

高能率マシニングセンタの開発
に関する研究

平成11年7月

高田芳治

要約

近年、あらゆる産業界で多品種生産の要求が高まっており、柔軟性に優れるマシニングセンタ (MC) の生産性向上が課題となっている。MC は数値制御 (NC) プログラムに従って、切削、位置決め、工具交換などの動作を自動的に実行する。1 個の部品を加工する際に要するこれらの動作時間を合計したものがサイクルタイムであり、この短縮が生産性の向上に寄与する。このために高速主軸、高速高加減速送り駆動系、高速切削工具と高速加工技術などの開発が行われている。しかしながらこれまでの MC の開発では、実機を試作して部品加工を行う以外に、これら新技術の採用によるサイクルタイムの短縮効果を定量的に検証する方法はなかった。したがって高速化による生産性の向上効果が予め十分に検証されることなく、いたずらに高速仕様をねらった開発が行われる傾向にあると感じられる。このような背景から本研究では、MC の”高速化”について考察し、真に生産性が高くかつ経済的な MC の開発を試みた。

本研究では、まず NC プログラムを解析して MC の機械性能を考慮しながら各動作ごとの所要動作時間を積算できるサイクルタイムシミュレータを開発した。次にこのシミュレータを用い、主軸や送り駆動系などの機械仕様および加工条件を変化させて、加工実績のあるいくつかの部品についてサイクルタイム分析を行った。この分析結果を踏まえ実用可能な技術とそのコストを考慮して生産性が向上すると考えられる機械仕様を立案し、これに基づいて MC を試作した。さらに試作 MC を用いて実際に加工を行い、サイクルタイムを従来の MC によるものと比較した。最後にこの MC を用いて高速加工技術の開発を行った。その結果を次にまとめる。

- (1) 開発されたシミュレータと実機とによるサイクルタイムを比較した結果、シミュレーションの誤差は3～4%程度であることを確認した。
- (2) シミュレーションによるサイクルタイム分析から、送り駆動系の高速化は、高加減速化が同時に行われる場合にはじめてサイクルタイムの短縮に寄与することを示した。
- (3) サイクルタイムの短縮には、高速切削の適用による切削送り速度の向上が効果的であり、このためには主軸の高速化と高出力化が必要である。
- (4) シミュレーション結果に基づき、航空機等の小物アルミニウム部品を加工対象とする高速立形MC、および自動車等のアルミニウム鋳物部品を加工対象とする高速横形MCをそれぞれ設計、試作した。
- (5) 試作されたMCはサイクルタイムを従来機に比べて1/2～1/3に短縮することが可能であり、高い生産性を有するとともにコスト的にも妥当なものであることを確認した。
- (6) 試作されたMCを用いて高速加工技術の開発を行い、従来の切削条件に比べて5～20倍の高速切削条件による高能率加工が可能であることを示した。

以上のように、高能率MCの開発に成功するとともに、今後の高能率MCの開発指針を得ることができた。

Study of Machining Centers for Higher Productivity

Yoshiharu TAKATA

July, 1999

Abstract

In recent years, the demand for agile manufacturing has increased in every industry. As a result, machine tool manufacturers are expected to improve the productivity of machining centers which have high flexibility. A machining center automatically executes several machining operations such as cutting, positioning, and tool changing, etc. according to the numerical control (NC) program for machining a workpiece. The total operation time required for machining the workpiece is referred to as the cycle time. Productivity of machine tools is improved by reducing the cycle time. For reducing the cycle time, several technologies have been developed to increase the operation speed of machine tools (high-speed main spindle, high-speed and high-acceleration/deceleration feed drive system, high-speed cutting tools, high-speed machining technology, etc.). However, there was no standard for quantitative evaluation for productivity of a machining center having these new technologies. The only way for quantitative evaluation was to make a trial machining center having these technologies and to measure the actual cycle time of machining workpieces. Such experimental evaluation tends to lead to over-specifications of a machining center without careful consideration of the effect of faster machine tool operation on productivity. In this thesis, the effect of the operation speed is discussed for realizing a machining center with higher productivity and reasonable cost by incorporating the current market demand as mentioned above.

