かつ省エネルギーとなる条件とするため、条件11として切削速度, 送り速度, 切り込み幅は変更せず, 切込み深さを1.5 mmと小さくして工具寿命試験を行なった。また比較対象として、初期条件(切削速度 $V=200$ m/min, 送り速度 $f=0.2$ mm/tooth, 切込み幅 $a_e=60$ mm, 切込み深さ $a_p=1.5$ mm)でも寿命試験を行った。工具寿命はインサート先端の逃げ面摩耗量 V_B で判定し、逃げ面摩耗量が0.3 mmに達したときとした。

図5.12は各条件での工具寿命試験結果を示す。また、図5.13は初期条件, 図5.14は条件11の工具寿命時のインサート観察結果を示す。図5.12に示すように、初期条件は2160 ml, 条件11は4200 ml分加工した際に工具寿命に達し、条件11のほうが約2倍長寿命となった。また、図5.13, 5.14よりすくい面にチッピングが見られるが、両条件ともに正常摩耗であることがわかる。一般的には切削速度が高くなるほど工具寿命は低下するが、初期条件は条件11と比較すると送り速度が小さいために工具の擦過距離が長くなる。工具寿命試験ではこの影響が大きく出たと考えられる。

以上より、条件11を最適条件として消費電力量を測定し、その結果を表5.5に示す。また、比較対象として条件10, 初期条件の結果も記載した。表5.5より条件11の消費電力量は1.1 Wh/mlとなり、初期条件の消費電力量2.0 Wh/mlと比較し、約45%削減可能となった。また、切削能率も107.5 ml/minであり初期条件の38.2 ml/minと比較し、約2.8倍の向上となった。したがって、フェイスミル加工において、高切削速度, 高送り速度, 中切込み深さ, 高切込み幅の切削条件を選定することで、良品を安定して生産ができ、かつ省エネルギーな加工であることをあきらかになった。

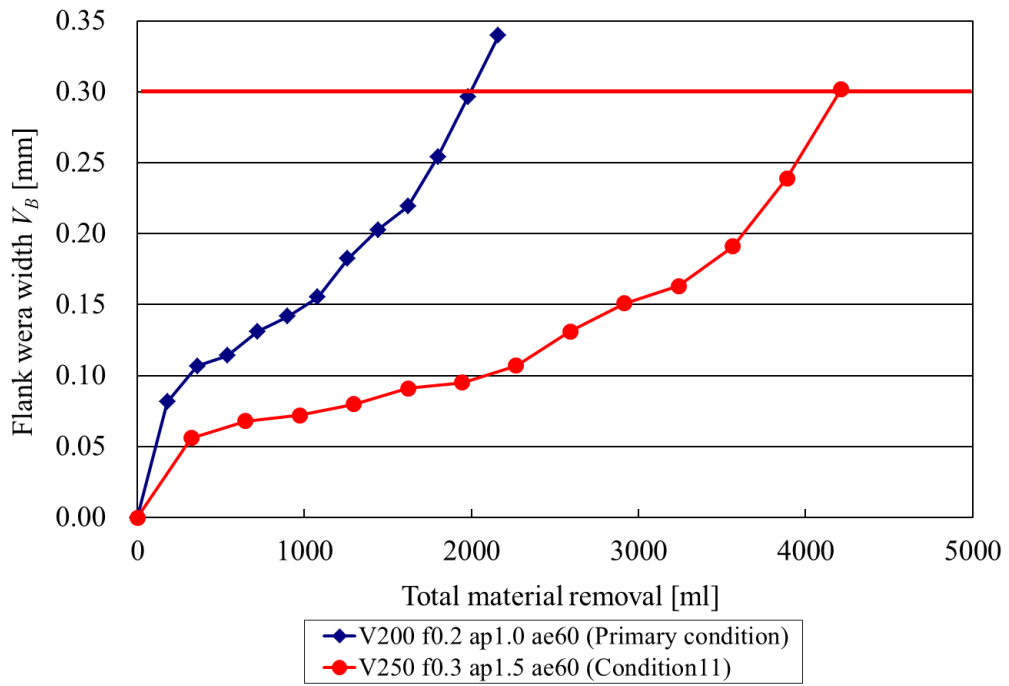
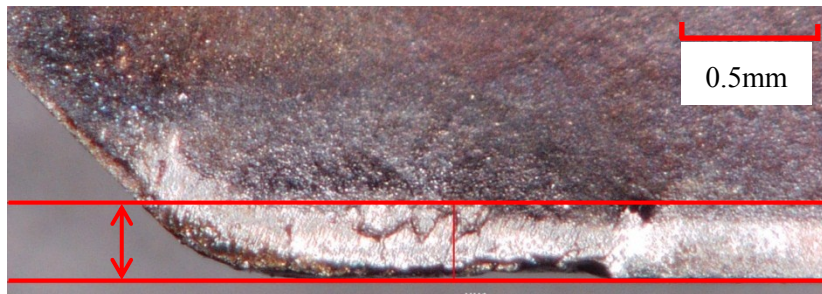
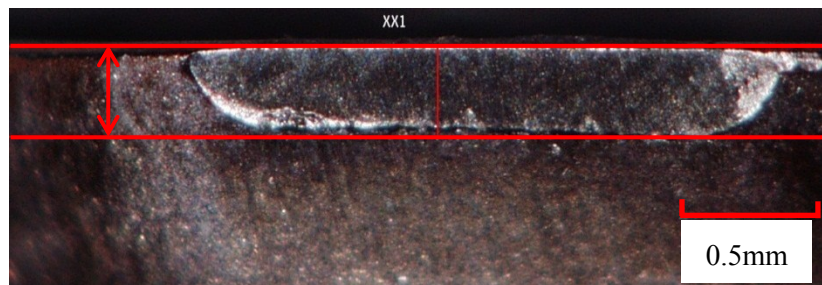


Fig.5.12 Results on tool life test during face milling



(a) Rake face

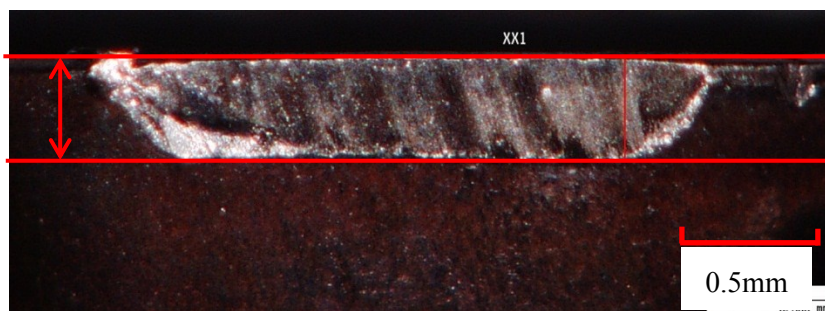


(b) Flank face

Fig.5.13 Pictures of face mill insert under primary condition (2160 ml)



(a) Rake face



(b) Flank face

Fig.5.14 Pictures of face mill insert under condition11 (4200 ml)

Table 5.5 Experimental results on electric energy during face milling

No.	Parameter				Electric energy [Wh]	Electric energy per material removal [Wh/ml]	Material removal rate [ml/min]	Cycle time [s]
	V [m/min]	f [mm/tooth]	a_p [mm]	a_e [mm]				
Primary	200	0.2	1.0	60	28.1	2.0	38.2	45.3
10	250	0.3	2.0	60	27.1	0.9	143.3	26.0
11	250	0.3	1.5	60	23.1	1.1	107.5	26.0

(2) エンドミル加工

つぎに、エンドミル加工における最適切削条件の選定を行った。図5.9の品質工学の解析結果より、フェイスミル加工と同様に切削条件が高いほど消費電力量が削減できることがあきらかとなっている。そこで、切削条件範囲の上限である切削速度 $V=130$ m/min, 送り速度 $f=0.15$ mm/tooth, 切込み幅 $a_e=1.5$ mm, 切込み深さ $a_p=15$ mmで加工を行った。しかし、この条件ではびびり振動が発生した。そのため、切削能率をある程度保ちながらびびり振動を回避する条件を選定した。切削速度, 送り速度を維持しながら, 切込み幅 $a_e=1.5$ mm, 切込み深さ $a_p=10$ mm(条件10), $a_e=1.0$ mm, $a_p=15$ mm(条件11)と変化させ, 工具寿命試験を行った。工具寿命は刃先先端の逃げ面摩耗量 V_B で判定し, 再研磨を行う基準である逃げ面摩耗量が 0.05 mmおよびチッピングが発生したときとした。

図5.15は工具寿命試験結果を示す。また, 図5.16は条件10, 図5.17は条件11の工具寿命時の先端, 境界部の工具観察結果を示す。図5.16より, 条件10では切削除去量が 600 mlに達したところで刃先が大きく欠損した。一方図5.17より, 条件11では切削除去量が 880 mlに達した際に, 工具寿命基準である $V_B=0.05$ mmに達した。これは条件10ではエンドミルの刃長 15 mmのうち 10 mmのみを用いて切込み幅を大きくしたため, 刃長 10 mmの部分で切削抵抗を受けるが, 条件11では刃長 15 mmの部分で切削抵抗を受けるため, 条件10よりも工具に対する負荷が小さいためと考えられる。そこで, 標準条件をびびり振動が発生しないように切削速度と送り速度をメーカー推奨条件の中央値である $V=90$ m/min, $f=0.1$ mm/toothとし, 切込み幅 $a_e=0.5$ mm, 切込み深さ $a_p=15$ mmと刃長を有効に使用しながら, 切削除去量がメーカー推奨値の中央値に近くなるものとした。これは表5.3に示す条件5となる。この条件での工具寿命試験結果も図5.15に示す。また, 図5.18に工具寿命時の先端, 境界部の工具観察結果を示す。その結果, 600 ml加工後に境界部が大きく摩耗した。

以上より, 条件11を最適条件として消費電力量を測定し, その結果を表5.6に示す。また, 比較対象として条件5, 10, びびり振動が発生した条件の結果も記載した。表5.6より条件11の消費電力量は 6.4 Wh/mlとなり, 初期条件の消費電力量 18.1 Wh/mlと比較し, 約 65 %削減可能となった。また, 切削能率も 18.6 ml/minであり初期条件の 4.3 ml/minと比較し, 約 4.3 倍の向上となった。したがって, エンドミル加工において, 高切削速度, 高送り速度, 高切込み深さ, 中切込み幅の切削条件を選定することで, 良品を安定して生産ができ, かつ省エネルギーであることがあきらかになった。

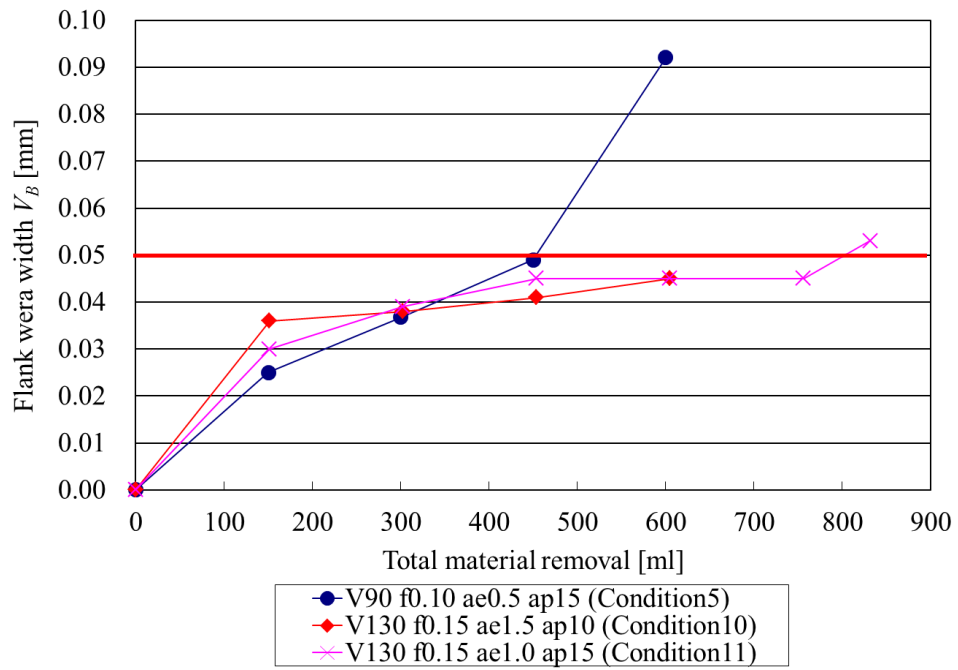
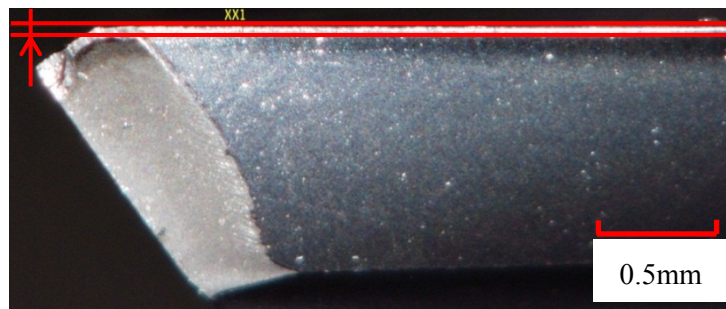


Fig.5.15 Results on tool life test during end milling

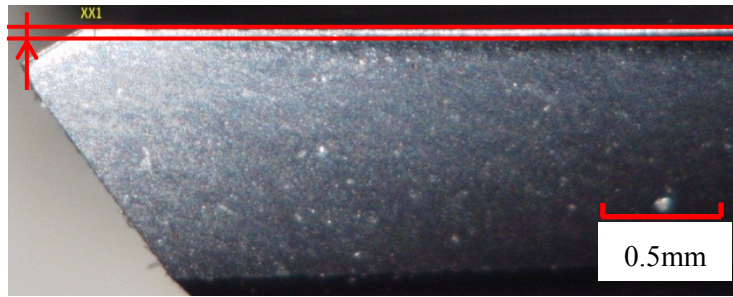


(a) Front



(b) Notch

Fig.5.16 Pictures of end mill under condition10 (600 ml)



(a) Front

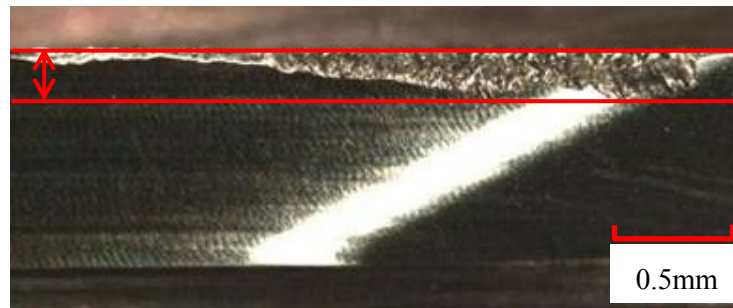


(b) Notch

Fig.5.17 Pictures of end mill under condition11 (800 ml)



(a) Front



(b) Notch

Fig. 5.18 Pictures of end mill under primary condition5 (600 ml)

Table 5.6 Experimental results on electric energy during end milling

Experimental number	Parameter				Electric energy [Wh]	Electric per material removal [Wh/ml]	Material removal rate [ml/min]	Cycle time [s]
	No.	V [m/min]	f [mm/tooth]	a_p [mm]				
5 (Primary)	90	0.10	15	0.5	16.3	18.1	4.3	19.0
10	130	0.15	10	1.5	11.1	6.5	18.6	10.7
11	130	0.15	15	1.0	10.9	6.4	18.6	10.7
Chatter	130	0.15	15	1.5	12.0	4.6	27.9	10.7

(3) ドリル加工

最後に、ドリル加工における最適切削条件の選定を行った。図5.10の品質工学の解析結果より、フェイスミル、エンドミル加工と同様に切削条件が高いほど消費電力量が削減できることがあきらかとなっている。そこで、切削条件範囲の上限である切削速度 $V=130$ m/min, 送り速度 $f=0.35$ mm/rev.で寿命実験を行なった。これは表4.15における条件9となる。工具寿命は、ドリルの外周コーナ部のマージン摩耗幅 V_{Bc} がマージン幅の2/3に達したとき、つまり本研究で使用した $\Phi 10$ mmのドリルマージン幅は0.8 mmであるため、0.53 mm以上の摩耗があれば寿命と判断とした。

図5.19に工具寿命実験結果を示す。また、図5.20に条件9の工具寿命時の工具観察結果を示す。図5.19より、切削除去量3140 mlにて早期チップングが発生したため、切削速度 $V=90$ m/minに下げ、送り速度を工具メーカー推奨条件内である $f=0.20, 0.28, 0.35$ mm/rev.の3段階と(条件4, 5, 6), 0.4 mm/rev.(条件10)と変化させ、工具寿命試験を実施した。この条件での工具寿命試験結果も図5.19に示す。また図5.21に条件4, 図5.22に条件5, 図5.23に条件6, 図5.24に条件10の工具寿命時の工具観察結果を示す。その結果、送り速度 $f=0.2, 0.28$ mm/rev.では切削除去量が7700 ml, $f=0.35$ mm/rev.では切削除去量が5500 mlに達したときに工具寿命に達し、工具メーカーの推奨範囲を超える $f=0.4$ mm/rev.では送り速度が大きかったため、4710 ml加工後にすくい面に大きな欠損が生じた。この結果より、安定的に加工できる限界は $V=90$ m/min, $f=0.35$ mm/rev.と判定し、これは表4.15に示す条件6となる。また、初期条件は条件5となる。

以上より、最適条件を条件6として消費電力量を測定し、その結果を表5.7に示す。表5.7より消費電力量は2.1Wh/mlとなり初期条件の消費電力量2.2 Wh/mlと比較し約5 %の削減が可能となった。また切削能率は78.8 ml/minで、初期条件の63.0 ml/minと比較し、約1.3倍の向上となった。したがって、ドリル加工において、中切削速度、高送り速度の切削条件を選定することで、良品を安定して生産ができ、かつ省エネルギーであることがあきらかとなった。

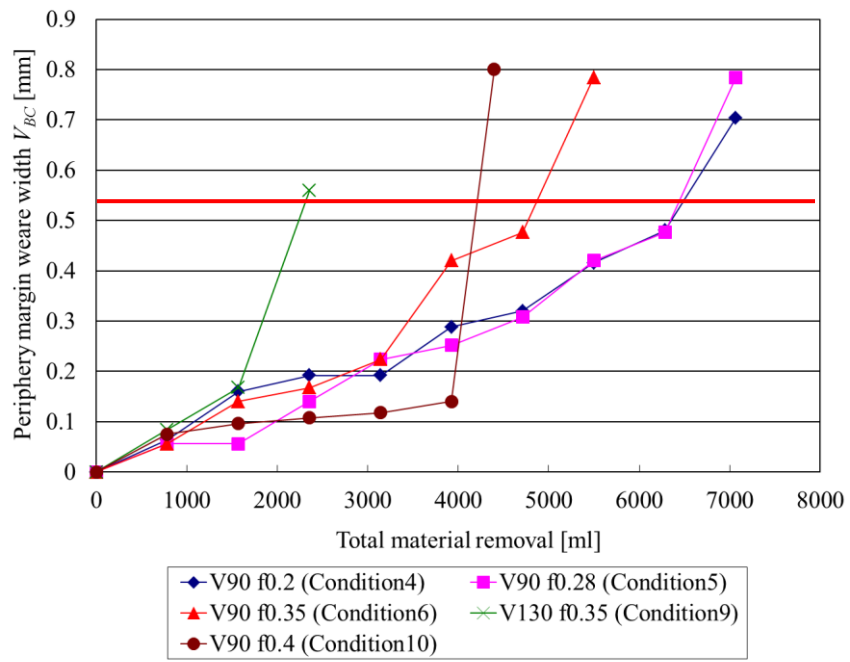
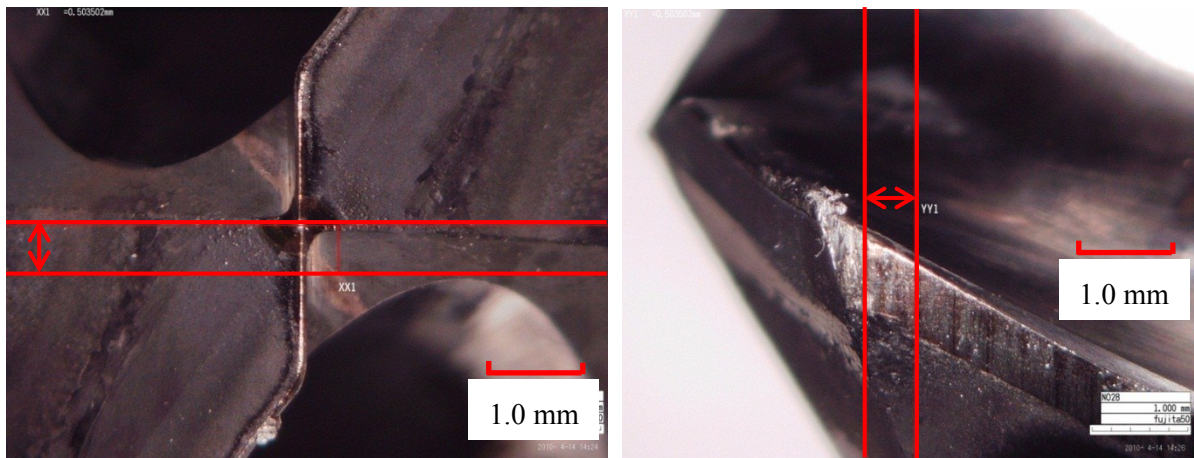


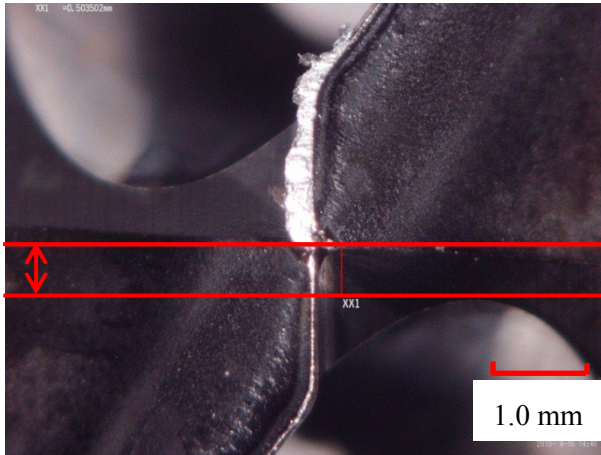
Fig.5.19 Results of tool life test on drilling



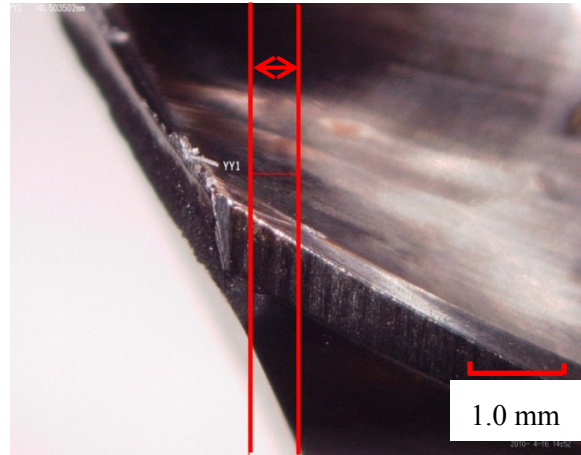
(a) Top

(b) Margin

Fig. 5.20 Pictures of drill under condition9 (3140 ml)

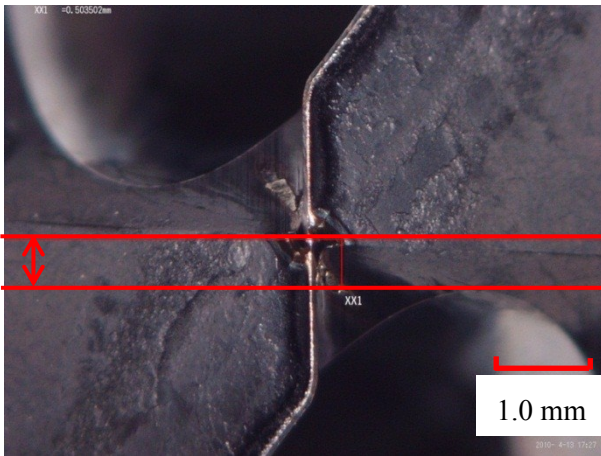


(a) Top

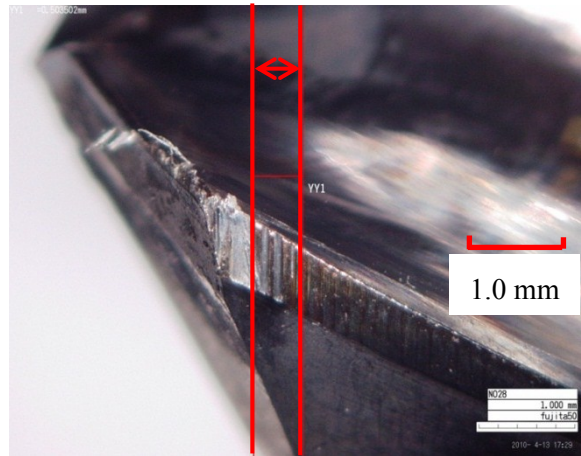


(b) Margin

Fig. 5.21 Pictures of drill under condition4 (7700 ml)

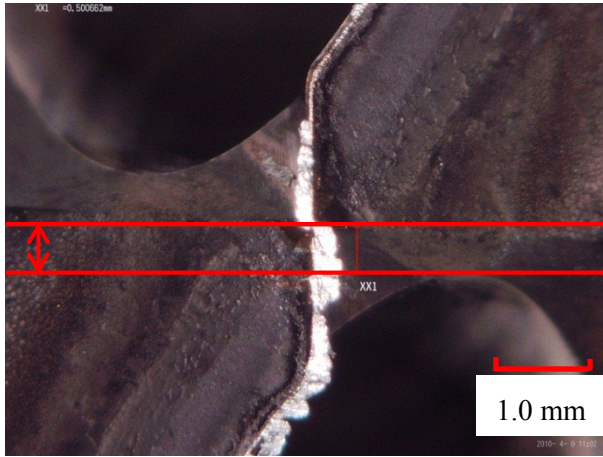


(a)Top

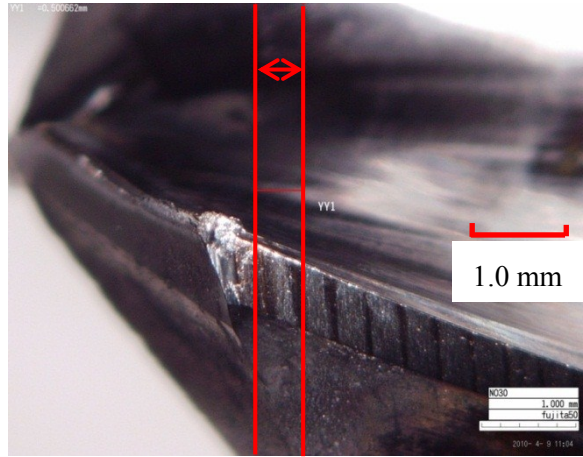


(b) Margin

Fig. 5.22 Pictures of drill under condition5 (7700 ml)