The first step of this research is to develop a cycle time simulator which is able to simulate each operation time by analyzing given NC programs and machine specifications to be evaluated. In the second step, the cycle time simulator is use to

calculate the cycle time of machining workpieces which have been actually machined. By changing machine specifications for the main spindle and the feed drive system, etc. and the cutting conditions, the effect of these changes on the cycle time is quantitatively analyzed. Based on the result of the cycle time analysis, the specifications of a high productivity machining center is selected under the consideration of the available technologies and cost. The third step is to manufacture the machining center with the selected specifications. Then the cycle time for machining a workpiece is measured by using the improved machining center, and the measured cycle time is compared with the cycle time required by a conventional machining center. From the comparison of the cycle time, the productivity of the improved machine is discussed. Finally, using the improved machining center, high-speed cutting can be studied and several technologies for high productivity can be obtained. The results of the research are as follows:

- (1) Comparison of the cycle times calculated by the developed simulator and measured by actual machining shows that the error in the simulation is about 3-4%. Therefore, the simulator can be used for the quantitative evaluation of the performance of a machining center to be designed.
- (2) The cycle time analysis by the simulation shows that the faster operation speed of the feed drive system contributes to reduce the cycle time only when the acceleration/deceleration of the feed drive system increase simultaneously.
- (3) It is effective to reduce the cycle time by increasing the cutting feed rate by applying high-speed cutting conditions, therefore the speed and output power of the main spindle should be increased.
- (4) According to the result of the simulation, a high-speed vertical machining center for machining small aerospace components of aluminum alloy and a high-speed horizontal machining center for machining automotive parts of cast aluminum or cast iron are designed and made.
- (5) The improved machining centers are able to reduce the cycle time to 1/2-1/3

of the time as required by a conventional machining center. Thus the improved machining centers have higher productivity with reasonable cost.

- (6) High-speed cutting technology is developed by using the improved machining centers, and it is shown that the cutting speed and feed rate can be 5-20 times higher than the conventional cutting conditions.

As the results of this research, high productivity machining centers can be developed. This research also shows the design procedure using the cycle time simulator, and the design information for future machine tools of higher productivity can be obtained.

目次

要約	i
Abstract	iii
記号	x
第1章 序論	1
第2章 マシニングセンタの設計支援を目的としたシミュレーションシステムの開発	15
2.1 緒言	15
2.2 設計支援サイクルタイムシミュレータの機能と構成	17
2.3 サイクルタイムの算出方法	20
2.3.1 切削送りの動作時間	25
2.3.2 位置決め動作時間	29
2.3.3 主軸の起動停止時間	29
2.3.4 工具交換時間	30
2.3.5 Mコード処理時間	31
2.4 サイクルタイムシミュレータの評価	31
2.5 結言	39
第3章 サイクルタイムシミュレータを用いたマシニングセンタの高速化に関する考察	40
3.1 緒言	40

3.2	航空機部品の加工に関するサイクルタイム分析	41
3.2.1	送り駆動系最大送り速度の向上	41
3.2.2	送り駆動系加速度の向上	43
3.2.3	切削送り速度の向上	45
3.2.4	まとめ	48
3.3	自動車部品の加工に関するサイクルタイム分析	48
3.3.1	送り駆動系最大送り速度の向上効果	48
3.3.2	送り駆動系加速度の向上	50
3.3.3	切削送り速度の向上	52
3.3.4	まとめ	55
3.4	工作機械部品の加工に関するサイクルタイム分析	55
3.4.1	送り駆動系最大送り速度の向上効果	55
3.4.2	送り駆動系加速度の向上	57
3.4.3	切削送り速度の向上	59
3.4.4	まとめ	61
3.5	結言	61
第4章	小物航空機部品加工用高速高能率マシニングセンタの開発	63
4.1	緒言	63
4.2	目標仕様の選定	64
4.2.1	主軸の仕様選定	65
4.2.2	送り駆動系の仕様選定	65
4.2.3	ATC装置の仕様選定	65
4.3	機構設計	66
4.3.1	主軸の機構設計	66
4.3.2	送り駆動系の設計	67
4.3.3	ATC装置の設計	69
4.4	性能評価	69
4.4.1	目標仕様の確認	70