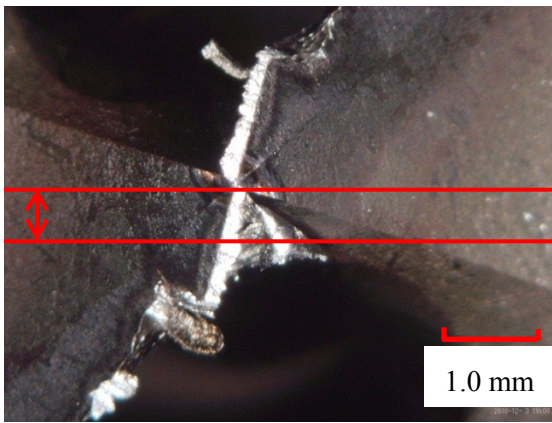


(a) Top

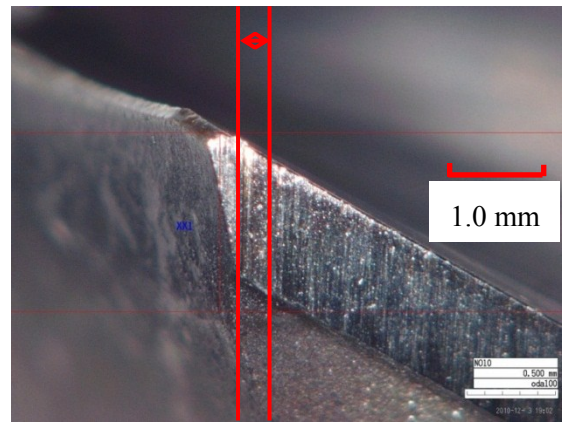


(b) Margin

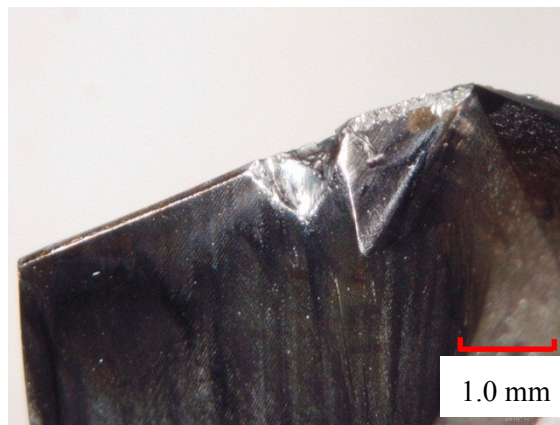
Fig. 5.23 Pictures of drill under condition6 (5500 ml)



(a) Top



(b) Margin



(c) Rake face

Fig. 5.24 Pictures of drill under conditon10 (4710 ml)

Table 5.7 Experimental results on electric energy during drilling

No.	Parameter		Electric energy [Wh]	Electric energy per material removal [Wh/ml]	Material removal rate [ml/min]	Cycle time [s]
	V [m/min]	f [mm/rev.]				
1	50	0.20	28.1	3.0	25.0	32
2	50	0.28	23.5	2.5	35.0	24
3	50	0.35	20.9	2.2	43.8	21
4	90	0.20	23.8	2.5	45.0	21
5	90	0.28	20.9	2.2	63.0	16
6	90	0.35	19.8	2.1	78.8	14
7	130	0.20	21.5	2.3	65.0	16
8	130	0.28	19.1	2.0	91.0	13
9	130	0.35	16.5	1.8	113.8	12

5.3.5 ケーススタディ1 (実ワークにおける評価)

前節までの結果より、フェイスミル、エンドミル、ドリル加工における消費電力量および工具寿命を考慮した最適条件を決定した。この結果の妥当性を検証するため、図5.25に示すワークを加工し、初期条件、最適条件における消費電力量の比較を行った^{5.10}。フェイスミルでワーク上面、エンドミルでワーク外周側面、ドリルで上面穴あけ加工を行った。表5.8に工程、工具、各切削条件を示す。被削材は同じS45Cとした。

表5.9にケーススタディの結果を示す。なお、その他は加工以外に消費されている電力量であり、アプローチ、エスケープ、工具交換などの消費電力量が含まれている。表に示すように、初期条件から最適条件を変更することで、総消費電力量が69.1 Whから46.9 Whに減少し、約47%の消費電力量が削減可能となった。この結果は、単に切削条件を高く設定するだけでなく、工具寿命も考慮しており、工作機械に求められている良品を安定して生産するという要求も十分満足する結果となっている。

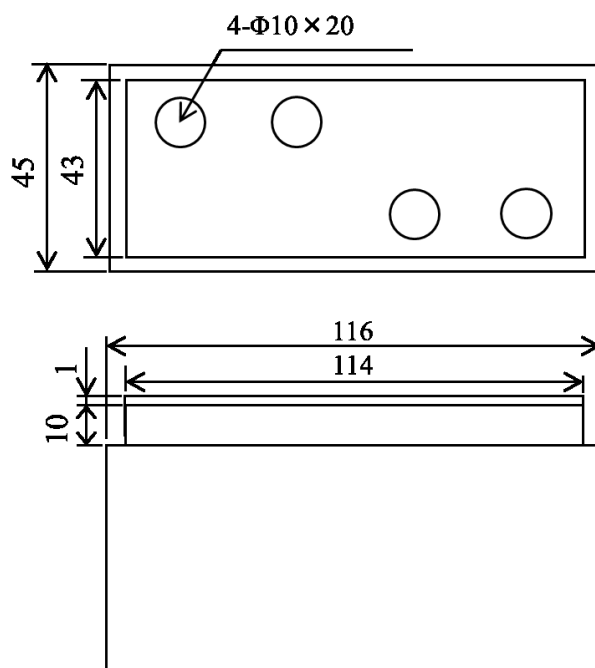


Fig.5.25 The workpeice of case study

Table 5.8 Cutting conditions on case study

Operation	Tool	Primary conditions			
		Cutting speed V [m/min]	Feed speed f [mm/tooth] [mm/rev.]	Axial depth of cut a_p [mm]	Radial depth of cut a_e [mm]
N1	Φ80 mm Face mill	200	0.20	1.0	45
N2	Φ10 mm End mill	90	0.10	1.0	1.0
N3	Φ10 mm Drill	90	0.28	20	5.0
		Optimum conditions			
N1	Φ80 mm Face mill	250	0.30	1.0	45
N2	Φ10 mm End mill	130	0.15	1.0	1.0
N3	Φ10 mm Drill	90	0.35	20	5.0

Table 5.9 Results on electric energy during case study

	Operation	Primary conditions	Best conditions
Electric energy [Wh]	Face milling	12.6	9.1
	End milling	33.7	17.1
	Drilling	12.0	10.5
	Others	10.8	10.2
	Total	69.1	46.9
Cycle time [s]		101.0	66.6

5.3.6 ケーススタディ2 (深穴加工における消費電力量削減)

本項では、深穴加工における消費電力量について述べる。一般的に小径の工具を用いた深穴加工を行う際は、切りくず詰まりによるドリルの折損防止のため、図5.26に示すようなCNCの固定サイクルを用いた定位置ペッキングを行う^{5.11)}。これは、プログラムで指定した深さを加工するつど、工具を逃がすペッキング動作を繰り返すものである。しかし、この方法は加工状態をモニタリングしておらず、常に同じ条件で加工を続けている。そのため、適切なペッキング距離を設定しないと切りくず詰まりによる工具欠損、折損の可能性がある。一方で、これを避けるためにペッキング距離を大きく設定しすぎると、加工能率が低下し消費電力量が大きくなってしまう。また、高圧クーラントを用いて切りくず詰まりを解消する方法もあるが^{5.12)}、高圧クーラント装置では大きく電力量が消費され、省エネルギー加工とは言いがたい。そこで、本研究では適応ペッキングを提案し^{5.13)5.14)}、消費電力削減の一方策として検討した。

本研究で採用した適応ペッキングは、主軸ロードメータ値のモニタリングを行った。穴の入り口部の切削トルクと切削中の切削トルクの差が一定以上になった時点でドリルのペッキングを行う。この適応ペッキング機能により、加工中に切りくず詰まりが発生したときにのみペッキングを行うため、不必要なペッキングの回数を減らすことができる。また、主軸ロード値をモニタリングしているため、切りくず詰まりによる工具欠損、折損も防止できる。

本機能の有効性を確認するため、固定サイクルによるペッキングと、適応ペッキングの比較実験を行った。表5.10は切削条件を示す。工具はΦ6.0 mmのTiAlCr+TiSiの多層コーティングドリル、被削材は切りくず詰まりが発生しやすいステンレス鋼SUS304、加工穴深さは30 mm (L/D=5) とした。送り速度は工具メーカーの推奨範囲の上限である $f=0.15$ mm/rev. とした。これは、送り速度を高く設定すると消費電力量は削減できるが、工具欠損の可能性が高くなるという問題を解消する方法として、適応ペッキングが適していると考えられるためである。定位置ペッキング距離は一般的に用いられている3.0 mm (L/D=0.5) とした。適応ペッキングの閾値は予備試験を行い、穴の入り口のロードメータ値の1.5倍の3.75%とした。

測定結果を表5.11に示す。また、図5.27に固定サイクル、図5.28に適応ペッキングにて加工したとき際の主軸ロードメータの時間変化を示す。表5.11に示すように、3穴を加工したときの固定サイクルでのサイクルタイムは33.3秒、消費電力は29.2 Wh、適応ペッキングでのサイクルタイムは26.9秒となり約19%短縮、消費電力は23.5 Whとなり約19%の削減が可能となった。さらに、図5.27、5.28より加工中の最大ロードメータ値は固定サイクルの場合には6%、適応ペッキングの場合には4%となり、工具欠損、折損などの原因となる切りくず詰まりを防止する効果もあることがあきらかになった。

以上のように、適応ペッキングを用いることで省エネルギーとなることがあきらかになったが、主軸ロードのモニタリング精度、遅れ時間等の問題を解決する必要がある。

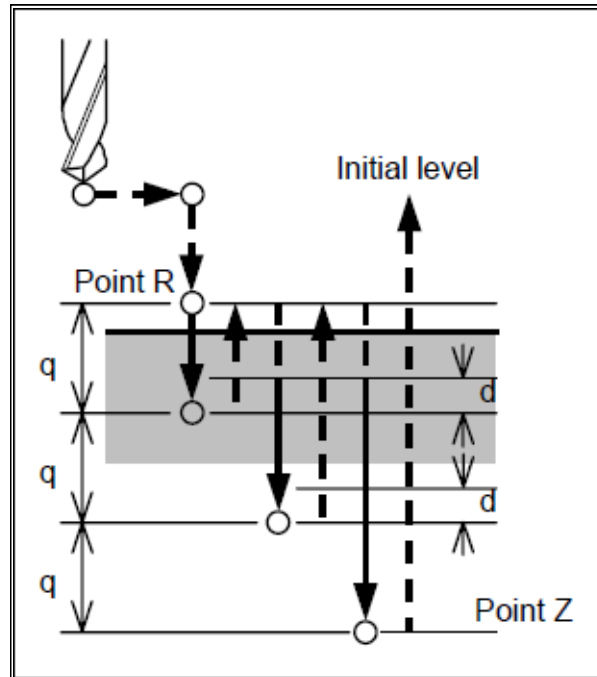


Fig.5.26 Fixed pecking cycle

Table 5.10 Cutting condition on pecking cycle

Tool	Φ6 coated carbide drill
Workpiece	SUS304
Cutting speed V [m/min]	55
Feed rate f [mm/rev.]	0.15
Depth of hole a_p [mm]	30
Pecking distance q [mm]	3

Table 5.11 Results on electric energy and cycle time

	Cycle time [s]	Electric energy [Wh]
Fixed pecking cycle	33.3	29.2
Adaptive pecking cycle	26.9	23.5

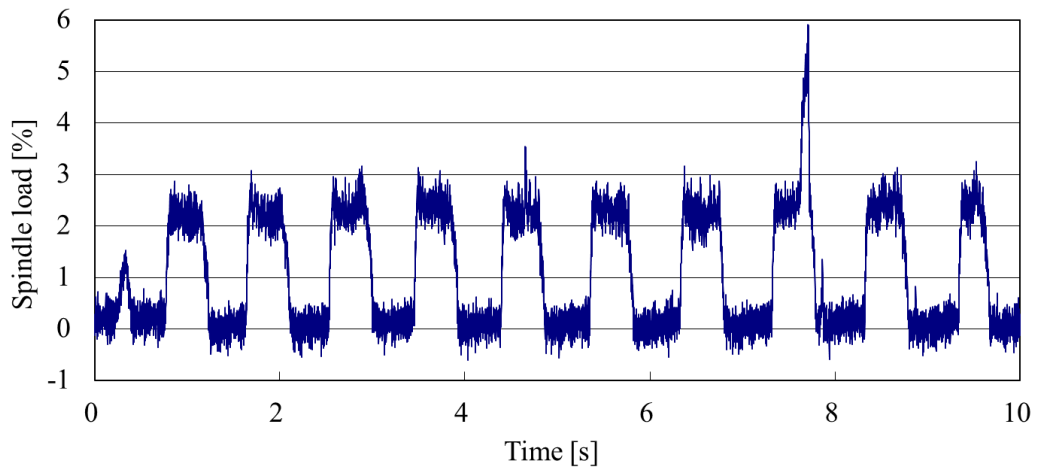


Fig.5.27 Spindle load on fixed pecking cycle

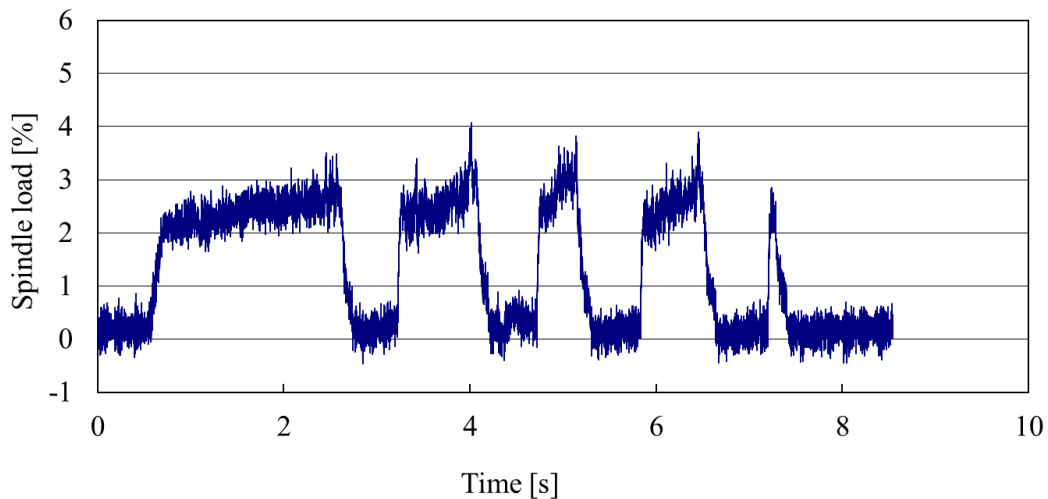


Fig.5.28 Spindle load on adaptive pecking cycle

5.3.7 ケーススタディ3 (主軸加速・送り軸位置決め時の消費電力量削減)

前節まで述べた結果より、消費電力量削減のためには工具寿命に悪影響を及ぼさない範囲で、切削条件を高く設定することが重要である。近年のマシニングセンタは、主軸系、送り系ともに高速化が進んでおり、かつ工具のコーティング技術の進歩によりこのような高速加工の実現が可能となっている。一方で、マシニングセンタでは工具交換のたびに主軸系は停止状態から使用回転数まで加減速を行なう。また、送り系は工具交換位置から加工開始位置まで早送りG00で運動する。よって、高速加工においてサイクルタイムを短縮するためには、主軸系および送り系の加減速時間が重要となる。そこで本項では、主軸系、送り系の消費電力量削減を目的とした加減速の最適化を図ることとした。

一般的に、サイクルタイムを短縮するためには主軸系の加速と送り系の位置決めは同時に行われる。高速加工において主軸回転数を 10000 min^{-1} 程度で使用する場合には、主軸系の加速時間よりも送り系の位置決め時間が短いことが多い。例として主軸回転数、送り系の速度、位置の時間変化を図5.29に示す。図5.29に示すように、送り系が位置決め完了1秒後に、主軸の加速が終了し使用回転数に達していることがわかる。そこで本研究では、図5.30に示すような主軸系の加速と送り系の移動がほぼ同時に完了する制御手法を用いた。この制御手法を用いることで、主軸回転数 10000 min^{-1} 、300 mmのX軸運動を同時におこなった場合には、1時間の運転で従来制御方法では5.41 kWhの総消費電力量に対し、本研究で用いた制御手法では4.83 kWhと約10%の消費電力量を削減することが可能であった。

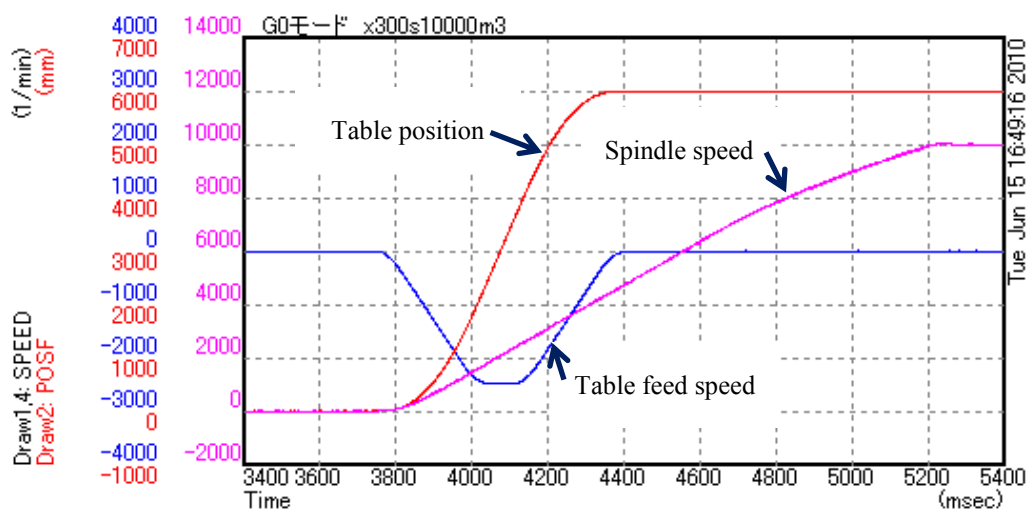


Fig.5.29 Results on spindle speed, feed speed and table position using conventional control

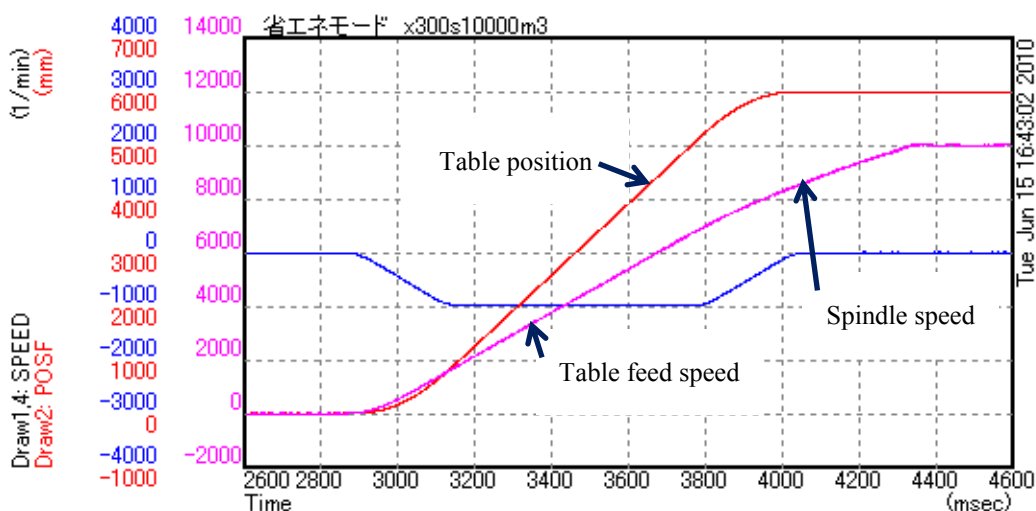


Fig.5.30 Results on spindle speed, feed speed and table position using new control

5.4 傾斜ミリング加工における傾斜角度が消費電力量に及ぼす影響

本節では第4章で述べた5軸制御立形マシニングセンタを用いて、傾斜ミリング加工時に消費する電力量の測定結果および考察を述べる。前章の結果より、適した切削条件を選定することで、長寿命でかつ消費電力量の削減が可能であることがわかった。さらに、本節では5軸制御マシニングセンタを使用する際に追加のパラメータとなる被削材傾斜角度に着目し、これを種々変化させて消費電力量に及ぼす影響を検討した。

5.4.1 傾斜ミリング加工時における消費電力量

表4.17で示した切削速度 $V=80$ m/min, 送り速度 $f=0.15$ mm/tooth, 法線方向切込み量 $a_p=1.0$ mm, ピックフィード量 $p=4.0$ mmとして、傾斜角度 θ を種々変化させたときの主軸系の消費電力量を測定した。図5.31は傾斜角度 θ と消費電力量の関係を示す。また、参考として主軸ロードを測定した結果も記載する。図5.31より、傾斜角度 θ が0度から20度までは消費電力量はほぼ一定であるが、それ以上に傾斜角度が大きくなるにしたがい消費電力量が増加し、45度および60度付近が最大となった。また、主軸ロード値の結果より、消費電力量の結果と同じ傾向を示している。以上より、消費電力量のみ考慮すれば、傾斜角度 θ を20度以下にすることで省エネルギーとなることがわかる。一方、工作機械に求められている良品を安定して生産することを考慮すると、工具寿命の結果も重要となる。特に、ボールエンドミルは金型加工に多く使用されるが、一般的に金型加工の加工時間は非常に長く、また金型自体も高価である。そのため、より安定して生産することが重要視される。さらに、ボールエンドミルは中仕上げ、仕上げ加工に用いられることが多く、仕上げ面粗さも重要な評価関数となる。次項にそれらの検証結果を示す。

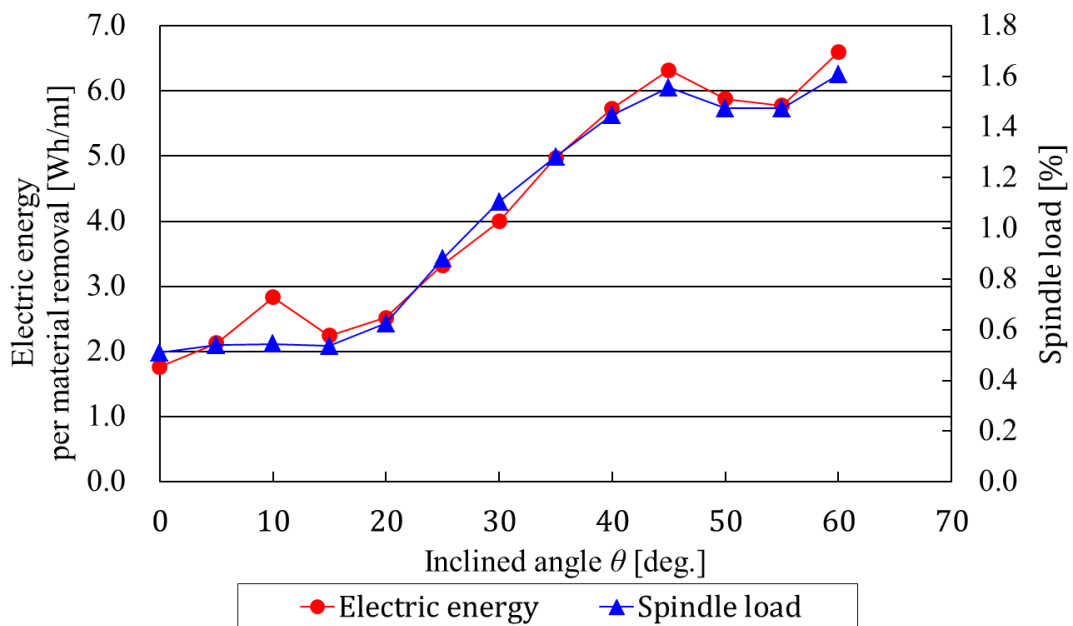


Fig.5.31 Relation between electric energy, spindle load and inclined angle

5.4.2 傾斜ミリング加工時の仕上げ面粗さ測定

傾斜角度 θ が0度、15度、45度、60度における仕上げ面粗さの評価を行った。本研究の対象は中仕上げ加工を対象としているが、中仕上げ加工の仕上げ面粗さが悪いと、仕上げ加工の加工時間が長くなり消費電力量も大きくなる。したがって、中仕上げ加工における仕上げ面粗さも重要な評価関数である。表5.11は算術平均粗さ Ra の測定結果を示す。表5.12より傾斜角度0度の仕上げ面粗さが $6.4 \mu\text{m}$ と最も悪かった。これは、傾斜角度0度では工具中心付近にて加工を行うために十分な切削速度が得られず、加工面がむしれているためである。この現象を避けるためにも、5軸制御マシニングセンタを用いて工具、または被削材を傾斜させ、十分な切削速度が得られる加工径で加工を行うのが一般的である。一方、15度、45度、60度の仕上げ面粗さは $2.2 \mu\text{m}$ から $3.5 \mu\text{m}$ となり有意差は見られなかった。

Table 5.12 Results of surface roughness

Inclined angle θ [deg.]	Surface roughness Ra [μm]
0	6.4
15	3.3
45	2.2
60	2.8

5.4.3 工具摩耗が消費電力量に及ぼす影響

つぎに、実用範囲内での条件であることを確認するため、傾斜角度を種々変更し工具寿命試験を行った。傾斜角度が工具寿命に及ぼす影響を図5.32に示す。また、図5.33は0度、図5.34は15度、図5.35は45度、図5.36は60度における工具寿命時の工具観察結果を示す。工具寿命はインサート先端の逃げ面摩耗量 V_B が0.3 mmに達したときとした。図5.32に示すように、傾斜角度0度と45度の工具寿命が最も短く、送り距離120 m付近で工具寿命に至っている。一方で、60度では170 m、15度では180 m付近まで工具寿命が延びている。また、図5.33、5.34、5.35、5.36より、各傾斜角度において、加工している切れ刃の場所が異なることがわかる。つまり、傾斜角度によって実切削速度や切りくず形状が異なると推測される。これにより、消費電力量が変化したと推測される。この考察は後述する。