4.4.2	加工能力の評価	72
4.4.3	加工時間の検証	73
4.5	結言	74
第5章	自動車部品加工用高速高能率マシニングセンタの開発	76
5.1	緒言	76
5.2	目標仕様の選定	76
5.2.1	主軸の仕様選定	77
5.2.2	送り駆動系の仕様選定	77
5.2.3	ATCの仕様選定	77
5.3	機構設計	77
5.3.1	主軸の機構設計	77
5.3.2	送り駆動系の設計	78
5.3.3	ATC装置の設計	81
5.4	性能評価	81
5.4.1	目標仕様の確認	82
5.4.2	加工時間の検証	85
5.5	結言	87
第6章	高速高能率切削加工の試み	88
6.1	緒言	88
6.2	アルミニウム合金の高速加工技術	89
6.2.1	高速フェイスミル加工	89
6.2.2	高速エンドミル加工	93
6.2.3	高速ドリル加工	95
6.2.4	高速タップ加工	97
6.3	鋳鉄の高速加工技術	101
6.3.1	高速フライス加工	102
6.3.2	高速エンドミル加工	104

6.3.3	高速ドリル加工	105
6.3.4	高速タップ加工	108
6.3.5	高速ボーリング加工	110
6.4	炭素鋼の高速加工技術	111
6.4.1	高速フライス加工	111
6.4.2	高速エンドミル加工	113
6.4.3	高速ドリル加工	115
6.4.4	高速タップ加工	115
6.5	結言	117
第7章	結論	119
	謝辞	122
	参考文献	129

記号

本論文で使用する主な記号と意味を列挙する.

a :	切削送りの設定加速度	m/s^2
C_P :	工程能力	-
e :	加工寸法誤差	μm
F :	切削送り速度の指令値	m/s
F_{max} :	円弧補間時の最大切削送り速度	m/s
F_{lim} :	コーナ部での最大切削送り速度	m/s
GD^2 :	主軸のスピンダルとモータロータのイナーシャ合計	kgm^2
K_f :	フィードフォワード係数	%
K_p :	位置ループゲイン	s^{-1}
l :	円弧補間の始点と終点の直線距離	mm
m_I :	インサートの質量	kg
P_0 :	主軸モータの最大出力	W
$P_{si}(x_{si}, y_{si}, z_{si})$:	i 番目のブロックの始点	mm
$P_{ei}(x_{ei}, y_{ei}, z_{ei})$:	i 番目のブロックの終点	mm
$P_{ci}(x_{ci}, y_{ci})$:	i 番目のブロックの円弧補間中心	mm
r :	円弧補間の補間半径	mm
r_I :	インサートの回転半径	m
s :	補間距離	mm
t_i :	i 番目のブロックの動作時間	s
t_A :	サイクルタイム	s
t_{Ci} :	切削送りの動作時間	s
t_{Di} :	ドウェル時間	s
t_{Mi} :	主軸の起動停止と工具交換を除く M コード処理時間	s
t_{Pi} :	早送り動作による位置決め時間	s
t_{Pix} :	X 軸の位置決め動作時間	s
t_{Piy} :	Y 軸の位置決め動作時間	s
t_{Piz} :	Z 軸の位置決め動作時間	s
t_{Si} :	主軸の起動停止時間	s
t_{S1} :	主軸モータの定トルク領域の加減速時間	s
t_{S2} :	主軸モータの定出力領域の加減速時間	s
t_{S3} :	主軸モータの出力てい減領域の加減速時間	s
t_{Ti} :	工具交換時間	s

w :	インサートの回転角速度	rad/s
W_I :	インサートに生ずる遠心力	N
Δt :	NC装置の補間前制御時のサンプリング周期	s
σ :	標準偏差	-

第1章 序論

近年の工作機械発展にとって3つの重要な技術開発があった¹⁾。一つめは、数値制御（以下NCとする）工作機械の登場である。約50年前にMITにおいて航空機部品（ヘリコプターブレードの検査ジグ）を自動加工することを目的として世界初のNCフライス盤が開発され、その後のNC工作機械の発展の方向を示すものとなった。すなわち、工作機械はNCによって複雑な形状の加工を高精度かつ自動的に行えるようになり、これによって同じものを量産することができるようになった。