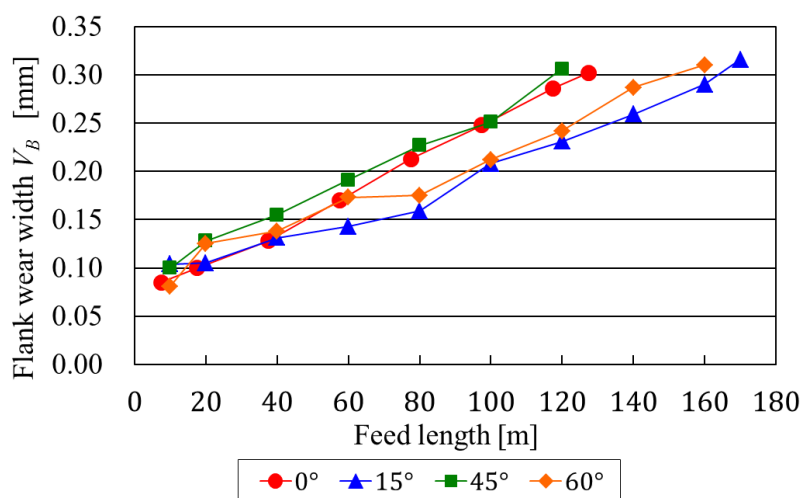


Fig.5.32 Results of tool life test on inclined machining

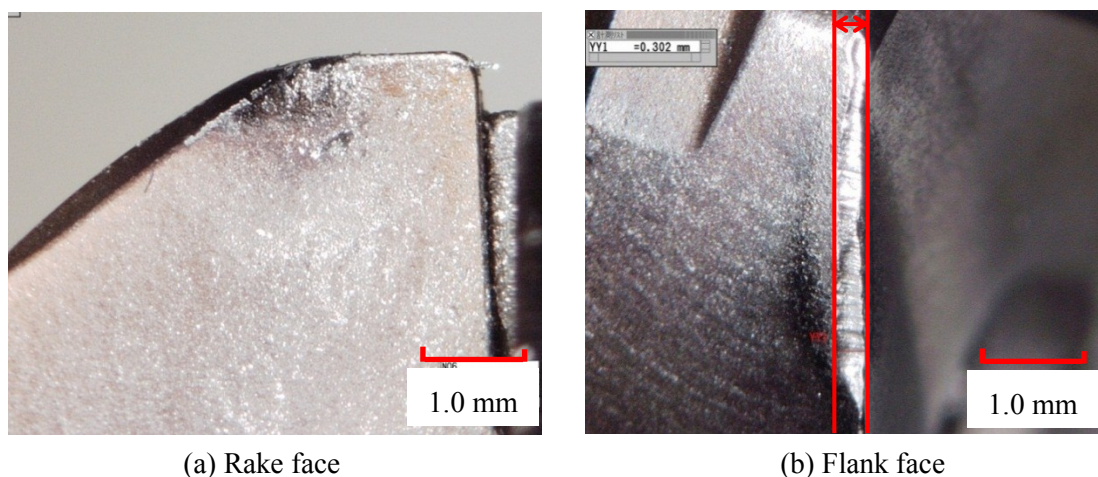
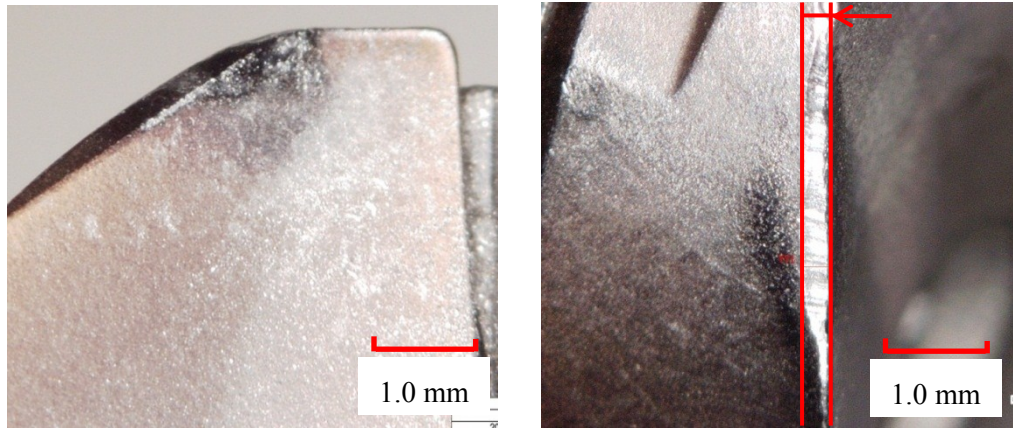


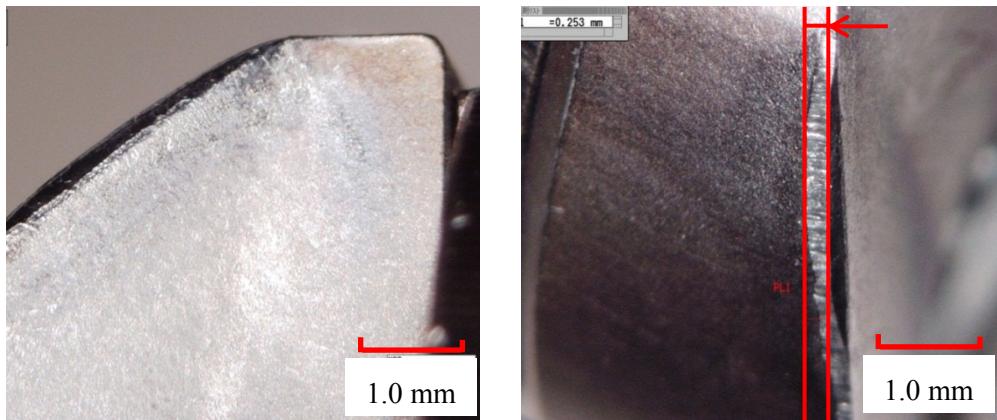
Fig.5.33 Pictures of ball end mill under 0 deg. (120 m)



(a) Rake face

(b) Flank face

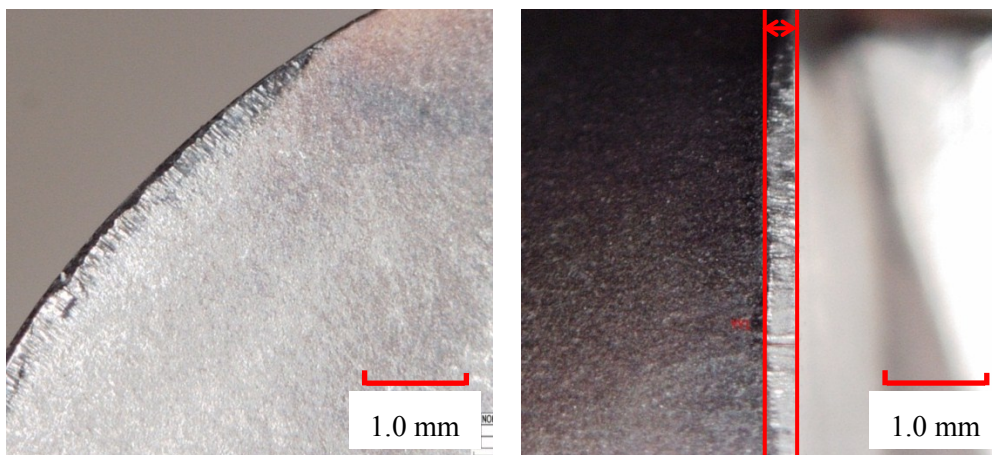
Fig.5.34 Pictures of ball end mill under 15 deg. (180 m)



(a) Rake face

(b) Flank face

Fig.5.35 Pictures of ball end mill under 45 deg. (120 m)



(a) Rake face

(b) Flank face

Fig.5.36 Pictures of ball end mill under 60 deg. (170 m)

つぎに、図5.37は工具の摩耗進行による消費電力量の変化を示す。なお、仕上げ面粗さ、工具寿命の結果より、傾斜角度0度は除外した。図5.37に示すように、傾斜角度45度と60度では工具摩耗が進行するにしたがって消費電力量が大きく上昇した。一方、傾斜角度15度は工具摩耗の進行による消費電力量の増加が非常に小さいことがわかった。例えば、傾斜角度が $\theta=15$ 度の場合、新品工具での消費電力は1.4 Wh/mlであったのに対し120 m切削後の消費電力量は1.9 Wh/mlと約36%の増加となった。一方、傾斜角度が $\theta=45$ 度の場合、新品工具での消費電力量が5.8 Wh/mlであるのに対し、120 m切削後の消費電力量は8.9 Wh/mlと約53%の増加となった。さらに、傾斜角度が $\theta=60$ 度の場合、新品工具での消費電力量が7.1Wh/mlであるのに対し、160 m切削後の消費電力量は11.3 Wh/mlと約59%の増加となった。また、120 mでの総消費電力量は $\theta=15$ 度で866 Wh、 $\theta=45$ 度で4058 Whとなり、傾斜角度を $\theta=15$ 度とすることで約79%の消費電力量削減となる。

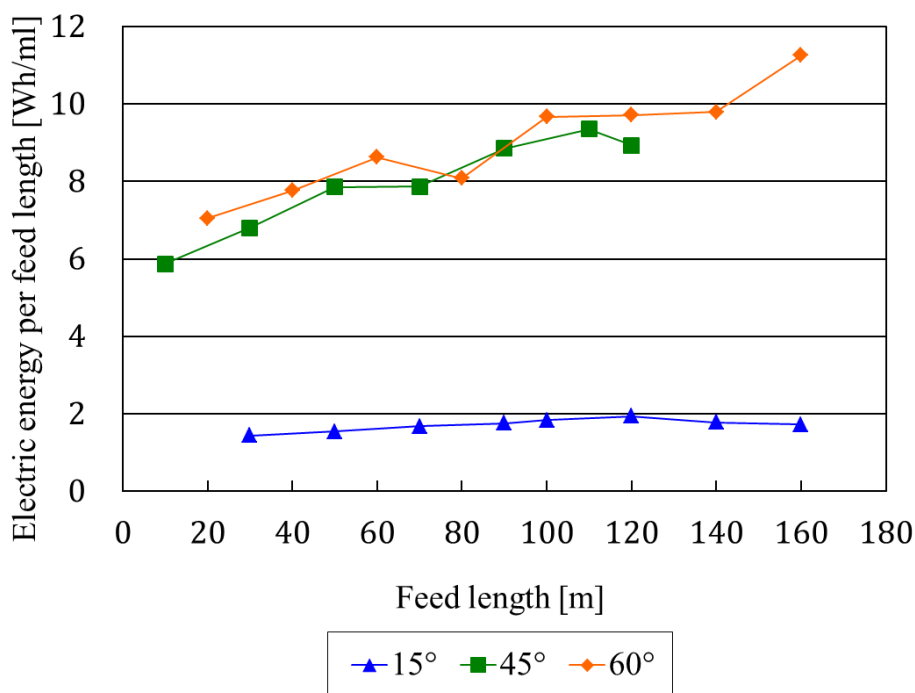


Fig.5.37 Electric energy according to the tool weariness progressed

5.4.3 考察

本項では、前節までで得られた結果の原因について考察をする。

ボールエンドミルで傾斜面を加工する場合の工具とワークの干渉関係を図5.38(a), 拡大図を(b)に示す。図中の斜線部が1つの切刃によって除去され、切りくずとなる領域である。この斜線部で除去される部分が最も厚くなる場所の厚さを最大切りくず厚さ h_m と定義する。ボールエンドミル加工の際の干渉領域は図5.38に示すように各部で実質切込みが異なり、消費電力量に比例する切削抵抗の解析が困難である。そこで、干渉領域がはるかに簡単なストレートエンドミル加工のケースについての解析で代用する。ストレートエンドミル加工においては、最大実質切込み t_m と工具の接触長さ L の2次式によって切削抵抗の主分力 F_y は次式のように表すことができる^{5.15)}。

$$F_y = C_0 + C_1 \times h_m + C_2 \times L + C_3 \times h_m^2 + C_4 \times L^2 + C_5 \times h_m \times L \quad (5.1)$$

ここで、 $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$ は定数であり、種々の切削条件で h_m と L を変化させた場合の切削抵抗から計算される。ボールエンドミル加工において切削した薄い層を軸方向に分解すると式(5.1)が適用できる。したがって、式(5.1)を実験結果の定性的評価手段として適用した。

式(5.1)を切削条件である切込み深さ a_p と切込み幅 a_e から決まる被切削面積 a_c で除した値、すなわち比切削抵抗は式(5.2)で計算できる。

$$f_y = F_y/a_c = F_y/(a_p \times a_e) \quad (5.2)$$

図5.39は式(5.2)に実際の実験結果を適用したものであり^{5.15)}、比切削抵抗 f_y と最大実質切込み h_m の関係である。 h_m が小さい場合(=切りくずが薄い場合)には、比切削抵抗 f_y は非常に大きくなる。さらに、 h_m が大きくなるにしたがって比切削抵抗 f_y は徐々に小さくなり、ある h_m よりも大きくなるとほぼ一定となる。ワーク材料が延性に富むほどこの曲線は左に移動し、延性が低いほどこの曲線は右に移動する。1刃で除去するワークの体積が一定である場合には、送りが大きいほど実質切り込み h_m は大きくなる。したがって、比切削抵抗が小さくなる。さらに、式(5.2)より切削抵抗が小さくなり、ひいては消費電力量は小さくなる。また、軸方向切り込み a_p が大きくなるほど、実質切り込み h_m は小さくなり、比切削抵抗、切削抵抗ひいては消費電力量は大きくなる。これらの結果より、傾斜角度 θ が大きくなるほど、実質切り込み h_m は小さくなり、比切削抵抗、切削抵抗ひいては消費電力量は大きくなると推測される。そこで、切りくず形状の確認をするために、CADソフトウェアを用いて各傾斜角度の工具と被削材の干渉領域を算出した。図5.40(a)は0度、(b)は15度、(c)は30度、(d)は45度、(e)は60

度におけるきりくず形状の算出結果である。図5.40より傾斜角度により切りくず形状が異なるがわかる。これより、最大実切込み h_m も変化していると推測される。

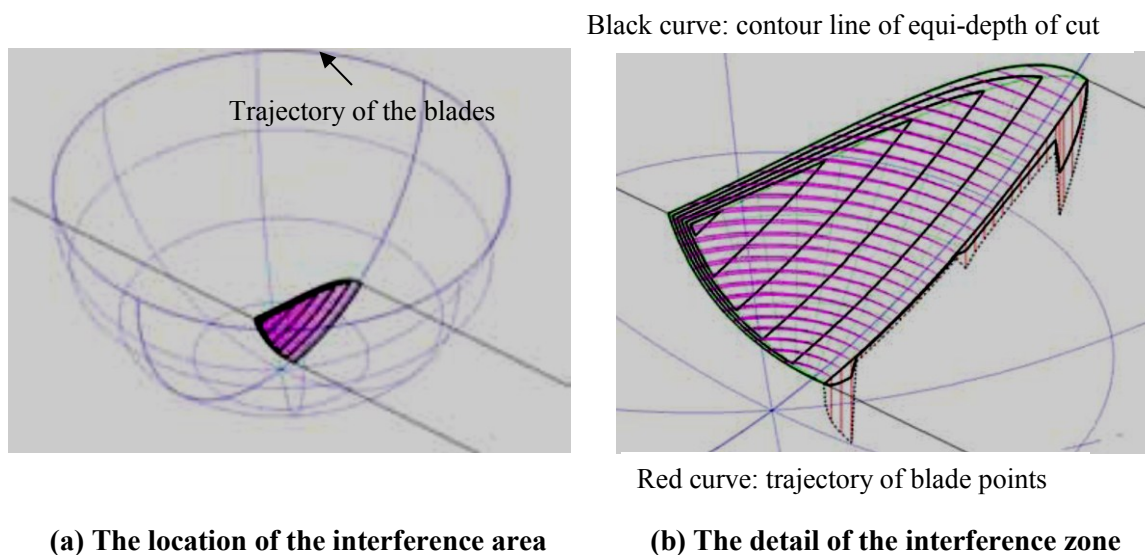


Fig.5.38 The interference area at the end milling process

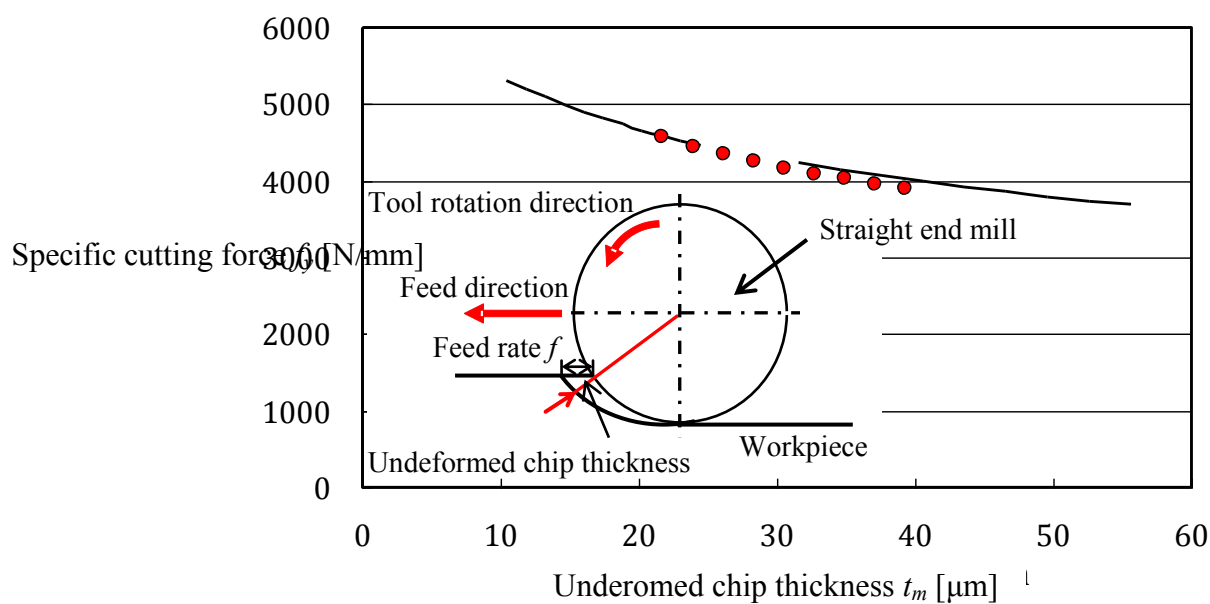
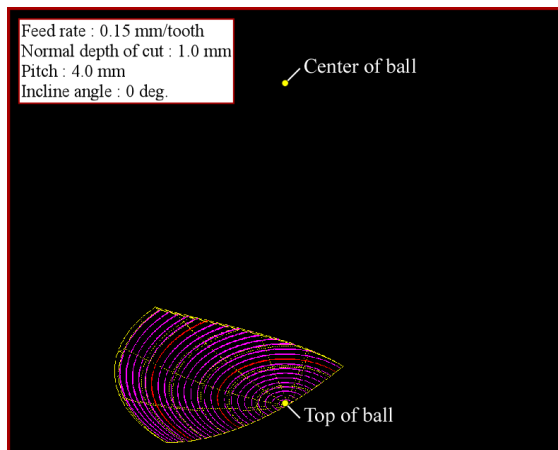
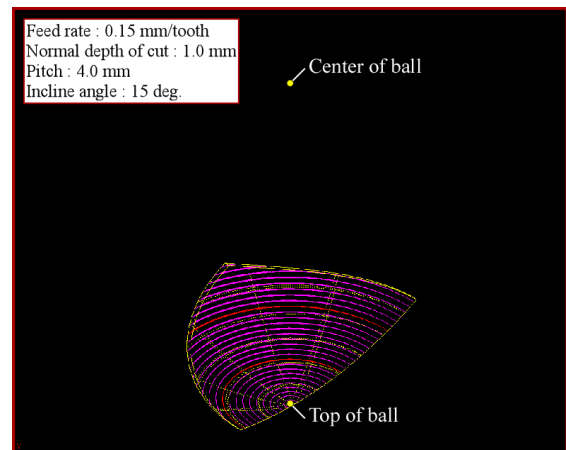


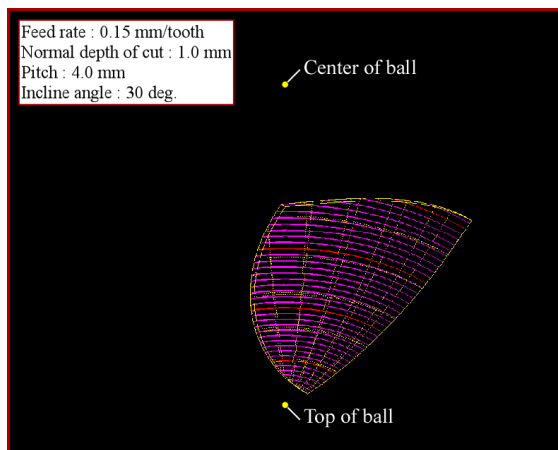
Fig.5.39 Relation between specific cutting force and maximum undeformed chip thickness (Workmaterial: Die steel SKD61 HRC51)



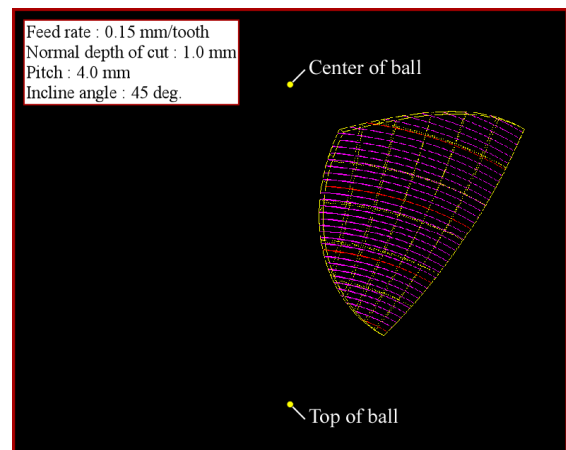
(a) 0deg.



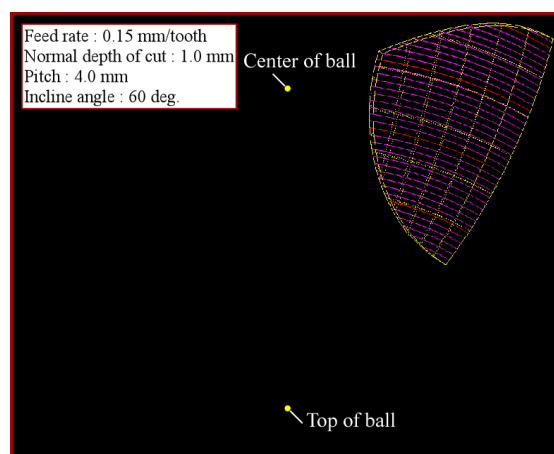
(b) 15deg.



(c) 30deg.



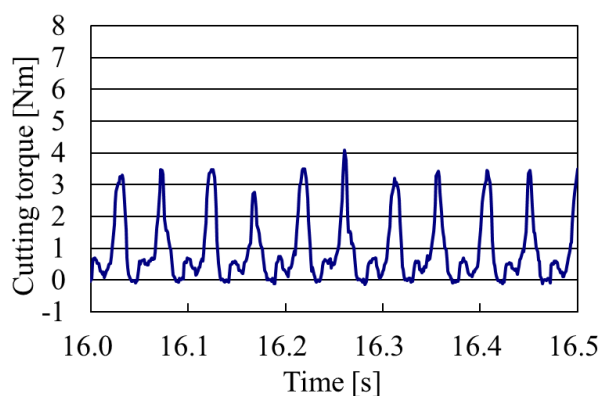
(d) 45deg.



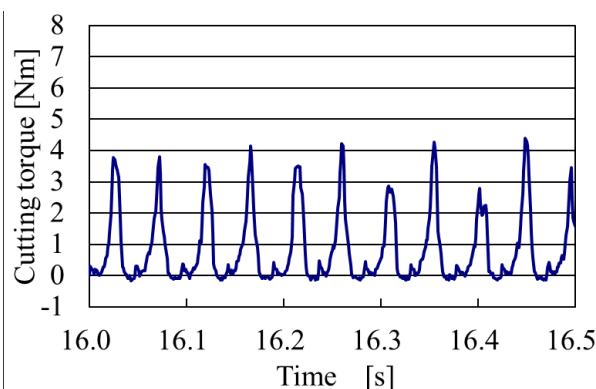
(d) 60deg.