二つめは、NCフライス盤に自動工具交換（以下ATCとする）装置を組み込んだ「マシニングセンタ」が登場したことである。これは1958年にK&T社が開発したストレートシャンクの工具ホルダをNCプログラムに従って自動的に交換するものであった。この開発によってNCフライス盤はATC機能を持つことになり多数の工具を使い分け、NC中ぐり盤やNCボール盤などの多様な加工機能を1台の機械で実現できる複合作業機械、「マシニングセンタ」（以下MCとする）へと発展した。MCとは基本的にNCフライス盤であるが、3～5軸の制御軸を持ち、高機能のコンピュータと数百本にまで至る工具ホルダを搭載した高機能NC工作機械である。このような多くの加工機能を1台の工作機械に集約するという複合化により、被削材の着脱回数を削減できるようになった。これによって被削材の着脱誤差に起因する精度低下を避けることができるようになったばかりでなく、工程間の仕掛り期間も短縮できるようになった。

三つめは、フレキシブル生産システム（Flexible Manufacturing System, 以下FMSとする）が登場したことである。モーリンス社によって特許出願されたたばこの製造装置の生産システム”System 24”を含め、多くの工作機械メー

カや工作機械ユーザによってNC工作機械のシステム化，無人化を図ったFMSが構築された．FMSはMCなどの多数のNC工作機械をパレット搬送機構などによって物理的に接続するだけでなく，DNC (Direct Numerical Control)などの通信によって制御面でも接続して，1つの生産システムとして構築されたものである．特に投入するワークのグループ化と機械モジュールや工具などの標準化によって，多品種少量生産において従来に比べて経済的に生産システムを構築でき，しかも高い稼働率で運用できるようになった²⁾．すなわち，FMSの登場によって顧客ニーズの多様化による多品種少量生産の要求に柔軟かつ経済的に応えることができるようになったのである．

以上のようにNC化による自動化，ATC機能による複合化，システム化による無人化によって機械加工現場での労働生産性は大きく向上し，これによって多品種少量生産を経済的に行えるようになった．しかしながら，近年の生産環境の激変，顧客ニーズの多様化と製品ライフサイクルの短命化を背景とする多品種少量生産への要求の強まりは，単にMCなどの複合工作機械の導入による製造リードタイムの短縮やFMSの構築による夜間や休日の無人稼働だけでは十分対応できなくなってきた．したがって，稼働時間のうち単位時間あたりの生産性の向上が必要であり，そのような生産を実現するために導入されるMCにもより一層の生産性向上が強く望まれている．生産性とは，導入された機械や繰り返し使用できる治工具の減価償却費や労務費，工場管理費などの固定費に，材料や消耗刃具，補助材料（電力エネルギーや水など製品に付加されないもの）などの変動費を加えた製造コストに対する生産される品物の価値である．このような観点の中でMCの生産性を考える必要がある．

工作機械は本来，ウイルキンソンの中ぐり盤がジェームズワットの蒸気シリンダの加工をするために開発されたことに代表されるように，加工対象とする部品に対して加工精度や生産性が最も良くなるように開発され，発展してきた．それに対してMCは汎用性の追求によって生まれ，かつ生産性の向上という課題を解決するために様々な研究開発がされてきた．特にこれまでトランスファーマシンライン (Transfer machine line, 以下TRとする) やフレキシブル

トランスファーライン (Flexible Transfer Line, 以下FTLとする) などの専用加工ラインで量産を行っている自動車部品の加工分野でも, 汎用MCの柔軟性が着目されており, 導入コストに対する生産性の向上が求められている. 図1.1は, 生産システムの変遷と将来の目標を示している³⁾. 工作機械が電動化された後, 自動車部品の加工分野では当初もっぱら専用機が使用されたが, これが発展したTRとなって大量生産時代を迎えた. その後, 多品種生産の要求に対してモジュラ型FTLによる混流生産へと変化しているものの, FMSほどの柔軟性をもつには至っていない. 一方で汎用目的の工作機械は, NC化, ATC装置の搭載されたMCを経て, FMSへと発展してきた. しかしながらFMSは, MCなど汎用目的のNC工作機械を基本モジュールとして構築された生産システムであるがために, TRやFTLと比較して, 投資額に対する生産量は高くなく, 自動車部品を加工するには十分な経済性を備えていない. したがって, 柔