Fig.5.40 The interference area at each inclined angle

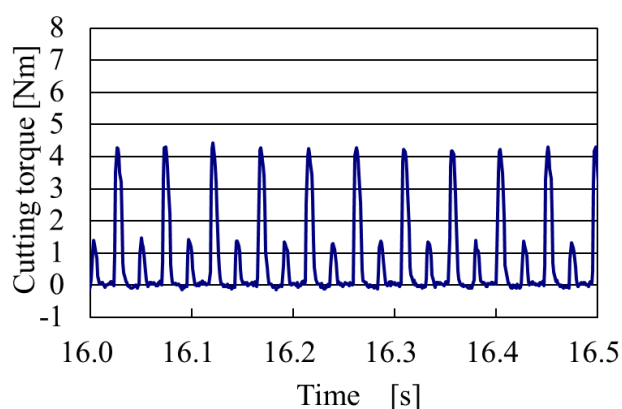
以上のように、傾斜角度が変化すると切りくず形状つまり実質切り込み h_m も変化し、切削抵抗ひいては消費電力量が変化すると推測された。この考察の妥当性を検証するために、各傾斜角度で切削抵抗の測定を行った。回転式4成分動力計9124B(日本キスラー(株)製)をマシニングセンタ主軸に取り付け、各角度に傾斜させた被削材を加工し、そのときの切削トルクを測定した。切削条件は表4.17と同じとした。図5.41(a)は0度、(b)は15度、(c)は30度、(d)は45度、(e)は60度の切削トルク測定結果である。図に示すように、最大切削トルクは傾斜角度が大きくなるほど大きくなっている。図5.42は各傾斜角度の最大トルクと消費電力量の関係を示す。図5.42より、傾斜角度30度以上は最大トルクと消費電力量の傾向は同じであり、前述したように傾斜角度が大きくなるにつれ実質切り込み t_m は小さくなり、切削抵抗ひいては消費電力量が大きくなったと考えられる。また、各切削トルクの測定結果より、0度、15度は1枚の切れ刃が切削を終える前に、次の切れ刃が加工を行っており連続切削となっている。一方、30度以上は1枚の切れ刃が切削を終え、切削トルクがゼロになってから次の切れ刃の切削が始まっており、その結果断続切削となっている。つまり、傾斜角度が大きくなるにつれて、切削トルクが大きくなりかつ強断続切削となる。したがって、切削抵抗により工具の振動が大きくなり消費電力量が大きくなったとも推測される。



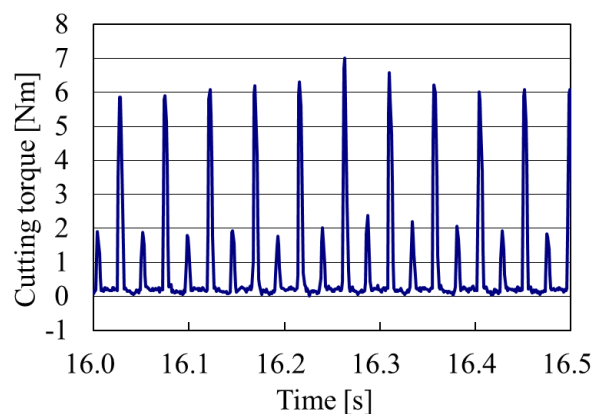
(a) 0 deg.



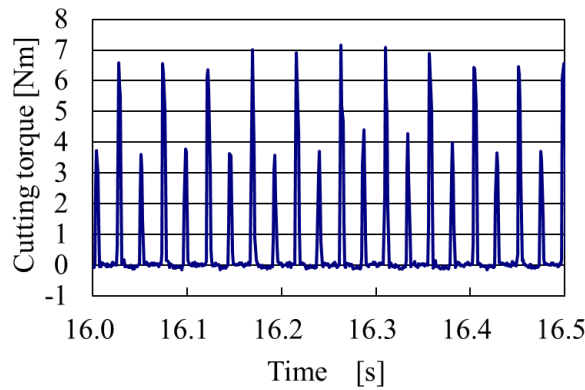
(b) 15 deg.



(c) 30 deg.



(d) 45 deg.



(e) 60 deg.

Fig.5.41 Cutting torque at inclined angle

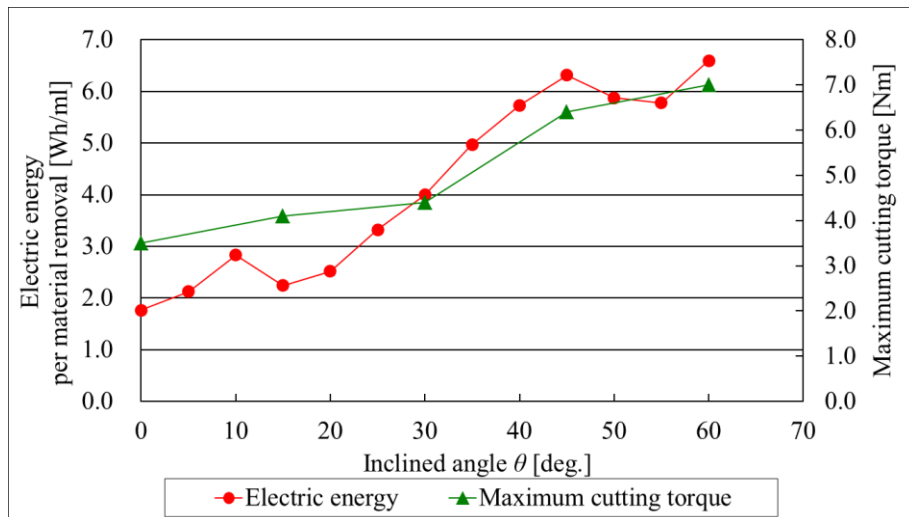


Fig.5.42 The comparison of power consumption with maximum cutting torque

一方で、図5.42より傾斜角度0度、15度はやや傾向が異なる。その考察を以下に示す。図5.43は本研究で行った傾斜ミリング加工の被削材と工具の干渉関係の断面図を示す。傾斜平面(傾斜角度 θ)を工具が上から下方向にピックフィードで移動し、紙面手前から奥へ等高線加工している。点 P_a は前加工面と切れ刃との境界部(1次境界部)、点 P_b はカスプの頂点であり、1つ前の切れ刃で作られた加工面との境界部(2次境界部)でもある。ここで、工具中心軸と線分 OP_a のなす角を1次境界角 α 、工具中心軸と線分 OP_b のなす角を2次境界部 β とすると、 α および β は式(5.3)、(5.4)で示すことができる。 a_p は法線方向切込み深さ[mm]、 p はピックフィード量[mm]、 r は工具半径[mm]を示す。なお、境界角 α 、 β は工具中心軸から反時計回りが正となる。また、1次境界角 α で切削している範囲はアップカット部、2次境界角 β で切削している範囲はダウンカット部となる。本研究で行った切削条件、法線方向切込み量 $a_p=1.0$ mm、ピックフィード量 $p=4.0$ mm、工具半径 $r=10$ mmより、式(5.3)、(5.4)を用いて被削材傾斜角度

θ と1次境界角 α 、2次境界角 β の関係を計算した結果を図5.44に示す。図5.44に示すように、傾斜角度 θ が0度から約25度までは、1次境界角 α が負の値を取っている。これは、約25度まではアップカットとダウンカットが混在していることを意味する。切削トルクにはこの影響が反映されないため、消費電力量と比較すると大きくなったと推測される。

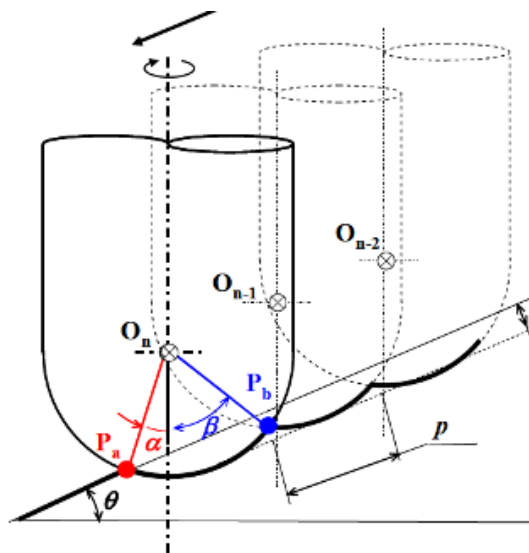


Fig.5.43 Machining model of the inclined surface by ball end mill

$$\alpha = \theta - \cos^{-1} \frac{r - a_p}{r} \quad (5.3)$$

$$\beta = \theta + \sin^{-1} \frac{p}{2r} \quad (5.4)$$

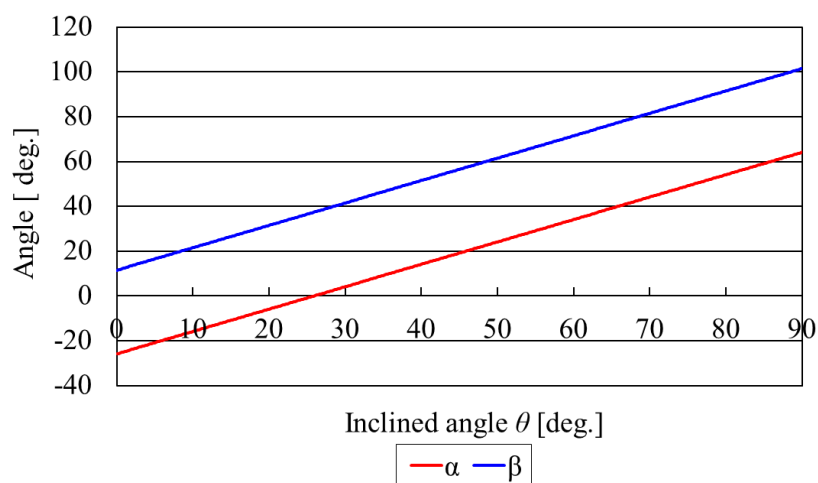


Fig.5.44 Calculated results of the relation between cutting angle point angle and boundary angle

そこで、アップカットとダウンカットが混在する影響を検証するために、図5.45に示すように、(1)ダウンカットのみ、(2)アップカットのみ、(3)ダウンカット、アップカット混在の3条件にて加工を行い、そのときの消費電力量を比較した。なお、切削速度、送り速度は表4.14と同じとし、法線方向切込み量、ピックフィードを変化させて3条件とも同じ切削除去量とした。図5.46は消費電力量測定結果を示す。図5.46に示すように、ダウンカットのみが最も消費電力量が大きく、ついでアップカットのみ、ダウンカット、アップカット混在が最も消費電力量が小さくなった。ダウンカットのみが約4.8 Wh/mlに対し、ダウンカット、アップカット混在が約1.3 Wh/mlと約73 %も小さくなった。これは、ダウンカット、アップカットの混在により、工具の振動、つまり主軸モータの電力振動が抑制されたためと推測される。

以上より、傾斜角度0度、15度はダウンカット、アップカットが混在していることより、切削トルクの結果より消費電力量が小さくなったと考えられる。

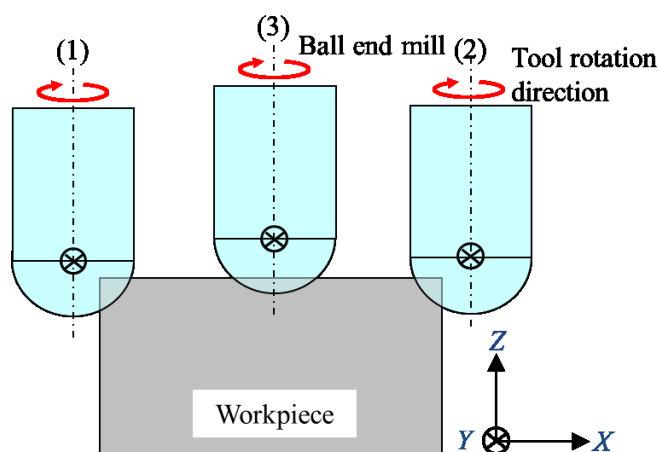


Fig.5.45 Measurement method for effect of down cut and up cut

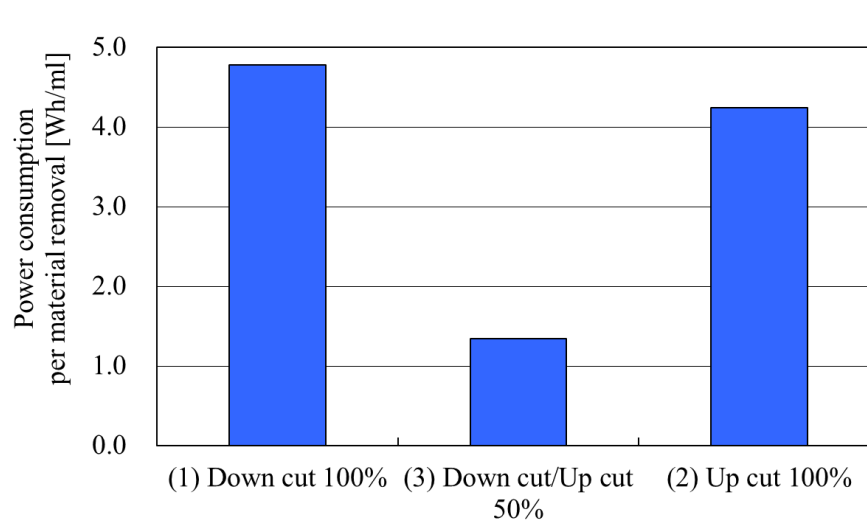


Fig.5.46 The result of effect of down cut and up cut

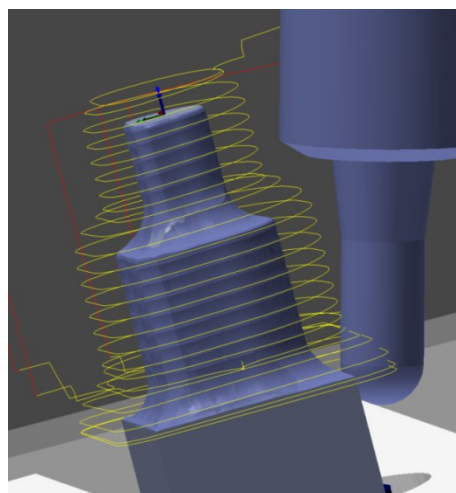
5.4.4 ケーススタディ

第5.4.1項より得られた結果の妥当性を確認するため、図5.47(a)に示すコアピンの中仕上げ加工を図5.47(b)に示す加工パスを用いて、その際の消費電力量を測定した。切削条件は同様に、切削速度 $V = 80 \text{ m/min}$ 、送り速度 $f = 0.15 \text{ mm/tooth}$ とした。また、傾斜角度 θ は15度、30度、45度、工具および被削材は同じものを使用した。

図5.48に消費電力量測定結果を示す。消費電力量は傾斜角度 θ が15度の場合は17.7 Wh、30度の場合は23.0 Wh、45度の場合は27.5 Whとなった。また、サイクルタイムは12分52秒であった。以上より、第5.4.1項と同様に工具傾斜角度 θ を15度とすることで消費電力量が削減できることがあきらかになった。



50mm×50mm×100mm



(a) Machined workpiece

(b) Path of the tool center

Fig.5.47 Core pin and tool path

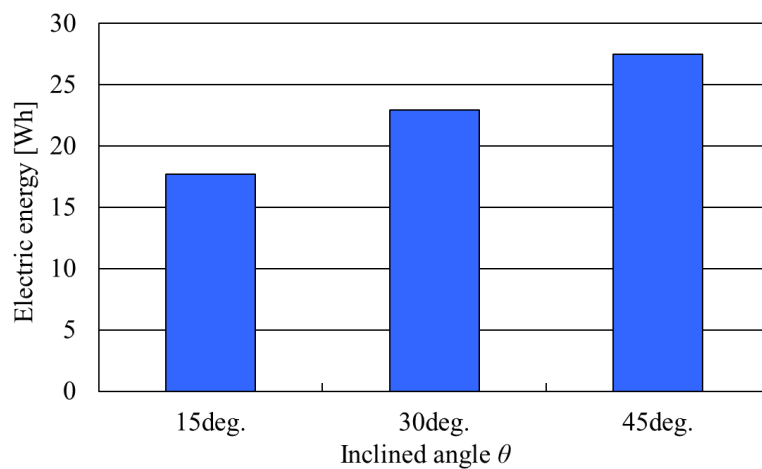


Fig.5.48 Results on electric energy under case study

ここで、第5.2節で述べた3軸制御立形マシニングセンタの結果である、切削速度や送り速度などの切削条件に着目した消費電力量削減を応用し、さらなる省エネルギー化を図った。標準切削条件である切削速度 $V=80$ m/min, 送り速度 $f=0.15$ mm/toothに対し、メーカー推奨の上限値である切削速度 $V=100$ m/min, 送り量速度 $f=0.20$ mm/toothをそれぞれ組み合わせて消費電力量を測定した。測定条件を表5.13に示す。傾斜角度 θ は15度とする。

図5.49に測定結果を示す。消費電力量, 加工時間はそれぞれ条件2が16.7 Wh, 10分39秒, 条件3が17.0 Wh, 11分1秒, 条件4が13.7 Wh, 9分27秒となった。また, メーカー推奨条件の範囲内であれば, 全てのケースにおいて正常摩耗となり問題なく加工できていることは確認済みである。

以上より, 工具寿命に悪影響を及ぼさない範囲, つまり良品を安定的に生産できる実用的な範囲内で切削条件を高く設定することで, さらに消費電力量を削減することができた。切削速度 $V=80$ m/min, 送り量速度 $f=0.15$ mm/tooth, 傾斜角度 θ が45度の条件と比較し, 最適化した条件である切削速度 $V=100$ m/min, 送り速度 $f=0.20$ mm/tooth, 傾斜角度 $\theta=15$ 度とすれば, 省エネルギーな加工となる。

Table 5.13 Measurement conditions

Condition	Cutting Speed V [m/min]	Feed rate f [mm/tooth]
1 (Standard Condition)	80	0.15
2	80	0.20
3	100	0.15
4	100	0.20

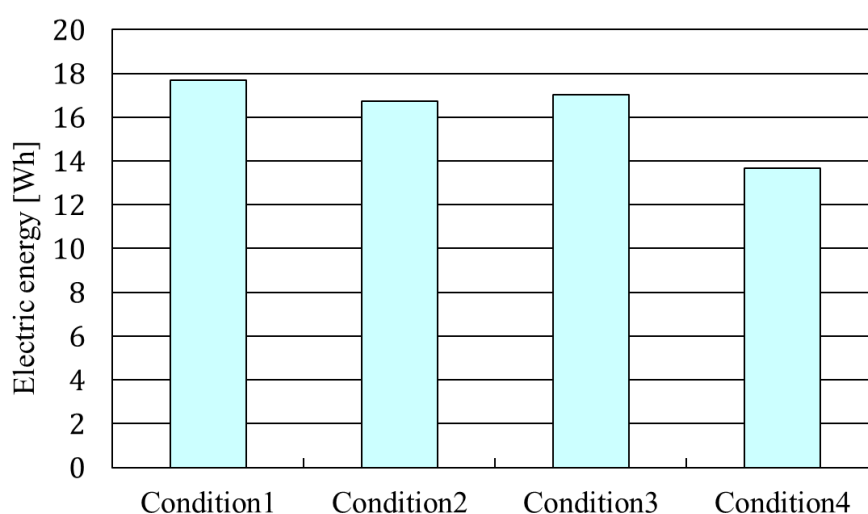


Fig.5.49 Results on electric energy under optimized cutting conditions

5.5 旋盤型複合工作機械における消費電力量

本節では第4章で述べた旋盤型複合工作機械を用いて、旋削、フェイスマイル、エンドミルおよびドリル加工時の消費電力量測定結果および考察を述べる。複合工作機械は、前節までに検証した旋削、ミリング、傾斜ミリング加工の全てが行える。そこで、これらの加工のうち旋削、フェイスマイル、エンドミル、ドリル加工の総消費電力量を測定し、どの加工形態が最も省エネルギーであるかを検証した。前節までの結果は、主軸系、送り系の加工負荷によって発生する消費電力量を評価していた。本節では、各加工において主軸系、送り系それぞれの消費電力量も評価することとした。また、本章の対象ではないが、待機電力量も評価した。

5.5.1 旋削加工における消費電力量

表4.19に示した切削速度 $V=120$ m/min, 送り速度 $f=0.20$ mm/rev., 切込み量 $a_p=2.0$ mmの条件にて、固定サイクルを用いて被削材の外周を10 ml分直線旋削加工したときの場合、1サイクルの電力消費の時間的変化を図5.50に示す。また、この測定値を時間的に積算して求めた消費電力量を図5.51に示す。その他の加工の消費電力量は後述する。図5.51に示すように、1サイクルの電力は消費される箇所として主軸モータ、送り軸モータ、その他周辺機器に分類できる。また、サイクルとしてはG00のアプローチ、エスケープ中の電力、G01の加工中の電力に分類できる。それぞれを分析すると、G01のプロセスでは主軸モータの消費電力量は5.7 Wh, 送り軸モータの消費電力量は0.3 Wh, 周辺機器その他の消費電力量は4.2 Whとなり、合計10.2 Whの電力量を消費していることがわかった。これは式(4.3)の第3, 4項の項目となる。また、切削を行っていない早送りG00のプロセスでは、主軸モータの消費電力量は2.1 Wh, 送り軸モータの消費電力量は2.8 Wh, 周辺機器その他の消費電力量は6.2 Whとなり、合計11.1 Whの電力量を消費している。旋削加工では合計21.3 Whの電力量を消費している。以降、この結果を基に他の加工との比較を行う。

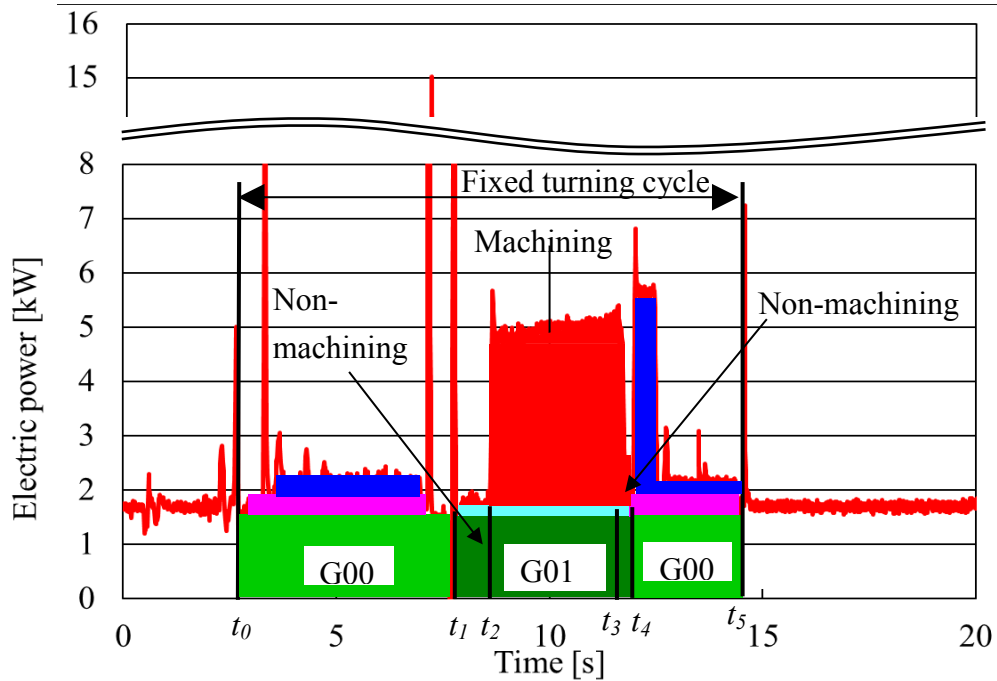


Fig.5.50 Electric power as function of time during a fixed turning cycle
Cutting condition; $V=120$ $f=0.2$ $a_p=2.0$

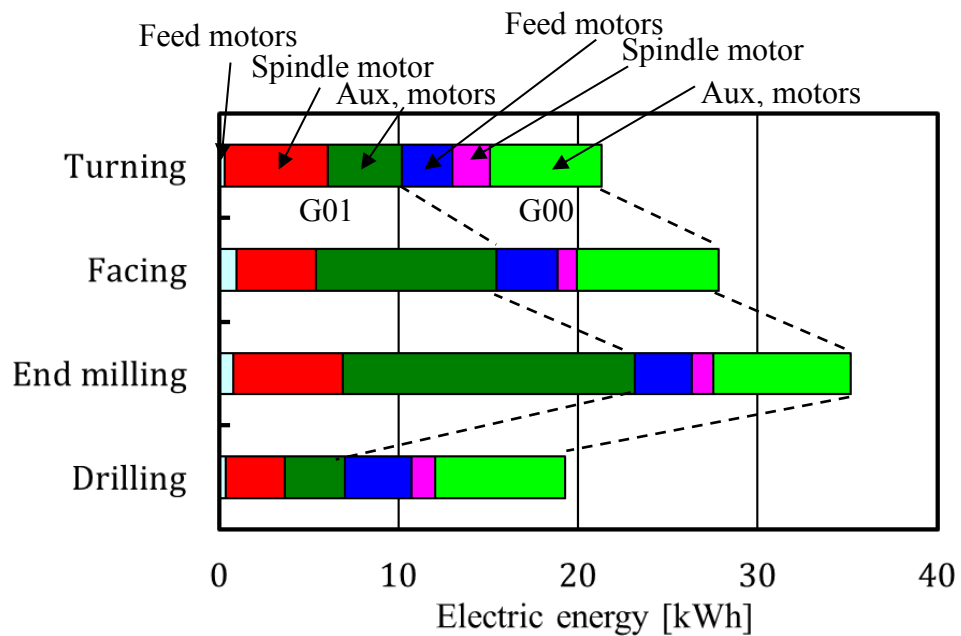


Fig.5.51 Electric energy during fixed cycle

5.5.2 フェイスミル加工における消費電力量

表4.21に示した切削速度 $V=90$ m/min, 送り速度 $f=0.20$ mm/rev., 切込み深さ $a_p=2.0$ mm, 切込み幅 $a_e=40$ mmの条件にて, 固定サイクルを用いて被削材上面を10 ml分フェイスミル加工した場合の, 1サイクルの電力消費の時間的变化を図5.52に示す. また, この測定値を時間的に積算して求めた消費電力量を図5.51に示す. G01のプロセスでの主軸モータの消費電力量は4.4 Wh, 送りモータの消費電力量は1.0 Wh, 周辺機器その他の消費電力量は10.1 Whとなり, 合計15.5 Whの電力量を消費していることがわかった. これは, 式(4.2)の第3, 4項の項目となる. また, 早送りG00のプロセスでは, 主軸モータの消費電力量は1.1 Wh, 送り軸モータの消費電力量は3.4 Wh, 周辺機器の消費電力量は7.9 Whとなり, 合計12.4 Whの電力量を消費しており, 総計27.9 Whの電力量を消費している. フェイスミル加工では旋削加工の場合と比較して, 全体で1.3倍の電力量を消費していることがわかる. この理由について考察する.

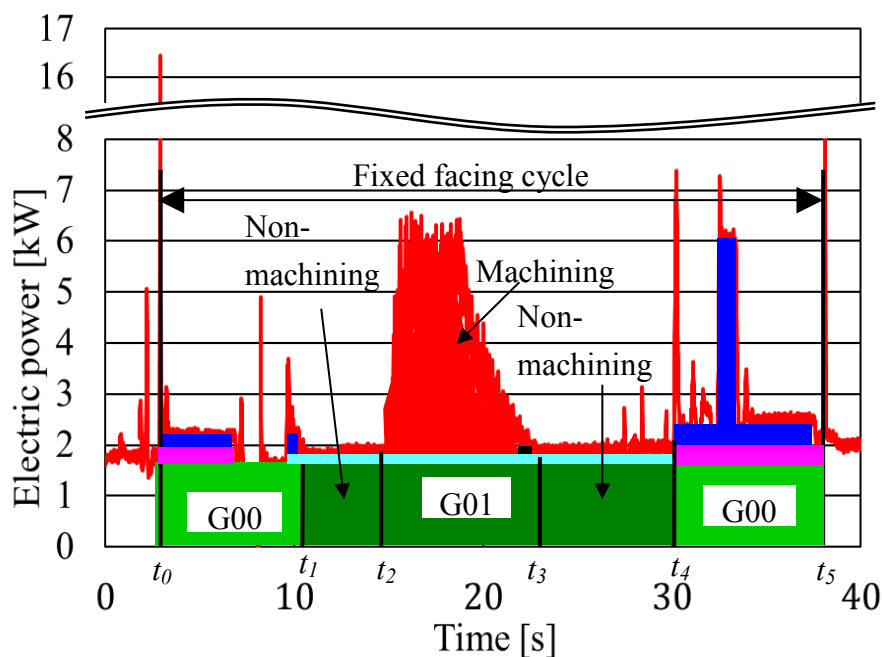


Fig.5.52 Electric power as function of time during a fixed facing cycle
Cutting condition; $V=120$ $f=0.2$ $a_p=2.0$, $a_e=40$

式(4.2)より, 実切削中において $\Phi 80\text{ mm}$ のフェイスミルのアプローチに要する時間(アプローチ時間)と工具全体が被削材上を通過するまで工具を運動させる時間(エスケープ時間)が必要である. このエアカット時間中にも周辺機器その他は電力量を消費しているため, それらが旋削加工の場合よりも大きくなっている. これは図5.52において, 旋削加工と比べて工具のアプローチ, エスケープ時間にかかなりの時間がかかっていることからわかる. また, 実切削中においても常に切れ刃が切りくずを除去している, つまり連続加工の旋削加工と異なり, フェイスミル加工は断続加工であるために切りくずを除去していない切れ刃が存在する. そのため, 一定量の切りくずを除去する際に, 旋削加工と比較し無駄な消費電力量が発生している. したがって, 同じ直径の工具を用いる場合, 切りくず排出性に問題ない範囲でできるだけ刃数を増やして, 切りくずを除去していない切れ刃をより少なくすることで, 消費電力量を削減することができる. これは, 幾何学的な切り屑形状が同じになる条件では, 送り速度が速くなるので, サイクルタイムの短縮, つまり待機電力量の削減にも繋がる.

また, フェイスミル加工において, G01中の送りモータの消費電力量が旋削加工と比べて1.0 Whと比較的大きいが, これは, 静止軸のX, Z軸における切削抵抗に対する保持力のための消費電力量が大きいためである.

5.5.3 エンドミル加工における消費電力量

同様に表4.23に示した切削速度 $V=120$ m/min, 送り速度 $f=0.12$ mm/rev., 切込み深さ $a_p=2.0$ mm, 切込み幅 $a_e=31$ mmの条件にて, 固定サイクルを用いて被削材上面を10 ml分エンドミル加工したときの, 1サイクルの電力消費の時間的变化を図5.53に示す. また, この測定値を時間的に積算して求めた消費電力量を図5.51に示す. G01のプロセスでの主軸モータの消費電力量は6.1 Wh, 送りモータの消費電力量は0.8 Wh, 周辺機器その他の消費電力量は16.2 Whとなり, 合計23.1 Whの電力量を消費していることがわかった. また, 早送りG00のプロセスでは, 主軸モータの消費電力量は1.1 Wh, 送り軸モータの消費電力量は3.2 Wh, 周辺機器の消費電力量は7.7 Whとなり, 合計12.0 Whの電力量を消費しており, 総計35.1 Whの電力量を消費している.

これは, フェイスミル加工と同様にエンドミル加工においても, アプローチ, エスケープが必要なこと, また断続加工であるために切りくずを除去していない切れ刃が存在するためである. フェイスミルと比較して工具径が小さいため, アプローチ, エスケープ時間が小さいが, 10 ml除去するのに要する切削送りG01のプロセスが約32秒とフェイスミル加工の約1.7倍も長い. そのため, 周辺機器その他の消費電力量が大きくなり, 全体の消費電力量がフェイスミル加工よりも大きくなっている.

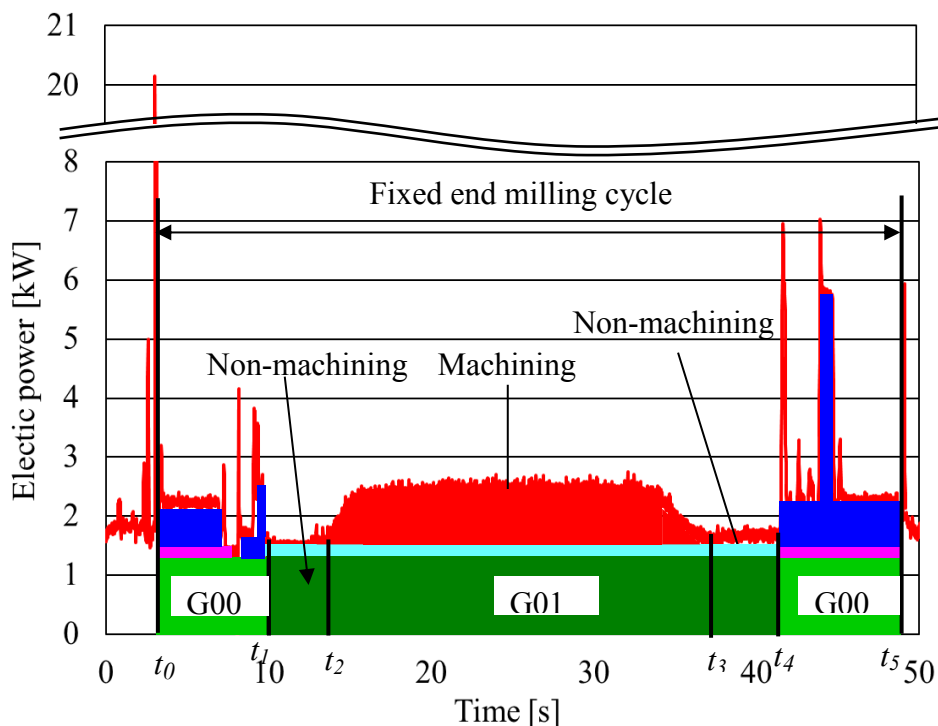


Fig.5.53 Electric power as function of time during a fixed end milling cycle
Cutting condition; $V=120$ $f=0.2$ $a_p=2.0$ $a_e=31$

5.5.4 ドリル加工における消費電力量

表4.25に示した切削速度 $V=65$ m/min, 送り速度 $f=0.30$ mm/rev., 加工穴深さ $a_p=30$ mmの条件にて, 固定サイクルを用いて被削材上面を10 ml分ドリル加工したときの, 1サイクルの電力消費の時間的変化を図5.54に示す. また, この測定値を時間的に積算して求めた消費電力量を図5.51に示す. G01のプロセスでの主軸モータの消費電力量は3.3 Wh, 送りモータの消費電力量は0.4 Wh, 周辺機器その他の消費電力量は3.4 Whとなり, 合計7.1 Whの電力量を消費していることがわかった. また早送りG00のプロセスでは, 主軸モータの消費電力量は1.3 Wh, 送り軸モータの消費電力量は3.7 Wh, 周辺機器その他の消費電力量は7.2 Whとなり, 合計12.2 Whの電力量を消費しており, 総計19.3 Whの電力量を消費している.

これは, ドリル加工は工具全体が常に加工に関与し, 切りくずを除去しているためと考えられる. また, アプローチ, エスケープ時間も非常に短く, 他の固定サイクルとなり, G01でのエスケープも無いため, 周辺機器その他で消費される電力量も小さいためである.

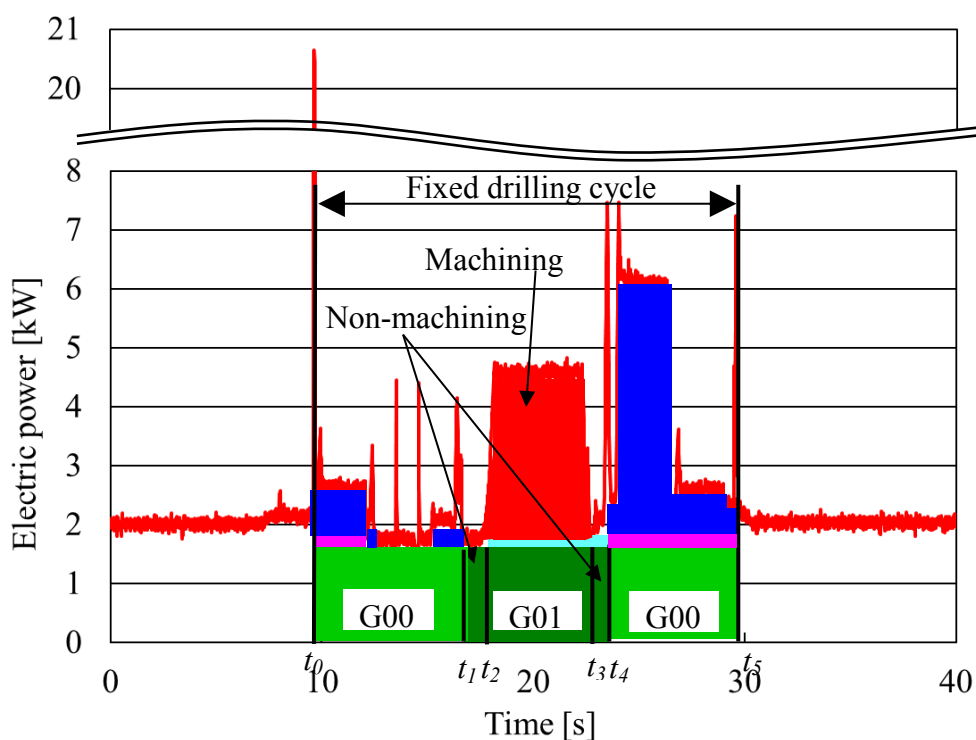


Fig.5.54 Electric power as function of time during a fixed drilling cycle
Cutting condition; $V=65$ $f=0.3$ $a_p=30$

以上4つの加工をまとめた図5.51の結果より、 $\Phi 16$ mmのドリル加工は消費電力量が最も少なく、極めて省エネルギーな加工法であることがわかる。それに対し、エンドミル加工はこれらの4つの加工法の中では最も消費電力量が多い加工法であることがわかった。一方、複合工作機械においては必要とされる種々の機能を満たすために多数のモータが設置されているため、図5.51中に緑色で示されている、また式(4.2)、(4.3)の第1項の周辺機器その他の消費電力量が非常に多いことがわかる。これらはいずれの固定サイクルにおいても、消費電力量の約半分がこれで占められている。

また、旋削加工はフェイスミル加工に比べて、全体としての消費電力量は少ないが、主軸モータの消費電力量（G01中のオレンジ色の部分とG00中のピンク色の部分）は4つの固定サイクル中で最も大きい。これは旋削主軸が大径であるとともに、大きな与圧がかけられており、無負荷回転時の消費電力量が旋削主軸では1.3 Wh、ミリング主軸では0.8 Wh大きいこと、イナーシャが大きいため加減速による消費電力量が旋削主軸では2.6 Wh、ミリング主軸では0.4 Whと大きいためと考えられる。

5.5.5 旋削加工とフェイスミル加工の加工消費電力量の比較

第5.2, 5.3, 5.4節でも述べたように, 切削抵抗により発生する消費電力量の比較を行った. 切りくずを多く排出する旋削加工とフェイスミル加工における比較を行った.

表4.19に示した切削条件のように, 工具メーカー推奨条件範囲内にて種々変化させて, 固定サイクルを用いて被削材の外周を10 ml分直線旋削加工したときの, 消費電力量と加工能率の関係を図5.55に示す. ここでは加工能率は切りくず除去量を実加工時間で除した値で表している. 図5.55より最小の推奨切削条件を用いた場合には55.8 Whとなり, 中央の条件を用いた場合には26.5 Whとなり, 最大の条件を用いた場合には20.9 Whとなった. また, 切りくず除去率が72 ml/minであるときのそれは23.8 Whとなった.

同様に, フェイスミル加工したときの消費電力量と切りくず除去率の関係も図5.55中に示す. 最小の推奨切削条件を用いた場合には71.1 Whとなり, 中央の条件を用いた場合には35.8 Whとなり, 最大の条件を用いた場合には28.0 Whとなった. 切りくず除去率が72 ml/minである時のそれは28.0 Whとなった.

切りくず除去率が同じ場合について, フェイスミル加工の方が旋削加工よりも30%程度消費電力量が多いことがあきらかになった.

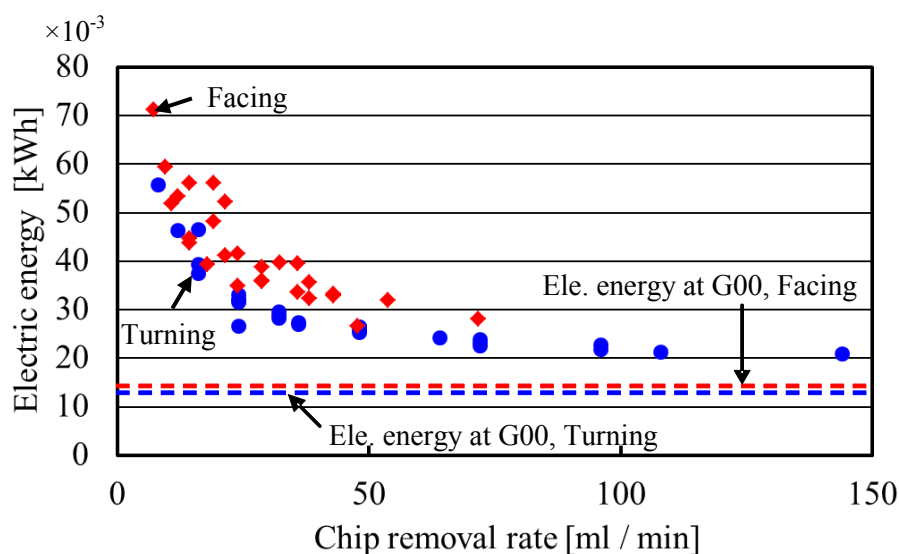
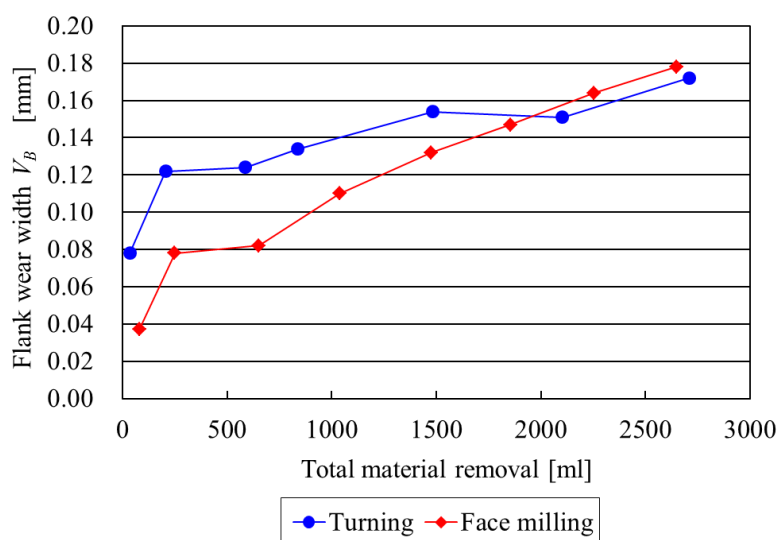


Fig.5.55 Electric energy during a fixed cycle for various cutting conditions

5.5.6 寿命試験結果

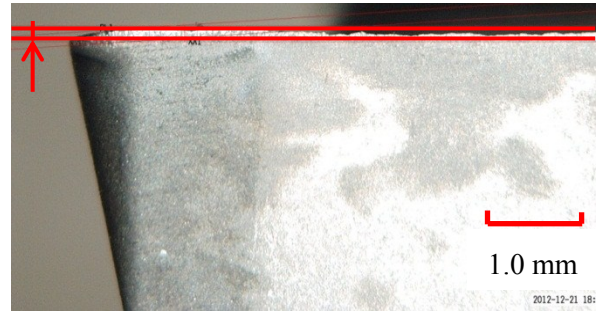
推奨切削条件の中央値を用いて，旋削加工，フェイスミル加工において工具寿命試験を行った．その結果を併せて図5.56に示す．また，工具寿命試験流量後の旋削加工のインサートの工具観察結果を図5.57，フェイスミルのインサートの観察結果を図5.58に示す．いずれの場合も工具逃げ面摩耗 V_B が0.2 mmに達するまでに切りくず除去量も切削送り距離も実用上問題ない程度の量が得られており，図5.55の消費電力量と加工能率の関係は工具寿命の観点からも，実用範囲内にあると言える．



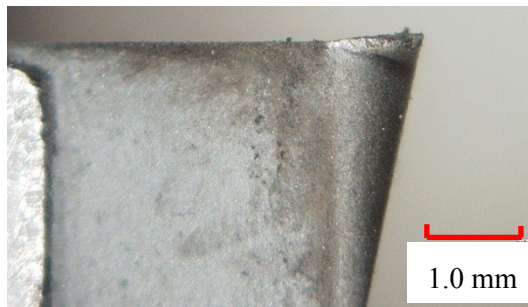
**Fig.5.56 Change of flank wear width during turning and facing
(In case of 5 teeth cutter used for facing)**



(a) Rake face



(b) Front flank face

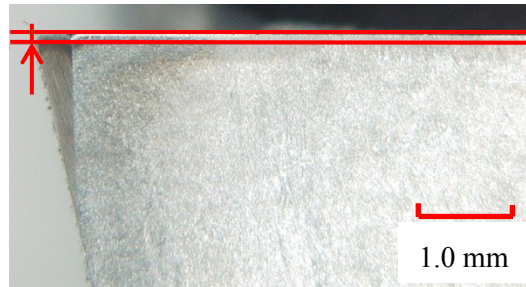


(c) Rear flank face

Fig.5.57 Pictures of turning insert (2711 ml)



(a) Rake face



(b) Front flank face



(c) Rear flank face

Fig.5.58 Pictures of face milling insert (2649 ml)

5.6 まとめ

本章では、第3章で述べた工作機械の状態分類のうち、加工状態時に発生した消費電力量を検証した結果を述べた。旋削、ミリング、傾斜ミリング加工における消費電力量を測定し、省エネルギーとなる切削条件を検証した。また、複合工作機械においては各加工を行い、最も省エネルギーとなる加工形態について検証した。本章の研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) CNC旋盤による旋削加工は、主軸回転数が消費電力量に大きく影響を及ぼすことをあきらかにした。外径旋削加工においては、基底回転数領域で主軸が回転するように切削速度を選定することで、33%の消費電力量削減が可能となった。また、端面加工においては最大主軸回転数を工具寿命に影響を及ぼさない領域で低く設定することで、30%の消費電力量削減が可能となった。
- (2) 3軸制御立形マシニングセンタによるミリング加工においては、実用的な範囲、つまり工具寿命に悪影響を及ぼさない範囲内で切削条件を高く設定することで消費電力量が削減できることをあきらかにした。例えば、フライス加工では高切削速度、高送り速度、中切込み深さ、高切込み幅に設定することで45%、エンドミル加工では高切削速度、高送り速度、高切込み深さ、中切込み幅に設定することで65%、ドリル加工では中切削速度、高送り速度に設定することで5%の消費電力量削減が可能となった。
- (3) 深穴加工時においては適応ペッキングサイクルにより19%、主軸加速・送り軸位置決め時においては加減速調整により10%の消費電力量削減が可能となった。
- (4) 5軸制御立形マシニングセンタによる傾斜ミリング加工においては、傾斜角度を15度に設定することで、工具寿命、仕上げ面粗さを保ちながら、50%の消費電力量削減が可能となった。
- (5) 複合工作機械における旋削、フェイスミル、エンドミル、ドリル加工においては、ドリル加工が最も省エネルギーな加工法であり、ついで旋削、フェイスミルとなり、エンドミル加工は最も消費電力量が多い加工法であることをあきらかにした。

参考文献

- 5.1) Y. Guoa, J. Loendersb, J. Dufloua and B. Lauwers, Optimization of energy consumption and surface quality in finish turning, Proceedings of 5th CIRP International conference on High Performance Cutting, (2012) 551.
- 5.2) 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) 150.
- 5.3) 下河部学, 原雄太, 田中智久, 斉藤義夫, 工作機械の消費電力に関する測定と評価, 2004年精密工学会秋季大会学術講演論文集, (2004) 107.
- 5.4) 原雄太, 田中智久, 斉藤義夫, 工作機械の消費電力評価方法の構築, 2005年精密工学会春季大会学術講演論文集, (2005) 743.
- 5.5) Y. Oda, M. Mori, M. Fujishima and Y. Takeuchi, Reduction of Power Consumption in Rough Turning, Proceedings of JSPE 15th International Conference on Performance Engineering ICPE2014, (2014) 473.
- 5.6) M. Mori, M. Fujishima, Y. Inamasu and Y. Oda, A Study on energy efficiency improvement for machine tools, CIRP Annals, **60**, 1 (2011) 145.
- 5.7) Y. Oda, M. Mori, K. Ogawa, S. Nishida, M. Fujishima and Y. Kawamura, Study of optimal cutting condition for energy efficiency improvement in ball end milling with tool-workpiece inclination, CIRP Annals, **61**,1 (2012) 119.
- 5.8) M. Fujishima, M. Mori, Y. Oda, Energy-efficient manufacturing on machine tools by machining process improvement, Production Engineering, **8**, 1-2 (2014) 217.
- 5.9) Y. Oda, M. Fujishima and Y. Takeuchi, Energy saving machining of multi-functional machine tools, International Journal of Automation Technology, **9**, 2 (2015) 135.
- 5.10) Y. Inamasu, M. Fujishima and M. Hideta, The Effects of Cutting Condition on Power Consumption of Machine Tools. Proceedings of 4th CIRP International conference on High Performance Cutting, 1 (2010) 267.
- 5.11) DMG森精機株式会社, マシニングセンタプログラミングマニュアル(2009) 187.
- 5.12) 例えば, 自動車部品切削で切りくず分断と高送りを実現する新切削技術 : ULTRA HIGH PRESSURE COOLANT UNIT 超高压クーラント「U-HIPRECO-SERIES」, 機械技術, **60**, 1 (2012) 64.
- 5.13) M. Fujishima, Y. Kakino, Y. Yamaoka, S. Fukui, High Productive and Safety Drilling of Hard-to-cut Materials by Intelligent Machine Tools, Progress of Machining Technology, (2002) 456.
- 5.14) Y. Oda, M. Fujishima, Y. Kawamura and M. Hideta, Energy Reduction of Machine Tools, Proceedings of JSPE 14th International Conference on Performance Engineering ICPE2012, (2012) 985.

- 5.15) 垣野義昭, 大塚裕俊, 中川平三郎, 廣垣俊樹, 佐々木将志, 焼入鋼のエンドミル加工に関する研究(第1報)-切削抵抗の簡易式とそれを用いた切削抵抗の一定化制御-, 精密工学会誌, **66**, 5 (2000) 730.

第 6 章 待機電力量の測定

6.1 はじめに

本章では、第3章で述べた工作機械の状態分類のうち、待機電力量を検証した結果を述べる。この待機電力量は各周辺機器の消費電力および準備、加工時間の影響を受ける。つまりこの消費電力量削減の手法として、各周辺機器の消費電力削減および準備状態、加工時間短縮があげられる。前章にて加工消費電力量を検証したことから、本章では前者の各周辺機器の消費電力量削減を対象とした。これらの研究として、桜井らは油圧ユニットにおける油温度変化が消費電力に及ぼす影響^{6.1)}、杉村らはアキュムレータを搭載した油圧ユニットを開発している^{6.2)}。しかし、これらの研究は周辺機器単体の省エネルギーに関する研究であり、これらが加工に及ぼす影響、さらには工作機械全体の消費電力量を考慮していない。

そこで、本研究ではあくまでも加工自体に悪影響を及ぼさない範囲における、周辺機器の消費電力量削減を目的とした。まず、多くの電力量が消費される大量生産ラインに着目をし、これにおいて消費されている待機電力量の各周辺機器の割合を分析した。その結果を基に、クーラントポンプの集約、運動周波数および吐出圧、周辺機器の最適化、工程集約による省エネルギー化を図った^{6.3)}。さらに、複合材料を対象とした切りくず吸引システムを開発し、切りくず吸引によるドライ加工が消費電力量に及ぼす影響を検証した^{6.4)}。

本章では第6.2節では大量生産ラインにおける周辺機器の省エネルギー化、第6.3節では工程集約による省エネルギー化、第6.4節では切りくず吸引システムによる省エネルギー化、第6.5節では以上をまとめた第6章の結論について述べる。

6.2 大量生産ラインにおける周辺機器最適化による省エネルギー化

本節では工作機械の周辺機器の省エネルギー化について述べる。第2章でも述べたように、工作機械には多くの周辺機器が備えられており、その目的は多岐にわたり必要不可欠なものである。これら周辺機器の省エネルギー化を図ることで、工作機械全体の省エネルギー化に大きく寄与すると考えられる。一方、製造現場、特に自動車部品などの複数の機械から構成される大量生産ラインの多くは24時間稼働であり、多くの電力量を消費していると推測される。したがって、これらの生産ラインの電力量を削減することは、省エネルギー化にとって非常に有効であると考えられる。しかし、生産ラインは加工時間短縮、稼働率確保などに重点が置かれ、近年、消費電力量に着目され始めたのが現状である^{6.5)6.6)}。そこで本研究では、大量生産ラインの省エネルギー化を目的とし、DMG森精機社内で行っている複数台の工作機械で構成される大量生産ラインを対象とした。まず、周辺機器の消費電力量の割合を分析

した。さらに、その結果を基に各周辺機器の最適化による省エネルギーとなる方策を検証した。

6.2.1 対象生産ライン

DMG森精機社内で行っている大量生産ラインを対象とした。ライン構成は小型の横形マシニングセンタNXH3000DCGを8台、中型の横形マシニングセンタNH4000DCGを1台、計9台を連結させたものである。第1工程を小型マシニングセンタ、第2工程を中型マシニングセンタで加工している。また、機械間のワーク搬送にはロボットを5台使用している。表6.1は小型横形マシニングセンタNXH3000DCG^{6,7)}、表6.2は中型横形マシニングセンタNH4000DCGの仕様を示す^{6,8)}。また、図6.1は生産ライン、図6.2はNXH3000DCG、図6.3はNH4000DCGの概観を示す。また、図6.4は対象ワークである自動車用ABSブロックの簡易図を示す。図6.4に示すように、黄色で示す基準面以外の5面の加工を第1工程としてNXH3000DCGで加工している。ついで、水色で示す基準穴の仕上げ加工を第2工程としてNH4000DCGで加工している。

消費電力量は機械主電源の2次側および測定対象機器にクランプ式のワットメータCW240 (横河メータ&インスツルメンツ(株)製)を接続し、加工ワークを1つ加工する際の消費電力量を測定した。表6.3は現行ラインでの消費電力量測定結果およびサイクルタイムを示す。表6.3に示すように、消費電力量は第1工程で2588 Wh、第2工程で271 Whとなった。また、サイクルタイムは第1工程で22分39秒、第2工程で2分28秒となった。第1工程のほうが消費電力量が大きいことから、まず第1工程において使用されている周辺機器の消費電力量を測定し、消費割合を検証した。さらにこれらの結果を踏まえて、省エネルギー化の方策を述べる。

Table 6.1 The specification of small horizontal machining center HXH3000DCG

Spindle power [kW]	3.7
Spindle speed [min^{-1}]	12000
Spindle bearing inner diameter [mm]	60
Type of spindle taper	HSK-A50
Max. feed rate X/Y/Z [m/min]	50
Feed acceleration X/Y/Z [G]	1.8/1.5/2.0
Stroke X/Y/Z [mm]	300/350/350
Guide way	Liner guide way

Table 6.2 The specification of medium horizontal machining center NH4000DCG

Spindle power [kW]	18.5
Spindle speed [min^{-1}]	14000
Spindle bearing inner diameter [mm]	70
Type of spindle taper	7/24 Taper No.40
Max. feed rate X/Y/Z [m/min]	50
Feed acceleration X/Y/Z [G]	0.6/0.9/0.6
Stroke X/Y/Z [mm]	560/560/630
Servo motor output X/Y/Z [kW]	1.6/4.0/4.0
Guide way	Liner guide way

Table 6.3 Results of electric energy on current production line

Process	Electric energy	Cycle time
OP1	2588 Wh	22 min 39 sec.
OP2	271 Wh	2 min 28 sec.
Total	2859 Wh	25 min 7sec.



Fig.6.1 The overview of mass production line



Fig.6.2 The overview of small horizontal machining center NXH3000DCG



Fig.6.3 The overview of medium horizontal machining center NH4000DCG

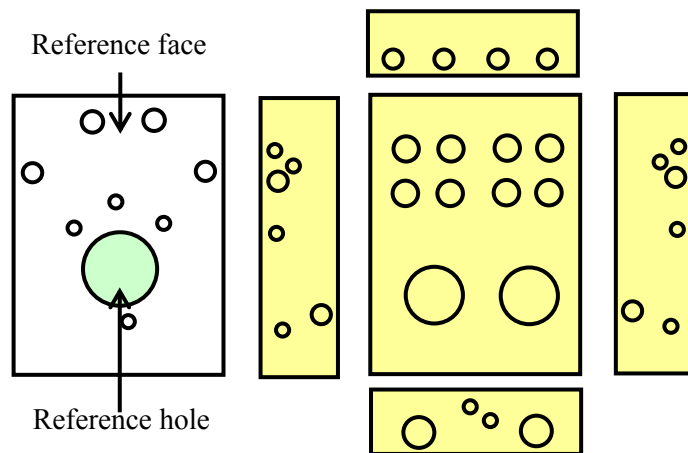


Fig.6.4 The simplified diagram of ABS block

6.2.2 周辺機器による消費電力量割合

図6.5は第1工程におけるNXH3000DCGでのワーク1個あたりに周辺機器で消費されている電力量割合を示す。合計消費電力量は308.8Whである。図6.5に示すうち、赤文字で示している周辺機器がクーラント関連の消費電力量である。図6.5より、全体の約54 %をクーラント関連の周辺機器の消費電力量が占めており、非常に大きいことがわかる。各周辺機器では、最も大きく電力量を消費しているのは油圧機器、ついでクーラントクーラー、さらに主軸、サーボ軸の順となった。

ここで、クーラントの主な用途は工具の冷却、潤滑であるが^{6.9)}、その他機内に堆積した切りくずを流すなど、量産加工においては必須となる。また、生産性の安定化を図るためにクーラントの温度を一定に保つクーラントクーラーも必須となっている^{6.10)}。

この結果より、まず最も消費電力量が多いクーラントポンプの集約を図った。つづいて、単体で消費電力量が最も多い油圧機器の最適化を図った。第1工程でこれらを実施し、効果が得られた方策を第2工程にも適用することとした。

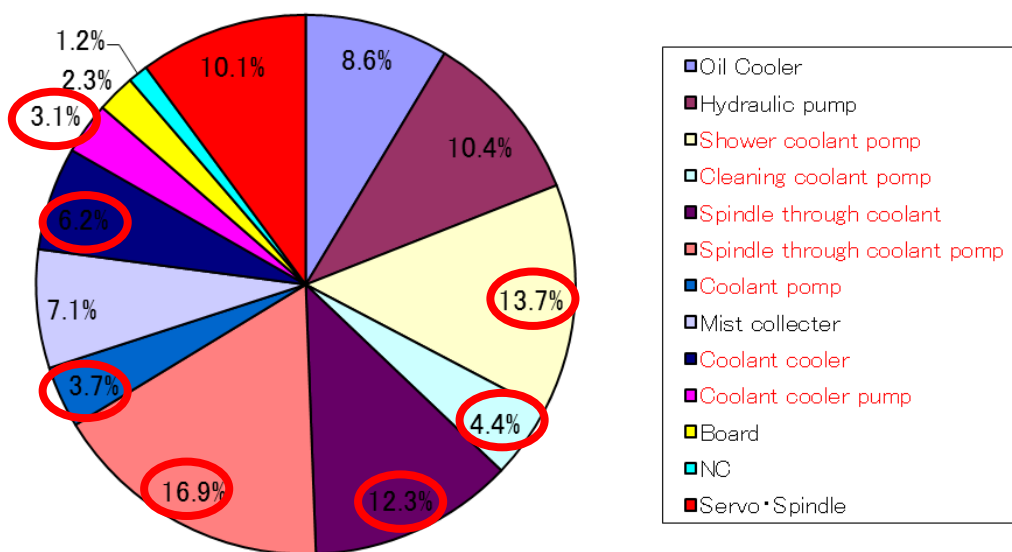


Fig.6.5 Details of electric energy on OP1 with NXH3000DCG

6.2.3 クーラントポンプの集約および最適化

表6.4は現行ラインにて使用されているクーラントポンプの詳細を示す。表4.6より計6つのクーラントポンプが使用されている。これらのクーラントポンプの集約により、消費電力

量の削減を図った。現行ラインでの流量420 l/minを保ちながら、クーラントポンプの集約を行った。

表6.5は集約結果を示す。表に示すように、クーラントポンプを6つから2つに集約することが可能であった。1つのスルースピンドルクーラントと切りくず流しを兼ねたポンプ、その他のクーラントポンプである。さらに、図6.5よりクーラントポンプのうち、スピンドルスルークーラントポンプが最も消費電力量が多いことがわかる。したがって、スピンドルスルークーラントポンプの消費電力量の削減を行うこととした。

まず、吐出圧を7.0 MPaから2.0 MPaに変更した。これは、7.0 MPaがスピンドルスルークーラント装置の最大吐出圧であるためにこの条件としていたが、2.0 MPaに変更しても加工に問題がないことを確認した。さらに、スピンドルスルークーラント装置の最適化として、スピンドルスルークーラントポンプの運転周波数に着目した。現行ラインではインバータにて運動周波数を60 Hzとして制御を行っていた。この周波数を50 Hzに変更することで消費電力量削減を行った。

以上の方法を組み合わせて、第1工程における消費電力量を測定した。表6.6に測定結果を示す。その結果、消費電力量は1917 Whとなり、現行ラインより約26%の消費電力量削減が達成できた。

Table 6.4 Details of coolant pump on OP1

Application	Flow rate [l/min]	Power [kW]
Cyclone supply	105	1.21
Spindle	50	0.52
Shower coolant	130	0.89
Net cleaning		
Cooler supply	30	0.19
Spindle nose	120	0.89
Cleaning container		
Jig cleaning		
Through-spindle coolant	20	3.7
Total	420	7.4

Table 6.5 Details of coolant pump on OP1 after consolidation

Application	Flow rate [l/min]	Power [kW]
Cyclone supply	300	1.5
Spindle		
Shower coolant		
Net cleaning		
Cooler supply		
Spindle nose		
Cleaning container		
Jig cleaning		
Through-spindle coolant	34	2.2
Total	334	3.7

Table 6.6 The result of electric energy after coolant pump consolidation

Process	Current line	After consolidation
OP1	2588 Wh	1917 Wh

6.2.4 油圧機器の最適化

さらに，クーラント関連について消費電力量の多い，油圧機器の最適化を行った．現行ラインでは油圧機器は油圧保持時あってもモータ回転数は一定であった．この制御方法を変更し，圧力制御をインバータで行い保圧時にはモータの回転数を下げた．図6.6に現行ラインの小型の横形マシニングセンタにおいてこの制御方法を適用したときの油圧機器の消費電力測定結果を示す．図6.6に示すように，現行ラインの制御方法では定常状態の電力が0.5 kWであるのに，変更後は0.05 kWと約90 %削減することができた．これを1日あたりに換算すると，1台で約11 kWhの消費電力量削減が可能であった．

これらの改善を実施し，第1工程の消費電力量を測定した．表6.7に示すように，消費電力量は1696 Whとなり，現行ラインより約34 %の電力量削減が可能となった．このモータのインバータ制御は主軸冷却ポンプ，ATCモータにも適用できると考えられる．これは，第7章で述べることにする．

Fig.6.6 The optimization of hydraulic unit

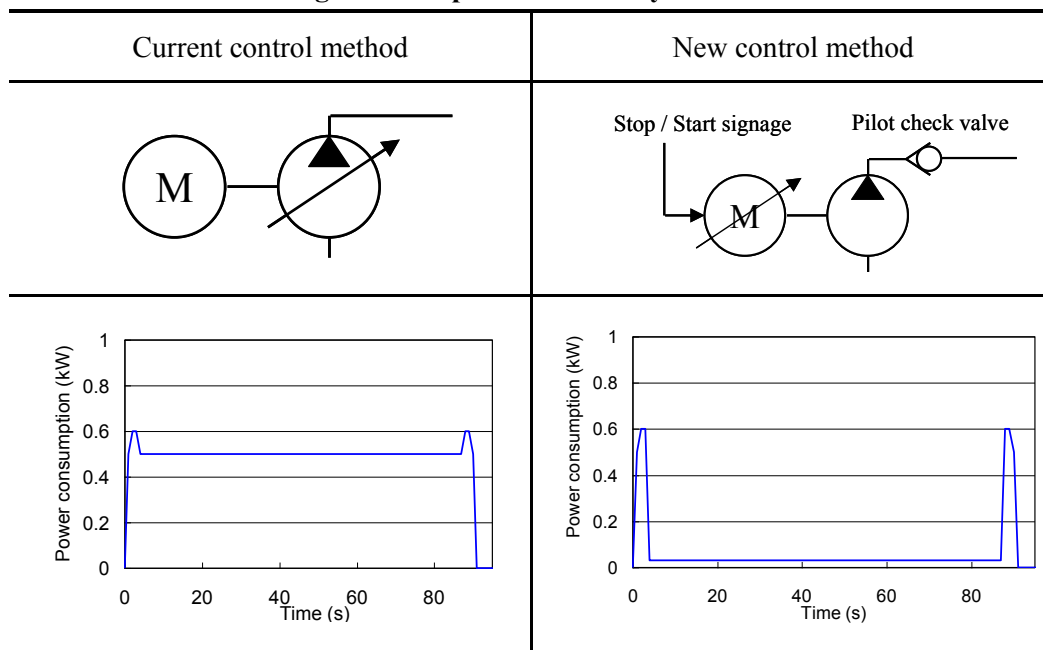


Table 6.7 The result of electric energy after optimized hydraulic unit

Process	Current line	After consolidation
OP1	2588 Wh	1696 Wh

6.2.5 更なる改善および第2工程への適用

更なる消費電力量削減のために、スピンドルスルークーラントポンプの運動周波数を40 Hzに変更した。なお、40 Hzに変更しても加工に問題がないことは確認済みである。第1工程での消費電力量は1507 Whとなり、現行ラインの約42 %の省エネルギー化が達成できた。以上の改善を第2工程にも適応した。その結果、152 Whとなり、現行ラインに対して約44 %の削減が可能となった。

以上より、第1, 第2工程の改善結果を表6.8に示す。最終的にクーラントポンプ、油圧装置の最適化により本研究の対象とした量産ラインでは、約41 %の消費電力量削減が可能となった。

Table 6.8 Results of reduction on electric energy

Process	Current line [Wh]	After improvement [Wh]
OP1	2588	1507
OP2	271	170
Total	2859	1677

6.3 工程集約おける省エネルギー化

本節では、現行ラインの工程集約により省エネルギー化を図る。現行ライン構成はOP1を小型の横形マシニングセンタを8台、OP2を中型の横形マシニングセンタを1台、計9台を連結して加工し、ワーク搬送に計5台のロボットを使用している。このラインを5軸制御マシニングセンタ1台に工程集約を行ない、周辺機器の削減、サイクルタイム短縮による省エネルギー化を図った。

6.3.1 使用工作機械

使用した5軸制御立形マシニングセンタNMV3000DCGの概観を図6.7、機械仕様を表6.9に示す^{6.11)}。これは、第4章に記載した機械と同じものである。



Fig.6.7 The overview of 5axis vertical machining center NMV3000 DCG

Table 6.9 The specification of 5axis vertical machining center

Spindle power [kW]	18.5
Spindle speed [min^{-1}]	12000
Spindle bearing inner diameter [mm]	70
Type of spindle taper	7/24 taper , No.40
Maximum feed rate [m/min]	50
Feed acceleration [G]	1
Stroke X/Y/Z [mm]	500×350×510
Servo motor output X/Y/Z [kW]	4/3/3
Guide way	Linear roller guide

6.3.2 工程集約後の消費電力量

工程集約後の第1工程，第2工程加工時の消費電力量，サイクルタイム測定結果を表6.10に示す．表6.10に示すように，5軸制御マシニングセンタ導入により第1工程で約19%，第2工程で約23%，合計約20%のサイクルタイム短縮が可能となった．さらに，サイクルタイム短縮により第1工程で8%，第2工程で9%，合計約8%の消費電力量削減が可能となった．これより，工程集約により加工中の消費電力量削減が可能であることがあきらかになった．また，サイクルタイムより生産量は従来の生産ラインと比較しても十分に保証できる．さらに，5軸制御マシニングセンタを導入することにより，必要なマシニングセンタは1台となるために搬送装置が不要となる．よって，搬送装置の消費電力量削減が期待できる．なお，サイクルタイムの短縮割合に対して，消費電力量の削減割合が小さくなる理由としては，5軸制御マシニングセンタは駆動軸が多く，また周辺機器も多いために加工以外の消費電力量が多いためと考えられる．第6.2節で述べた周辺機器の最適化を行うことで，更なる消費電力量の削減が期待できる．

Table 6.10 Results of electric energy after process consolidation

Process	Current line		After process consolidation	
	Electric energy	Cycle time	Electric energy	Cycle time
OP1	2588 Wh	22 min 39 sec.	2375 Wh	18 min16 sec.
OP2	271 Wh	2 min 28 sec.	246 Wh	1 min 54sec.
Total	2859 Wh	25 min 7sec.	2621 Wh	20 min 10 sec.

6.4 切りくず吸引システムによる省エネルギー化

近年、CFRPを始めとする複合材料が注目されている。複合材料は高強度、高弾性率、低比重などの特徴により航空機、自動車産業からスポーツ用品まで多くの分野で利用されている。とりわけ、航空機においては多くの部品で採用が拡大している。ボーイング社の最新旅客機「B787」は構造材の約半分が複合材料で占められている^{6.12)}。

一方、複合材料は先に述べた高強度、高弾性率等の特徴をもつため、機械加工が非常に困難である。バリ、デラミネーション等による加工面品位の低下が問題となり、これらを解決すべく多くの研究、製品開発が行われている^{6.13)}。また、高切削温度による工具寿命低下を抑制するため、切削油を用いた加工が行われる。しかし、切削粉と切削油の分別、廃棄が課題となり、環境に悪影響を及ぼす。一方、ドライ加工では発生する切りくずが機械および人体に悪影響を及ぼすことが大きな問題となる。

そこで、本研究では複合材加工中の切りくずを吸引する、切りくず吸引システムZEROCHIP[®]を開発した^{6.14)}。このシステムにより、従来行っていたウェット加工からドライ加工への適用が期待できる。第6.2節でも述べたように、クーラント関連装置は非常に多くの電力量を消費する。そこで、本節では切りくず吸引システムによる消費電力量削減、さらに工具冷却効果について検討した。まず、このシステムにおける切りくずの吸引を加工状態から定性的に評価した。さらに、吸引の冷却効果も期待できるため、工具温度を定量的に評価した。最後に、このシステムの導入による消費電力量削減効果を検証した。

6.4.1 使用工作機械

図6.8に使用した切りくず吸引システム搭載3軸制御立形マシニングセンタNVX5100の外観を示す。また、図6.9に切りくず吸引システムの詳細を示す^{6.14)}。図6.9に示すように、加工中に発生した切りくずをマシニングセンタ主軸内を通して、外部の吸塵装置に取り出すシステムである。表6.11に機械仕様を示す^{6.15)}。



Fig.6.8 The overview of vertical machining center NVX5080 II with chip vacuum system

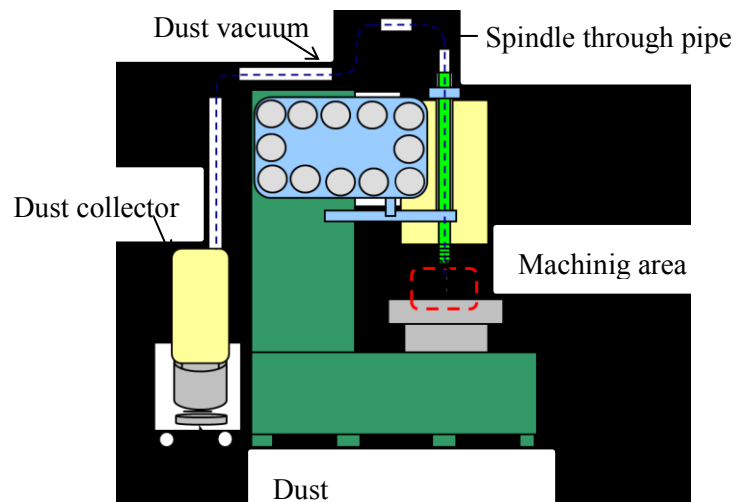


Fig.6.9 The overview of chip vacuum system ZEROCHIP®

Table 6.11 The specification of 3axis vertical machining center NVX5100

Spindle power [kW]	15/11 [10 %ED / const.]
Spindle speed [min^{-1}]	13000
Spindle bearing inner diameter [mm]	80
Type of spindle taper	HSK-A63
Max. feed rate X/Y/Z [m/min]	30
Feed acceleration X/Y/Z [G]	0.51/0.38/0.43
Stroke X/Y/Z [mm]	1030/530/510
Servo motor output X/Y/Z [kW]	3.0/3.0/4.5
Guide way	Box guide way
Vacuum power [kW]	2.0

6.4.2 使用工具および切削条件

本研究では航空機部品加工に着目し、代表的な加工であるCFRPの(1)面加工、(2)穴あけ加工、(3)外径トリム加工を対象とした。それぞれに使用される工具について述べる。各加工の概略図を示す。

(1) 面加工

図6.10は面加工に用いるフェイスマイルの概観、断面図を示す。図6.10に示すように、フェイスマイル中心から切りくずを吸引する内部吸引タイプを採用した。また、切りくず吸引効率と切削熱の放熱効果をも高めるヒートシンクカバーを設置した。表6.12は切削条件を示す。

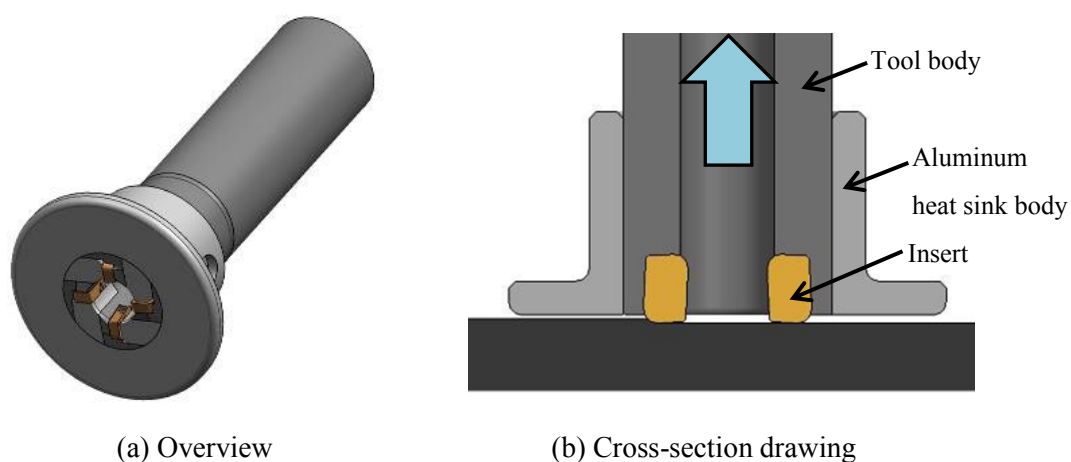


Fig.6.10 The overview and cross-section drawing of face mill

Table 6.12 Cutting condition on face milling

Tool diameter D [mm]	25
The number of teeth	4
Cutting speed V [m/min]	235
Feed rate f [mm/tooth]	0.6
Axial depth of cut a_p [mm]	0.5
Radial depth of cut a_e [mm]	20
Coolant	Dry, Vacuum

(2) 穴あけ加工

図6.11は穴あけ加工に用いるドリルの概観および断面図を示す. 効率的に切りくずを吸引できるようにドリル中心に吸塵孔を設け, 内部吸引タイプを採用した. また, バリ, デラミネーションを抑制するために, 刃先を円にしたものを用いた. 図6.12に示すように, 一般的に用いられるドリルはスラスト方向への切削抵抗が高く, 刃先切れ味も悪い. その結果, 貫通時に繊維を切り取ることができず, バリやデラミネーションを引き起こす. 一方, Rドリルは切削抵抗を工具最大径の位置でスラストから外周方向へ切り替わる形状にすることで, 繊維を剥がす方向への力は加わらず, バリやデラミネーションを抑えることが出来る^{6.16}. そのため, Rドリルを採用した. また, 工具先端より16mmのところのところに吸引孔を設けている. この吸引孔より加工中の切りくずを吸引する内部吸引システムを用いた. 表6.13は切削条件を示す.

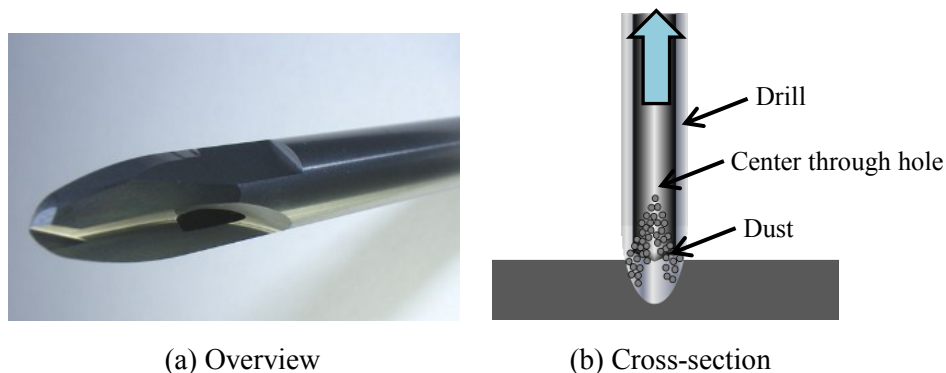


Fig.6.11 The overview and cross-section of drill

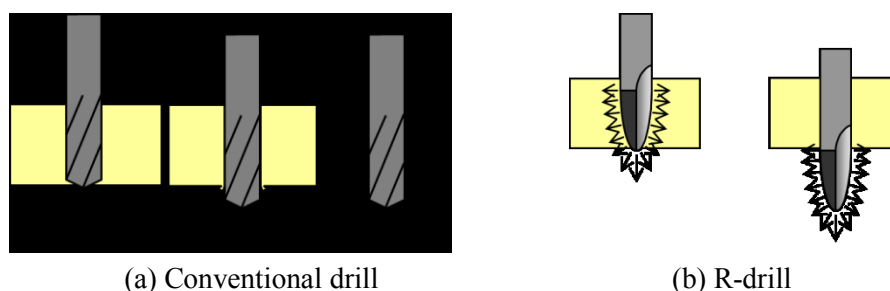


Fig.6.12 The difference of conventional drill and R-drill

Table 6.13 Cutting conditions on drilling

Tool diameter D [mm]	10
Cutting conditions V [m/min]	16, 140
Feed rate f [mm/rev.]	0.2, 0.3
Depth of hole a_p [mm]	44
Coolant	Dry, Vacuum

(3) トリム加工

図6.13は外径トリム用エンドミルとホルダの概略を示す。図6.13に示すように、エンドミルはダイヤコートルータータイプを用いた。この工具は、刃長の中心付近で左ねじれと右ねじれが入れ替わるため、その交差する位置で加工を行うと上下へのバリは発生しない^{6.17)}。また、ホルダは主軸上に吸引ファンを設置し、切りくずを巻き上げる機構にした。また、外部カバーを取り付け、吸塵面積を拡大した外部吸引タイプを採用した。表6.14は切削条件を示す。なお、このホルダは自動交換可能であり、自動化にも適用可能である。

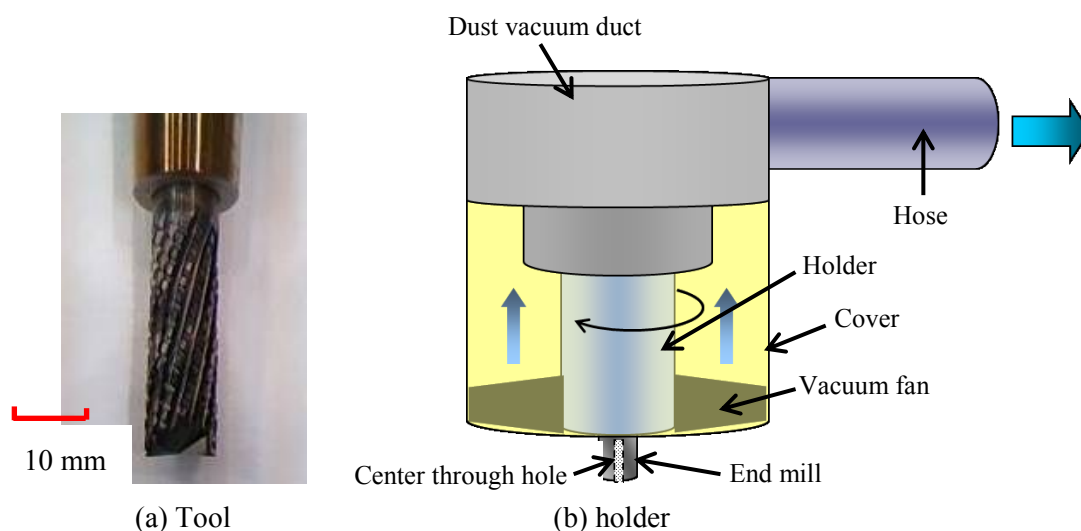


Fig.6.13 Overviews of end mill and holder

Table 6.14 Cutting condition on end milling

Tool diameter D [mm]	10
The number of teeth	-
Cutting speed V [m/min]	160
Feed speed F [mm/tooth]	1000
Axial depth of cut a_p [mm]	44
Radial depth of cut a_e [mm]	2
Coolant	Dry, Vacuum

6.4.3 切りくず吸引状態検証および工具，ワーク温度測定結果

本研究で開発した切りくず吸引システムの吸引効果の確認を，吸引システムOn，Off時の加工中の機内写真により定性的に評価した．また，吸引による工具，被削材冷却効果も期待できるため，温度測定も行った．

図6.14は温度測定に用いたサーモグラフィThermo GEAR G120EX (日本オビニクス(株)製)の概観を示す．表6.15は仕様を示す^{6,18)}．図6.14に示すサーモグラフィを用いて，ドライ加工を行い，吸引システムOn，Off時の各工程の加工状態確認および工具，被削材温度測定を行った．



Fig.6.14 The overview of thermography

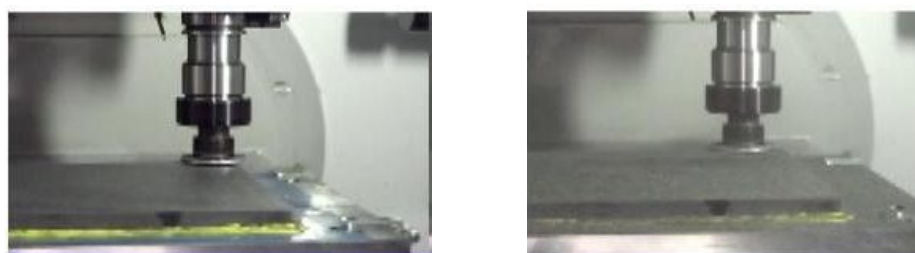
Table 6.15 The specification fo thermography

Infrared camera resolution	80×60
The number of pixel	4800
Thermo resolution [deg.]	0.15
Accuracy [deg.]	±2
Thermo measuring range [deg.]	-20～250
Measure wave length [μ m]	7.5～13

(1) 面加工

図6.15は面加工中における吸引システムOn，Off時の機内写真，図6.16はサーモグラフィによる温度測定結果を示す．図6.15より，吸引システムOnでは加工中に切りくずが浮遊せず，吸引できていることがわかる．吸引率は約90%であった．また，図6.16に示すように，吸引システムOffでは工具および被削材の温度が高くなっている一方で，吸引システムOnでは温度が抑制されていることがわかる．

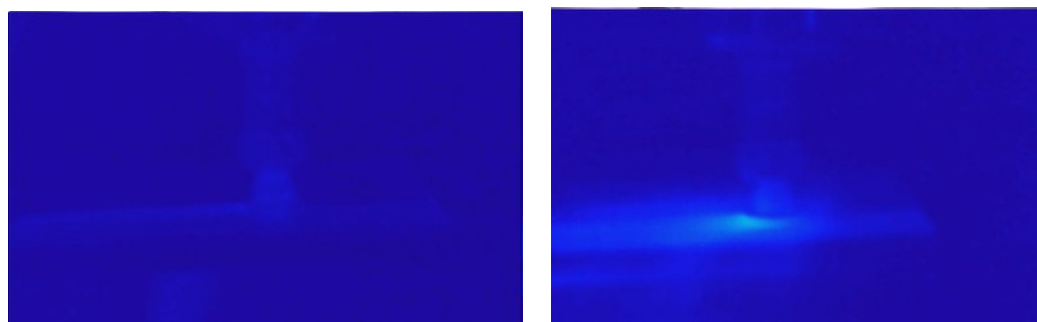
図6.17は1パス加工時の工具および被削材の温度の時間変化を示す。図6.18より吸引システムOffでは加工が進むにつれて工具温度が上昇しているが、吸引システムOnではほとんど温度上昇が見られない。吸引システムOn, Offとでは最大で18度の温度差が生じた。これは、切りくず吸引システムによる冷却効果のためと考えられる。



(a) Vacuum system On

(b) Vacuum system Off

Fig.6.15 Pictures of machine inside on face milling



(a) Vacuum system On

(b) Vacuum system Off

Fig.6.16 Measurement results on face milling using thermograph

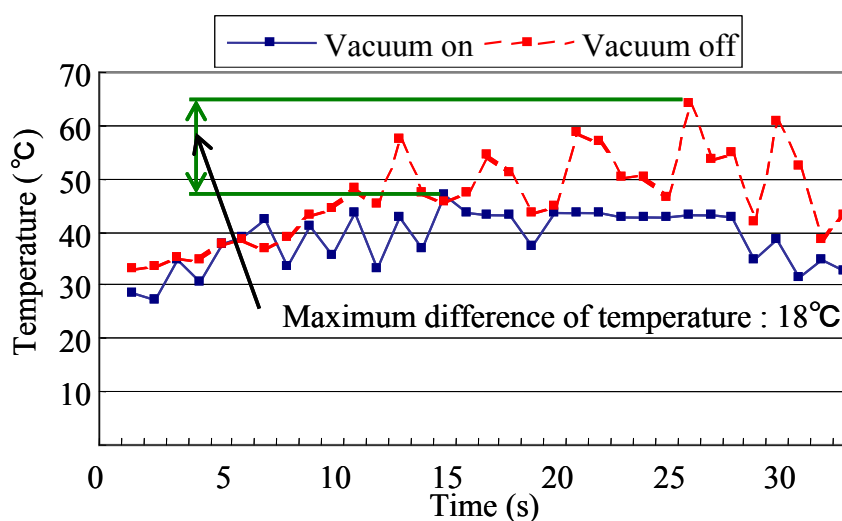


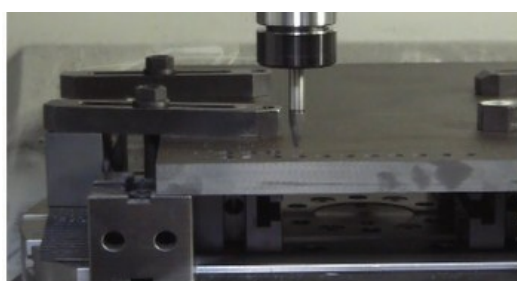
Fig.6.17 Measurement results of face milling on time variation of temperature

(2) 穴あけ加工

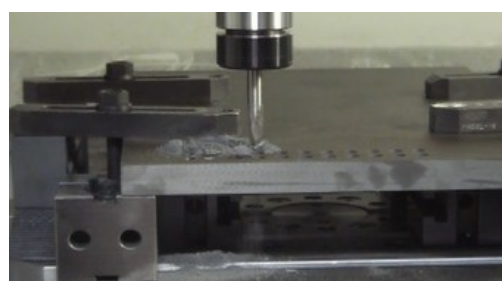
図6.18は吸引システムOn, Off 時における穴あけ加工後の機内写真, 図6.19はドリル加工時におけるサーモグラフィによる温度測定結果を示す. 図6.18より, 吸引システムOff ではワーク上に切削粉が堆積しているのに対し, 吸引On では切りくずが吸引でき, ほとんど堆積していないことがわかる. また, 図6.19に示すように, 吸引システムOffでは工具および堆積している切りくずが赤くなり温度が高くなっている一方で, 吸引システムOnでは工具温度が抑制されていることがわかる.

図6.20は1パス加工時の工具, 被削材温度の時間変化, 図6.21は加工後の工具温度変化を示す. 図6.20より, 吸引システムOff と比較して, 吸引システムOn では最大約80度の温度差が見られた. これは, おもに切りくずの有無による差であると考えられる. また, 図6.21より, 加工後の工具の温度は吸引システムOff と比較して吸引システムOn では最大約80度工具温度が低くなっている. これは, 吸引システムによる冷却効果によるものであると考えられる.

以上より, 吸引システムOffでは, 高温の切りくずが被削材上に堆積し, 被削材に悪影響を及ぼすと考えられる. また, 加工後の工具温度も高くなり, 工具寿命にも悪影響を及ぼすとも考えられる. 一方で, 切りくず吸引システムを採用することにより, 高温の切りくずを吸引することができるため, 被削材および工具の温度上昇を抑制でき, 被削材, 工具への悪影響を低減できると考えられる.

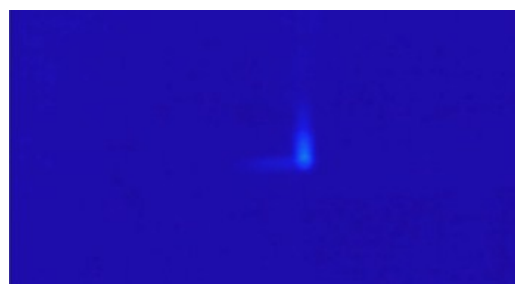


(a) Vacuum system On

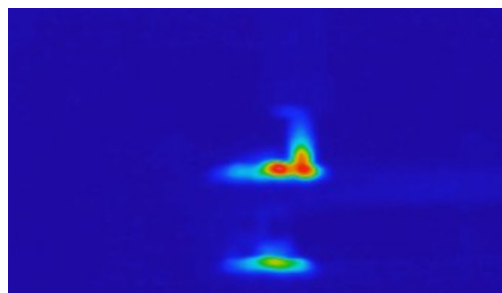


(b) Vacuum system Off

Fig.6.18 Pictures of machine inside on drilling



(a) Vacuum system On



(b) Vacuum system Off

Fig.6.19 Measurement results on drilling using thermograph

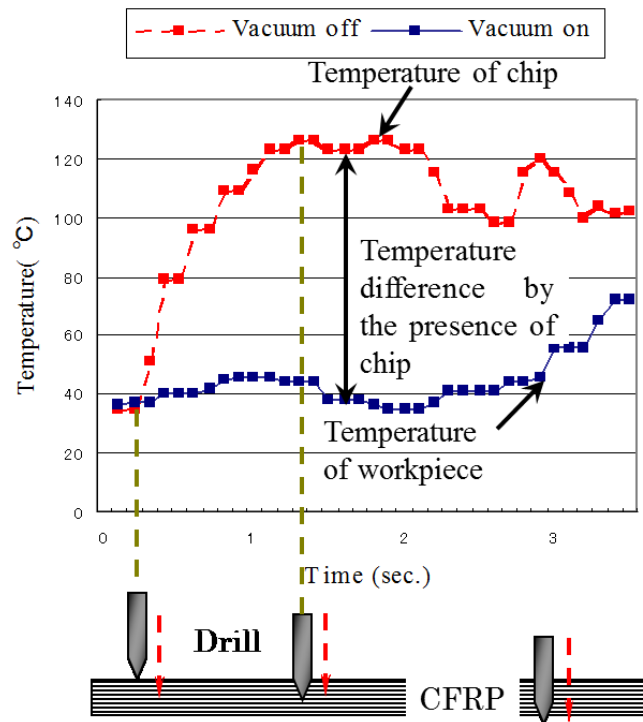


Fig.6.20 Measurement results of drilling on time variation of temperature

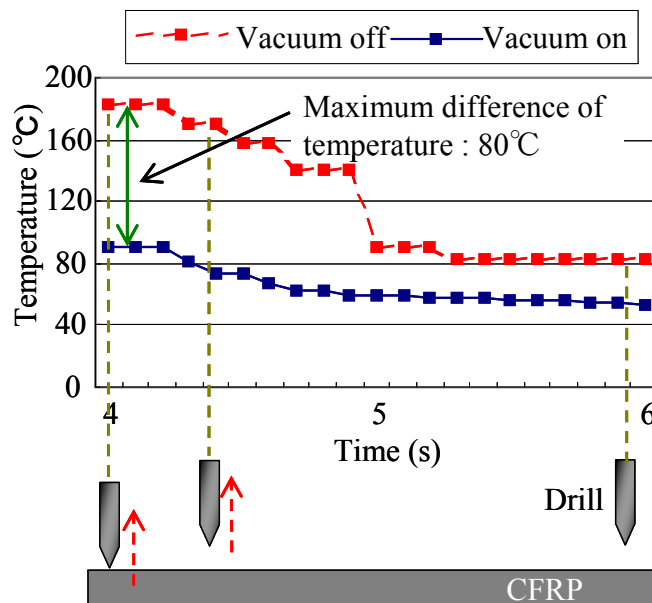
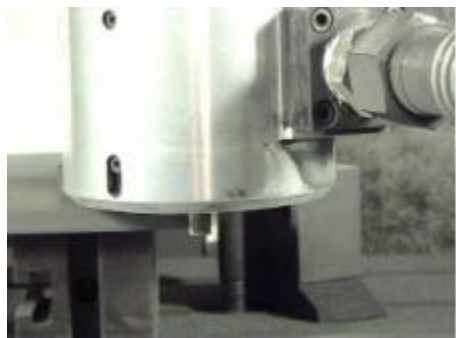


Fig.6.21 Results of drill temperature after machining

(3) トリム加工

図6.22は外径トリム加工中における吸引システムOn, Off の機内写真, 図6.23はトリム加工時におけるサーモグラフィによる温度測定結果を示す. 図6.22に示すように, 吸引システムOnでは加工中に切りくずが浮遊せず, 吸引できていることがわかる. 一方, 図6.23より工具温度の大きな差は見られなかった. これより, 外部吸引システムは切りくず吸引においては効果が得られるが, 冷却効果の改善は今後の課題となる.

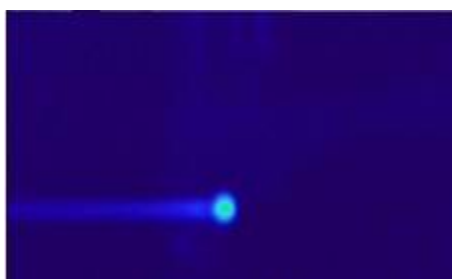


(a) Vacuum system On

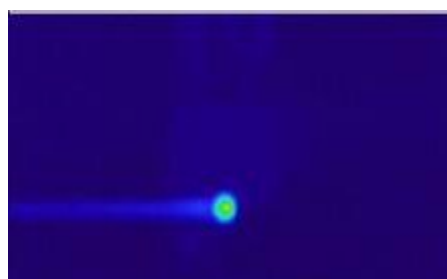


(b) Vacuum system Off

Fig.6.22 Pictures of machine inside on end milling



(a) Vacuum system on



(b) Vacuum system off

Fig.6.23 The measurement results on end milling using thermograph

以上より, 本研究で開発した切りくず吸引システムにより, 面加工, 穴あけ加工, トリム加工において, 切りくずが吸引できることがあきらかになった. また, 面加工, 穴あけ加工においては, 切りくず吸引システムによる冷却効果によって工具および被削材の温度抑制が可能であることがわかった. この結果より, ドライ加工においても工具寿命延長が期待できる.

6.4.5 省エネルギー効果検証結果

切りくず吸引システムの消費電力量削減効果を検証するため、面加工時の従来のウェット加工を行った機械および切りくず吸引システムによるドライ加工を行った機械の総消費電力量を測定した。図6.24はウェット加工時の概観を示す。

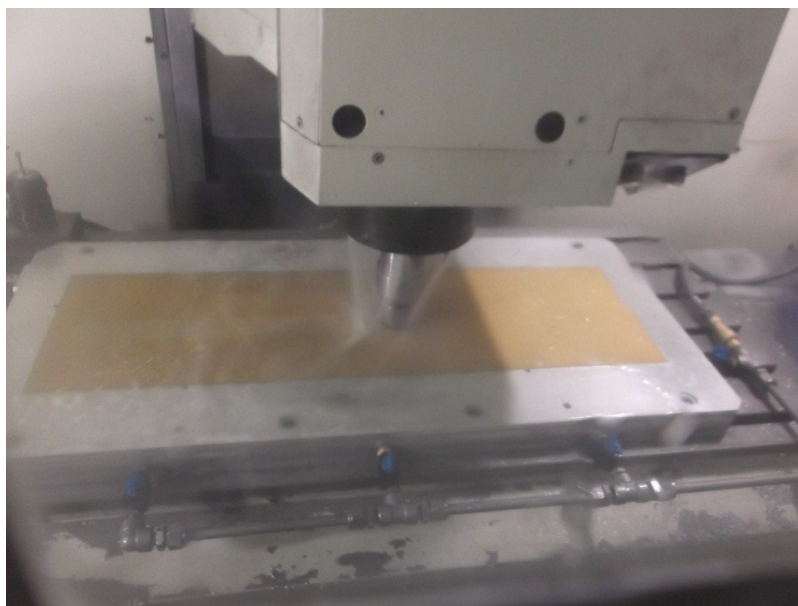


Fig.6.24 The overview of wet machining

表6.16は従来機，吸引システム機の加工，待機電力量測定結果，および1ヶ月稼働時の消費電力量計算結果を示す。ウェット加工を行う際にはクーラントと切りくずを分離するために，スラッジ処理機が必要となる。そのため，スラッジ処理機の消費電力量を含んでいる。なお，スラッジ処理機は加工中のみ稼働させている。また，切りくず吸引システムには集塵機が必要となるため，その消費電力量を含んでいる。

表6.16に示すように，待機電力量は従来機のほうが切りくず吸引システム機より低くなっている。一方，加工中の消費電力量については，クーラントおよびスラッジ処理機を稼働させている従来機のほうが高くなっている。吸引システム機も集塵機を稼働させているが，それ以上にクーラント，スラッジ処理機に電力量消費を要しているためである。これらの結果を用いて，1ヵ月あたりの消費電力量を計算した。なお，稼働時間は実測値である。表6.16より，切りくず吸引システム機は従来機と比較し，1ヵ月で約19%の消費電力量削減が可能となった。さらに，クーラントと切りくずの分別を行う必要も無く，また切りくずがほとんど飛散しないため，環境，人体に悪影響を及ぼさない非常にエコな加工である。

Table 6.16 Results on electric energy of conventional machining and vacuum system

Contents	Conventional machining	Vacuum system
Ready electric power [kW]	0.717	1.366
Sludge disposal system [kW]	1.111	-
Machining electric power [kW]	7.288	6.229
Operating time per day (Measured) [h/day]	100	100
Operating time per month [h/month]	380	380
Operating days [day]	200	200
Total electric energy (not include ready electric energy) [kWh/month]	1263	732
Total electric energy (include ready electric energy) [kWh/month]	1536	1251

6.5 まとめ

本章では、第3章で述べた工作機械の状態分類のうち、準備状態に発生した消費電力量を検証した結果を述べた。準備状態時に消費する電力量において、各周辺機器の割合分析を行ない、周辺機器最適化、工程集約、切りくず吸引システムの採用などの方法で省エネルギー化を図った。本章の研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) DMG森精機の大量生産ラインにおける、小型横形マシニングセンタの消費電力量のうち、約54%がクーラント関連周辺機器によって消費されていることをあきらかにした。
- (2) 大量生産ラインにおいて、クーラントポンプの集約、運動周波数、スピンドルスルークーラント吐出圧などの最適化および油圧機器の最適化により、最大約41%の消費電力量削減が可能となった。
- (3) 大量生産ラインで用いられている9台の横形マシニングセンタを1台の5軸制御マシニングセンタに置き換え、工程集約を図ることで、約8%の消費電力量削減が可能となった。
- (4) 本研究で開発した切りくず吸引システムを採用することで、従来のウェット加工と比較し、約19%の消費電力量削減が可能となった。
- (5) 切りくず吸引システムの冷却効果により、面加工、穴あけ加工においては、工具、被削材の温度抑制が期待できる。
- (6) 切りくず吸引システムは、クーラントと切りくずの分別を行う必要が無く、また切りくずがほとんど飛散しないため、環境、人体に悪影響を及ぼさない非常にエコな加工である。

参考文献

- 6.1) Y. Sakurai, T. Suzuki, K. Aiba, T. Yoshinari, K. Kawashima and K. Kihara, Proposal of a Mechanism to Restrict Pressure Change by Oil Temperature Change, *International Journal of Automation Technology*, **6**, 4 (2012) 502.
- 6.2) K. Sugimura and K. Suzuki, Using Intermittently Operated Oil Hydraulic Pump Unit with Accumulator to Save Energy, *International Journal of Automation Technology*, **6**, 4 (2012) 426.
- 6.3) Y. Oda, Y. Kawamura and M. Fujishima, Energy consumption reduction by machining process improvement, *Proc. of 3rd CIRP Process Machine Interactions* (2012) 119.
- 6.4) 小田陽平, 秀田守弘, 小島裕登, 藤嶋誠, CFRP加工における切りくず吸引システムの吸塵・冷却効果について, 日本機械学会 第9回生産加工・工作機械部門講演会, (2012) 241.
- 6.5) H. Hibino, T. Sakuma and M. Yamaguchi, Evaluation System for Energy Consumption and Productivity in Manufacturing System Simulation. *International Journal of Automation Technology*, **6**, 3 (2012) 279.
- 6.6) 例えば気候変動対策と脱大量生産・省エネ社会 - 原子力委員会.
- 6.7) DMG森精機株式会社, NHX3000DCG カタログ
- 6.8) DMG森精機株式会社, NH4000DCG カタログ(2014) 28.
- 6.9) 例えば奥山繁樹, 宇根篤暢, 由井明紀, 鈴木浩文, 機械加工学の基礎, コロナ社, (2013) 81.
- 6.10) 例えばダイキン工業, オイルコン AKZ9形 カタログ.
- 6.11) DMG森精機株式会社, NMV3000DCGカタログ(2014) 4, 18.
- 6.12) The Boeing Company, JP Morgan Airline, Aerospace and Airfreight Conference, p.30, February 23, 2006, 1, The Boeing Company JP Morgan Airline, Aerospace and Airfreight Conference.
- 6.13) 例えば北森一範: 高品位で長寿命を実現したCFRP用ドリル「クリスタルダイヤコートドリル」, *機械と工具*, **69**, 3 (2012).
- 6.14) DMG森精機株式会社, NVX5000 II シリーズカタログ(2014) 13.
- 6.15) DMG森精機株式会社, NVX5000 II シリーズカタログ(2014) 26.
- 6.16) 斉藤学, CFRP用長寿命ドリルの開発, *日本機械学会誌*, **114**, 1111 (2011) 444.
- 6.17) 例えばオーエスジー株式会社, COMPOSITE SOLUTIONカタログ (2011) 5.
- 6.18) 日本オビニクス株式会社 HP,
<http://www.infrared.avio.co.jp/jp/products/ir-thermo/lineup/g120-g100/index.html>, Thermo GEAR G120EX.

第 7 章 省エネルギー技術の複合工作機械への適用

7.1 はじめに

本章では、旋盤型複合工作機械における実加工に前章までに提案した省エネルギー技術を適用し、その妥当性を検証した。実際のワークの加工を行い、第5章で評価した加工消費電力量、第6章で評価した待機電力量を合わせて評価した。これは、第3.3節の式(3.9)を用いた評価と同等である。

本章の第7.2節では前章までに提案した省エネルギー技術、第7.3節では実加工を行う上で使用した工作機械、ワークおよび切削条件、第7.4節ではこれらを適用した省エネルギー化の検証結果、第7.5節では、以上をまとめた第7章の結論について述べる。

7.2 適用した省エネルギー技術

本節では、適用した省エネルギー技術について述べる。前章までの評価した消費電力量削減のための方策のうち、対応可能なものおよび新たな方策について述べる。なお、前章までに述べたものは明記している。また、方策を行った機器の配置を図7.1に示す。

以下の3つの方策は加工方法の改善、つまりすでにユーザーに納入している機械にも適用できるものである。

(I) 加工方法の改善

- (1) 低抵抗切削工具の採用：低抵抗用工具を用いることで、切削抵抗の低減を図った。さらに、切削抵抗を低減した分だけ切削条件を高く設定した(第5.3節)。
- (2) 適応ペッキングサイクルの採用：深穴加工に対し、適応ペッキングサイクルを使用し、サイクルタイムの短縮を図った(第5.3.6項)。
- (3) ATC回数の削減：座ぐり加工と側面加工が行えるエンドミルを用いることで、ATC回数の削減、さらにはサイクルタイムの短縮を図った。

さらに、以下の5つは周辺機器、その他の制御方法の最適化による方策であり、今後開発される工作機械の省エネルギー化に貢献するものである。

(II) 周辺機器、制御方法の最適化など

- (4) インバータの採用：オイルクーラー、油圧ユニット、ATCモータ、クーラントモータにインバータを採用した(第6.2節)。

- (5) 送り駆動系の動力遮断：使用していない軸をメカロックし，動力を遮断した。
- (6) クイックMコードの採用：主軸回転の動作の完了指令がでるまえに，次の動作に移ることにより，サイクルタイムの短縮を図った。
- (7) 加減速時間の削減：時定数を調整して送り系の加減速時間の削減を行ない，サイクルタイムの短縮を図った(第5.3.7項)。
- (8) 干渉チェックモードの最適化：試作時には干渉チェックを有効にし，操作ミスなどによる機械の干渉を未然に防ぐことができる^{7.1)}。それに対し，試作終了後の量産加工時には干渉の可能性が大きく低下する。そのため，干渉チェックを量産モードに切り替えることで，演算処理時間を大幅に少なくしサイクルタイムの短縮を図った。

以上のように，納入済みの機械にすぐに適用できるもの，今後の工作機械の開発に貢献するものに分類し，検証を行った。

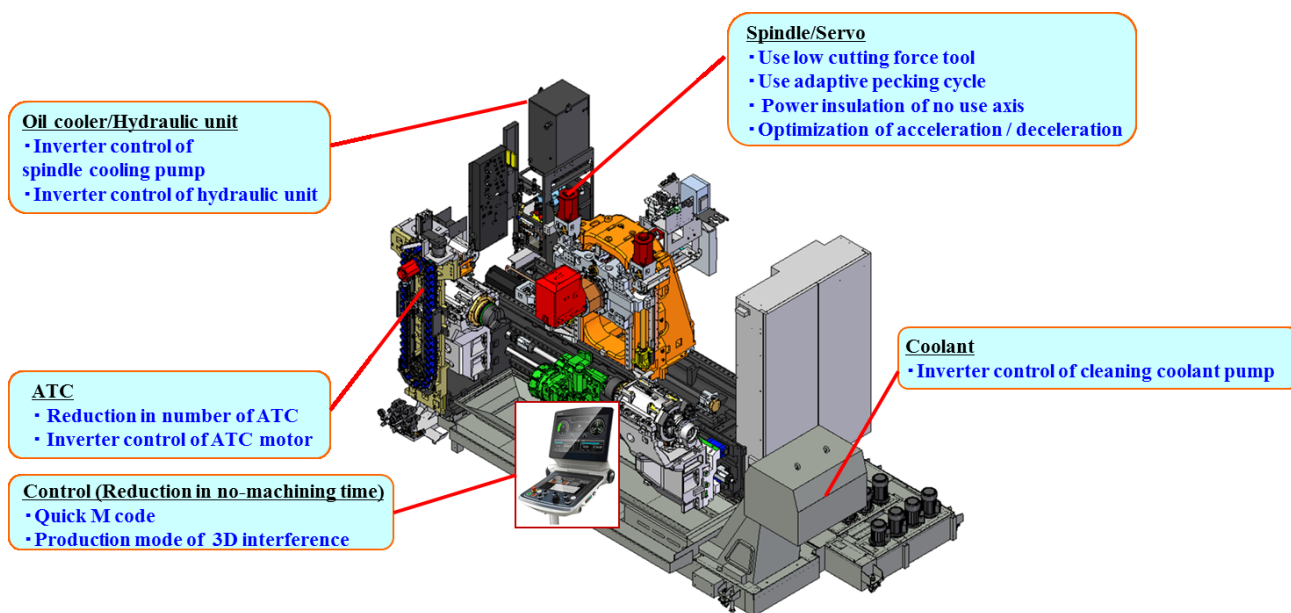


Fig.7.1 The energy saving method of multi-functional machine tools

7.3 使用工作機械，ワークおよび切削条件

7.3.1 使用工作機械

本検証実験では，1台で完成品を加工することのできる旋盤型複合工作機械NTX2000を用いた．図7.2は概観を示す．本実験ではより生産現場での加工に近い条件とするため，またサイクルタイム短縮のため，下刃物台も使用して加工を行った．



Fig.7.2 The overview of multi-functional machine tools NTX2000

7.3.2 対象ワーク

図7.3は対象ワークであるボールナットの概観を示す．このワークは，旋削，ミリング加工工程があり，多くの工具を使用する．また，第1工程と第2工程でワークの掴み替えが必要であり，複合工作機械に非常に適したワークであると考えられる．素材材質はS45C，素材形状は $\Phi 135 \times 95$ mmである．



Fig.7.3 Ball nut

7.2.3 工程，工具および切削条件

表7.1は基準となる工程，工具および切削条件を示す．この工程，工具および切削条件に対して後に述べる方策を適用した．表7.2は適用後のそれを示す．なお，工程の変更は青色，工具の変更は橙色，切削条件の変更は黄色で示している．これは前述した切削条件の改善にあたる．

Table 7.1 Operation, tool and cutting conditions before application

Operation	Tool		Cutting speed m/min	Spindle speed min ⁻¹	Feed speed			Axial depth of cut mm	Radial depth of cut mm
	Milling spindle	Lower turret			mm/min	mm/rev.	mm/tooth		
Face and O.D rough		O.D 80° insert	180	-	-	O.D:0.25 Face:0.2	-	O.D:3.0 Face:1.0	71.9
Φ36 through hole	U drill Φ36		150	1327	159	0.12	0.06	97	-
I.D. rough	I.D insert 80°		180	-	-	0.2	-	2	77
Face and O.D fin.		O.D insert 60°	250	-	-	0.15	-	0.1	72
I.D fin		I.D insert 55°	250	-	-	0.15	-	0.1	77
OP1 face	Φ32FM		160	1592	637	0.4	0.133	1	24
Wall fin.	Φ20EM		160	2548	1020	0.4	0.1	40	0.1
Φ11.2 hole	Φ11.2 Drill		100	2843	600	0.2	-	22.3	-
Φ4.2TAP hole	Φ4.2Drill		100	7583	1517	0.2	-	9	-
Chamfer (Φ16)	Φ16 chamfer cutter		40	-	-	Hole:0.1 Counter:0.4	Hole:0.017 Counter:0.067	-	-
M5×0.8Tap	TAP M5×0.8		15	955	764	0.8	-	6.5	-
10mm groove	Φ10 EM		Rough: 110 Fin: 120	Rough: 3503 Fin: 3822	Rough: 981 Fin: 459	Rough: 0.28 Fin: 0.12	Rough :0.07 Fin :0.03	Rough:6.4 Fin:0.1	10
Chamfer (Φ16)	Φ16 Chamfer cutter		40	2450	980	0.4	0.033	-	-
Transfer	OP2 I.D inser t80°		-	200	-	-	-	-	-
F.D and O.D rough		O.D 80° insert	180	-	-	O.D:0.25 Face:0.2	-	2	20
I.D rough	I.D 80° insert		180	-	-	0.25	-	2	15.9
F.D and O.D fin		O.D 60° Insert	250	-	-	0.15	-	0.1	20
I.D fin	I.D55° insert		250	-	-	0.15	-	0.1	16
OP2 face	Φ32 face mill		160	1592	716	0.45	0.2	1.5	20
Φ11.2 face hole	Φ11.2 Drill		100	2843	853	0.3	-	20	-
Φ17.5 Counter bore	Φ17.5 counter bore		60	1092	218	0.2	0.067	11	3.15
Center hole	Φ3 center drill		20	2123	160	0.0075	-	3	-
Φ5.7O.D deep hole	Φ5.7 Drill		80	4470	894	0.2	-	39	-
Face hole chamfer	Φ16 changer cutter		40	1592	636	0.4	-	-	-
O.D. hole chamfer	Φ16 chamfer cutter		40	-	-	Hole:0.1 Counter:0.4	Hole:0.017 Counter:0.067	-	-

Table 7.2 Operation, tool and cutting conditions after application

Operation	Tool		Cutting speed m/min	Spindle speed min ⁻¹	Feed speed			Axial depth of cut mm	Radial depth of cut mm
	Milling spindle	Lower turret			mm/min	mm/rev.	mm/tooth		
Face and O.D rough		O.D 80° insert	200	-	-	O.D:0.33 Face:0.2	-	O.D:3.0 Face:1.0	71.9
Φ36 through hole	U drill Φ36		150	1327	159	0.12	0.06	97	-
I.D. rough	I.D insert 80°		180	-	-	0.2	-	2	77
Face and O.D fin.		O.D insert 60°	250	-	-	0.15	-	0.1	72
I.D fin		I.D insert 55°	250	-	-	0.15	-	0.1	77
OP1 face	Φ32FM		160	1592	716	0.45	0.150	1	24
Wall fin.	Φ20EM		200	3185	2526	0.8	0.2	40	0.1
Φ11.2 hole	Φ11.2 Drill		100	2843	Through : 853 Non through : 600	Through : 0.3 Non through : 0.2	-	22.3	-
Φ4.2TAP hole	Φ4.2Drill		100	7583	1517	0.2	-	9	-
10mm groove	Φ10 EM		110	3503	981	0.28	0.07	-	-
Chamfer	Φ16 Chamfer cutter		120	-	-	0.6	0.1	-	-
M5×0.8 TAP	M5 TAP		15	955	764	0.8	-	6.5	-
-	-		-	-	-	-	-	-	-
Transfer	M5 TAP		-	200	-	-	-	-	-
F.D and O.D rough		O.D 80° insert°	180	-	-	O.D :0.25 Face :0.2	-	2	20
I.D rough	I.D 80° insert°		180	-	-	0.25	-	2	15.9
F.D and O.D fin		O.D 60° insert	250	-	-	0.15	-	0.1	20
I.D fin	I.D 55° insert		250	-	-	0.15	-	0.1	16
OP2 face	Φ32 high feed cutter		160	1592	3821	2.4	1.2	0.7	20
Φ11.2 face hole	Φ11.2 drill		100	2843	853	0.3	-	20	-
Φ17.5 Counter bore	Φ17.5 Counter bore		128	2330	279	0.12	0.04	11	3.15
Center hole	Φ5.7 flat mill		70	3911	391	0.1	-	8	-
Φ5.7O.D deep hole	Φ5.7 Drill		80	4470	894	0.2	-	39	-
Face hole chamfer	Φ16chanfer cutter		120	-	-	0.6	0.1	-	-
O.D. hole chamfer	Φ16changer cutter		120	-	-	0.6	0.1	-	-

7.4 省エネルギー技術の検証

前節までに述べた方策の適用結果により、省エネルギー技術の検証を行なった。表7.3は省エネルギー技術適用前、適用後のワーク1個あたりの消費電力量およびサイクルタイム測定結果を示している。また、図7.4はグラフにしたものである。

表7.3、図7.4に示すように、切削条件改善を実施すると、加工消費電力量は2026 Whから1703 Whへと約16%、待機電力量は1914 Whから1305 Whへと約32%、総消費電力量は3940 Whから3008 Whへと約24%削減可能となった。また、サイクルタイムは2108秒から1463秒と約31%の短縮となった。これは、待機電力量削減割合とサイクルタイム短縮割合がほぼ同じころから、切削条件改善によるサイクルタイムの短縮が待機電力量の削減に効果を及ぼしていることがわかる。一方で、加工消費電力量の削減割合が16%と小さくなっているが、これは切削条件を高く設定したことによる切削抵抗の上昇が原因と考えられる。しかし、切削条件を高く設定しているにも関わらず加工消費電力量が削減できているため、この方策は省エネルギー化に大きく寄与することがわかる。

つぎに、周辺機器最適化、その他の制御改善の方策を実施すると、加工消費電力量は2026 Whから1671 Whへと約18%、待機電力量は1914 Whから1719 Whへと約10%、総消費電力量は3940 Whから3390 Whへと約14%削減可能となった。また、サイクルタイムは2108秒から2001秒と約5%の短縮となった。これは、この方策(6)、(7)、(8)が5%のサイクルタイム短縮に効果を及ぼし、また、前章まで考慮していない加工中のクーラントポンプの消費電力量を、方策(4)により削減できているためと考えられる。さらに、サイクルタイムの短縮が5%に対して待機電力量が10%削減できていることから、この方策により周辺機器の消費電力量が削減できていることがわかり、この方策も省エネルギー化に大きく寄与することがわかる。

最後にこれら二つの方策を組み合わせた結果、加工消費電力量は2026 Whから1485 Whへと約27%、待機電力量は1914 Whから1239 Whへと約30%、総消費電力量は3940 Whから2724 Whへと約31%削減可能となった。また、サイクルタイムは2108秒から1377秒と約35%の短縮となった。以上より、本研究で提案した省エネルギー技術は消費電力量を約30%削減できることがあきらかとなった。

Table 7.3 Results of energy saving method

		Machining electric energy [Wh]	Ready electric energy [Wh]	Total electric energy [Wh]	Cycle time [s]
Before application		2026	1914	3940	2108
After application	Improvement of machining condition	1703	1305	3008	1463
	Optimization of aullx. etc	1671	1719	3390	2001
	Both	1485	1239	2724	1377

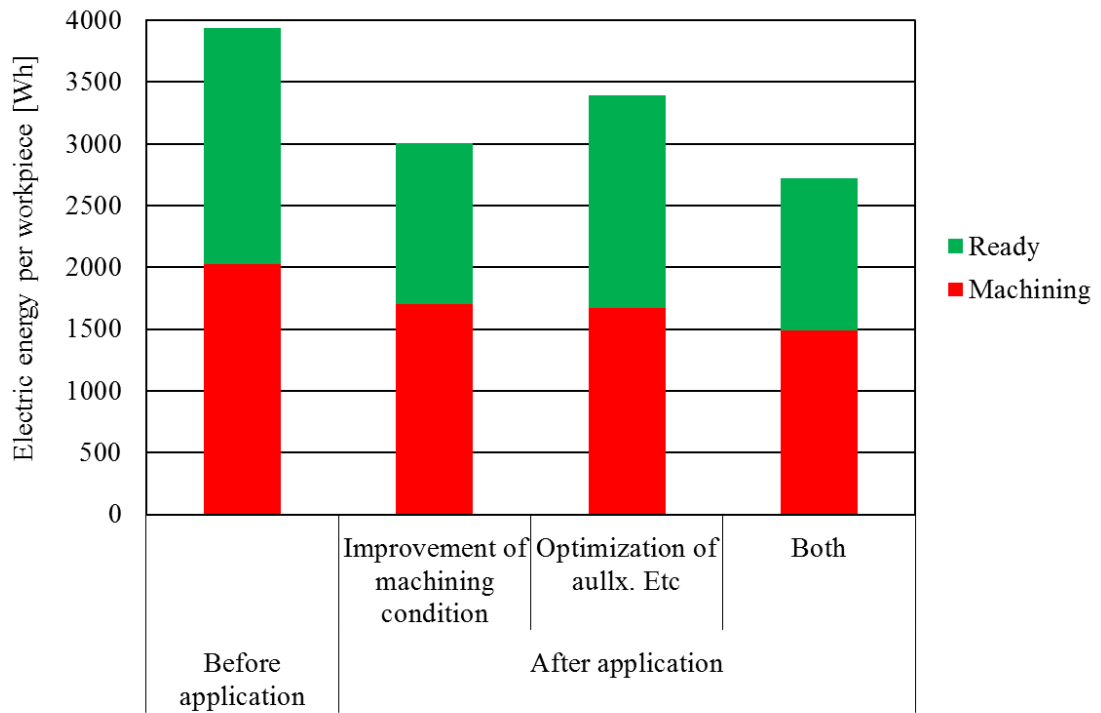


Fig.7.4 Results of energy saving method

7.5 まとめ

本章では、旋盤型複合工作機械における実加工に前章までに提案した省エネルギー技術を適用し、その妥当性を検証した。本章の研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 本章で提案した省エネルギー技術を適用することで、ボールナットの加工において、約30%の消費電力量削減が可能となった。
- (2) 省エネルギー技術には、納入済みの機械にすぐに適用できる切削条件の改善、今後の工作機械の開発に貢献する周辺機器、制御方法の最適化が含まれる。

参考文献

7.1) DMG森精機株式会社, NTXシリーズカタログ(2014) 18.

第 8 章 結 論

工作機械の省エネルギー開発指針となる技術開発を目指し、工作機械の運転状態ごとの消費電力量の測定、検証、さらにそれらの結果を踏まえた省エネルギー技術方策の提案およびその検証を行った本研究で得られた主な結論は次のとおりである。

第 2 章 工作機械の構成と電力消費

工作機械の構成要素と電力消費の生じる箇所、運転状態と使用される機器の関係などについて、旋盤型複合工作機械を例にとって考察した。

まず、工作機械は主軸系、送り系、構造体、CNC装置および周辺機器の5つの要素から構成されている。これらの要素の詳細を調査し、それらの内部に多数のモータがあり、多量の電力量が消費されて大きな発熱源となっていることを確かめた。また、これらのモータの回転と負荷は、工作機械の運転（作業）状態によって支配されていることをあきらかにした。さらに、これらのモータにおいては作動状態が他のモータによって決まるものと、単独で運転できるものがあることをあきらかにした。最後に、工作機械のトータルとしての消費電力量を削減するために有効な方策について考察した。

第 3 章 工作機械における消費電力量の分類

工作機械において消費される電力量を運転状態から分類し、それらの評価方法、測定方法について述べた。

まず、工作機械における消費電力量を待機電力量、加工消費電力量の2つに分類した。待機電力量は、運転準備状態および加工状態における油圧機器、クーラントポンプなどの周辺機器により消費される電力量である。一方、加工消費電力量は加工状態における消費電力量であり、周辺機器、主軸系、送り系、および加工により消費される電力量が含まれる。このうち加工消費電力量は切削除去量で除算した値にて評価した。また、消費電力量は機械電源入力部、周辺機器ブレーカーにクランプ式ワットメータを接続し、測定した。

第 4 章 切削加工試験方法

第3章で分類した加工時に消費される電力量の評価に用いた工作機械、工具、被削材などを述べた。

まず、各加工で使用する複合CNC旋盤NLX25000、3軸制御立形マシニングセンタNV5000 α 1/40、5軸制御立形マシニングセンタNMV3000DCG、旋盤型複合工作機械NTX2000の概観、軸構成および機械仕様について述べた。また、旋盤加工、ミリング加工、傾斜ミリング加工で使用した工具、切削条件、加工パスおよび被削材について述べた。さらに、複合

工作機械における旋削加工，フェイスミル加工の消費電力量を定式化した．最後に，工具観察方法および工具寿命判断方法について述べた．

第 5 章 加工消費電力量の測定

第3章で述べた工作機械の状態分類のうち，加工状態時に発生した消費電力量を検証した結果を述べた．旋削，ミリング，傾斜ミリング加工における消費電力量を測定し，省エネルギーとなる切削条件を検証した．また，複合工作機械においては各加工を行い，最も省エネルギーとなる加工形態について検証した．

まず，CNC旋盤による旋削加工は，主軸回転数が消費電力量に大きく影響を及ぼすことをあきらかにした．外径旋削加工においては，基底回転数領域で主軸が回転するように切削速度を選定することで，33%の消費電力量削減が可能となった．また，端面加工においては最大主軸回転数を工具寿命に影響を及ぼさない領域で低く設定することで，30%の消費電力量削減が可能となった．

3軸制御立形マシニングセンタにおけるミリング加工においては，実用的な範囲，つまり工具寿命に悪影響を及ぼさない範囲内で切削条件を高く設定することで，消費電力量が削減できることをあきらかにした．例えば，フライス加工では高切削速度，高送り速度，中切込み深さ，高切込み幅に設定することで45%，エンドミル加工では高切削速度，高送り速度，高切込み深さ，中切込み幅に設定することで65%，ドリル加工では中切削速度，高送り速度に設定することで5%の消費電力量削減が可能となった．さらに，深穴加工時においては適応ペッキングサイクルにより19%，主軸加速・送り軸位置決め時においては加減速調整により，10%の消費電力量削減が可能となった．

5軸制御立形マシニングセンタにおける傾斜ミリング加工においては，傾斜角度を15度に設定することで，工具寿命，仕上げ面粗さを保ちながら，50%の消費電力量削減が可能となった．

複合工作機械における旋削，フェイスミル，エンドミル，ドリル加工においては，ドリル加工が最も省エネルギーな加工法であり，ついで旋削，フェイスミルとなり，エンドミル加工は最も消費電力量が多い加工法であることをあきらかにした．

第 6 章 待機電力量の測定

第3章で述べた工作機械の状態分類のうち，準備状態時に発生した消費電力量を検証した結果を述べた．準備状態時に消費される電力量において，各周辺機器の消費電力量割合を分析した．さらに，周辺機器最適化，工程集約，切りくず吸引システムの採用などの方法で省エネルギー化を図った．

まず，DMG森精機の大量生産ラインにおける小型横形マシニングセンタの消費電力量のうち，約54%がクーラント関連周辺機器によって消費されていることをあきらかにした．また，クーラントポンプの集約，運動周波数，スピンドルスルークーラント吐出圧などの最適

化および油圧機器の最適化により、最大約41%の消費電力量削減が可能となった。さらに、9台の横形マシニングセンタを1台の5軸制御マシニングセンタに置き換えて工程集約を図ることで、約8%の消費電力量削減が可能となった。

つぎに、本研究で開発した切りくず吸引システムを採用することで、従来のウェット加工と比較し約19%の消費電力量削減が可能となった。また、切りくず吸引システムの冷却効果により、面加工、穴あけ加工においては、工具、被削材の温度抑制が期待できることをあきらかにした。よって、切りくず吸引システムは、クーラントと切りくずの分別を行う必要が無く、また切りくずがほとんど飛散しないため、環境、人体に悪影響を及ぼさない非常にエコな加工である。

第7章 省エネルギー技術の複合工作機械への適用

旋盤型複合工作機械における実加工に、前章までに提案した省エネルギー技術を適用し、その妥当性を検証した。

提案した省エネルギー技術を適用することで、ボールナットの加工において、約30%の消費電力量削減が可能となった。この省エネルギー技術には、納入済みの機械にすぐに適用できる切削条件の改善、今後の工作機械の開発に貢献する周辺機器、制御方法の最適化が含まれる。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、ご懇篤なるご指導を賜りました中部大学教授 竹内芳美先生に深く感謝いたします。また、審査においてご助言を賜りました中部大学教授 水谷秀行先生、鈴木浩文先生、ならびに神戸大学教授 白瀬敬一先生に深く感謝申し上げます。

また、本研究の遂行にあたり、所属するDMG森精機株式会社の皆様には多大な援助を頂きました。代表取締役社長 森雅彦氏、専務執行役員 藤嶋誠氏には、ご指導頂くと共に学位取得の機会を与えて頂きましたことを深く感謝申し上げます。

つぎに、本研究をともに進めて頂きました関係各位から終始ご協力を賜り心より御礼申し上げます。特に実験の遂行に関しては、DMG森精機株式会社小型機製造部 稲増靖宏氏、同社伊賀加工技術部 秀田守弘氏、洪策符氏、同社エンジニアリング部 佐藤康児氏、消費電力量の測定に関しては、同社品質管理室出荷前品質管理部 川村吉一氏、また傾斜ミリング加工に関してはDMG森精機金型研究所 松岡興治氏、切りくず吸引システムに関しては富士重工業株式会社 小島裕登氏に多大なるご協力を賜りました。ここに謹んで御礼申し上げます。

さらに本研究を進めていく課程におきまして、ご助言ご協力を賜りました垣野技術研究所 京都大学名誉教授 垣野義昭先生、中川加工技術研究所 滋賀県立大学名誉教授 中川平三郎先生、龍谷大学講師 小川圭二先生に深く感謝いたします。

最後になりましたが、本研究を進めるにあたり終始ご支援頂きました、DMG森精機株式会社 伊賀加工技術部、東京SC加工技術部の皆様、そして私を陰ながら支えてくれた家族に心から感謝いたします。

業績

原著論文

1. M. Mori, M. Fujishima, Y. Inamasu and Y. Oda, A Study on energy efficiency improvement for machine tools, CIRP Annals, **60**, 1 (2011) 145. (第 5 章に関連)
2. Y. Oda, M. Mori, K. Ogawa, S. Nishida, M. Fujishima and Y. Kawamura, Study of optimal cutting condition for energy efficiency improvement in ball end milling with tool-workpiece inclination, CIRP Annals, **61**,1 (2012) 119. (第 5 章に関連)
3. M. Fujishima, M. Mori, Y. Oda, Energy-efficient manufacturing on machine tools by machining process improvement, Production Engineering, **8**, 1-2 (2014) 217. (第 5,6 章に関連)
4. Y. Oda, M. Fujishima and Y. Takeuchi, Energy saving machining of multi-functional machine tools, International Journal of Automation Technology, **9**, 2 (2015) 135. (第 5 章に関連)

国際会議Proceedings

1. Y. Oda, Y. Kawamura and M. Fujishima, Energy consumption reduction by machining process improvement, Proceedings of 3rd CIRP Process Machine Interactions, (2012) 119. (第 5, 6 章に関連)
2. Y. Oda, M. Fujishima, Y. Kawamura and M. Hideta, Energy Reduction of Machine Tools, Proc. of JSPE 14th International Conference on Performance Engineering ICPE2012, (2012) 985. (第 6 章に関連)
3. M. Mori, M. Fujishima and Y. Oda, 5 axis mill turn and hybrid machining for advanced application, Proceedings of 5th CIRP Conference on High Performance Cutting, (2012) 22.
4. M. Mori, M. Fujishima and Y. Oda, Energy efficient manufacturing on machine tools by machining process improvement, Proc. of 5th International Conference on Changeable CARV 2013 Agile Reconfigurable and Virtual Production, (2013) 461. (第 5,6 章に関連)
5. Y. Oda, M. Mori, M. Fujishima and Y. Takeuchi, Reduction of Power Consumption in Rough Turning, Proceedings of JSPE 15th International Conference on Performance Engineering ICPE2014, (2014) 473. (第 5 章に関連)

雑誌投稿・学会投稿

1. 小田陽平, 秀田守弘, 小島裕登, 藤嶋誠, CFRP 加工における切りくず吸引システムの吸塵・冷却効果について, 日本機械学会 第9回生産加工・工作機械部門講演会 (2012)

241. (第6章に関連)

2. 藤嶋誠, 小田陽平, オペレータが無意識に省エネを達成できる工作機械の開発, 機械設計, **56**, 12 (2012) 37.
3. 藤嶋誠, 小田陽平, 森雅彦, 工作機械の省エネルギー, 精密工学会誌, **78**, 9 (2012) 752.

その他

1. 森精機における省エネ環境対応技術, 公益社団法人 大阪府工業協会主催 機械加工技術研究会 第2回例会, (DMG森精機伊賀事業所), 2012年7月20日.
2. 業種別加工事例と最先端加工技術の紹介, メカトロテックジャパン2013 出展者ワークショップ, 2013年10月23日.

経 歴

学歴

- 2003年 4月 滋賀県立大学工学部機械システム工学科入学
- 2007年 3月 滋賀県立大学工学部機械システム工学科卒業
・中川平三郎, 小川圭二, 小田陽平, 木村俊夫, 高精度輪郭研削加工に関する基礎的研究—クーラントによる動圧の影響—, 砥粒加工学会誌, **51**, 12 (2007) 729.
- 2007年 4月 滋賀県立大学工学研究科機械システム工学専攻入学
- 2009年 3月 滋賀県立大学工学研究科機械システム工学専攻修了
・小田陽平, 中川平三郎, 小川圭二, 垣野義昭, リニアモータ駆動マシニングセンタにおけるエンドミル加工の切削抵抗モニタリング, 2009年精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2009) 571.
・Keiji OGAWA, Heisaburo NAKAGAWA, Youhei ODA and Yoshiaki KAKINO, Monitoring of Cutting Force in End-milling Processes Using Internal Sensors in a Linear Motor Driven Machining Center, Proc. of 3rd Internal Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology ASPEN2009, 1D-7 (2009) 1.

職歴

- 2009年 4月 株式会社森精機製作所(現DMG森精機株式会社)入社
加工技術研究に携わる