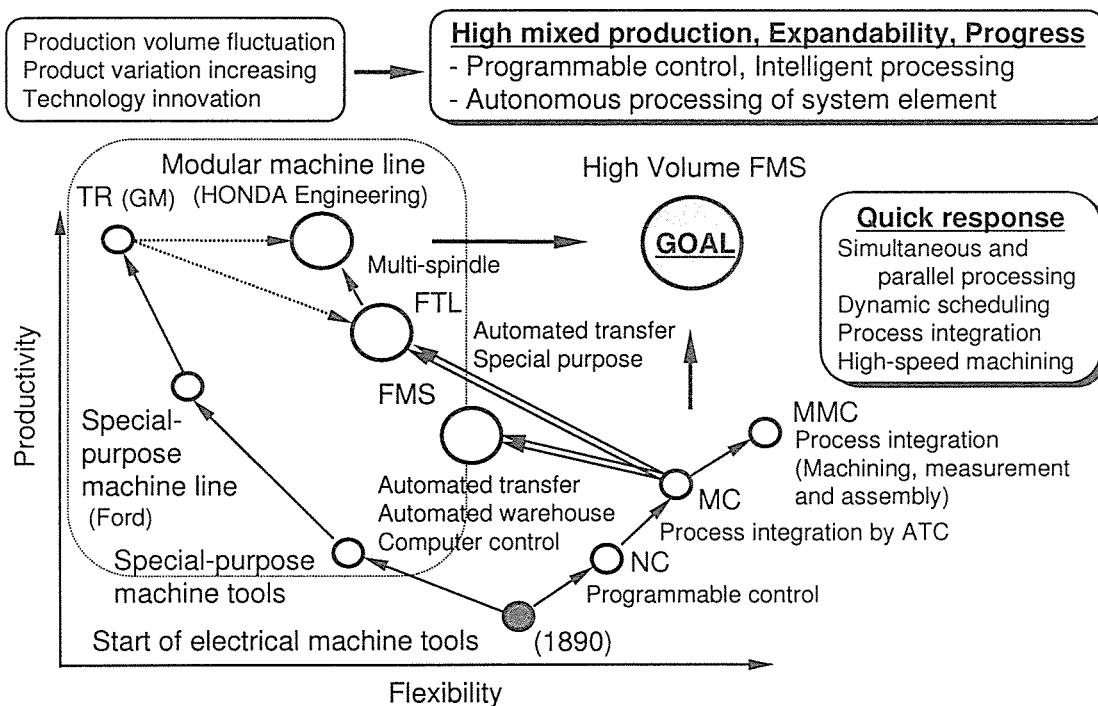


Figure 1.1 Trend and future goal of manufacturing system³⁾

軟性と経済性の両立をめざした生産システムの研究も行われており⁴⁻¹²⁾、今後もMCには複雑で高精度、あるいは非常に手間のかかる付加価値の高い品物を短時間で加工することが求められるのはもちろん、これまでFTLなどの専用機ラインで加工されていたような量産部品をも経済的に加工することが求められるようになってきている。また航空機部品の加工分野では、組立コストの低減をねらった部品の一体化、大型化によって加工時間が長くなる傾向があり、金型の加工分野でも、納期短縮、コストダウンを図るために、MCによる加工時間の短縮が大いに期待されている。しかしながら近年の顧客ニーズは価格上昇を伴うことなく付加価値の高いものを求める傾向にあり、筆者が勤務する工作機械メーカーであるヤマザキマザック株式会社においても同様のことが求められている。そこで、工作機械メーカーにおいてはMCの生産性向上をめざして、次の各項目について改良が図られることになる。

- (1) 主軸や送り駆動系、ATC装置などの高速化：機械の動作速度を向上させることで、その加工能率に対する効果は直接的であるが、機械価格の高騰を招く恐れがあり、生産性向上への効果は良く吟味するべきである。
- (2) 位置決め精度や補間精度の向上、熱変位の低減などの高精度化：生産品の精度向上により付加価値を高めることで生産性向上をめざすものであるが、やはり機械価格の上昇に注意することが必要である。
- (3) 生産リードタイム短縮のための加工機能の複合化：1台の工作機械で複数の加工工程を可能にするもので、MCを始め、ミーリング機能をもつNC旋盤「ターニングセンタ」や研削機能をもつMC「グラインディングセンタ」などの開発につながった。
- (4) 段取り時間短縮のための操作性の向上：対話型プログラミング機能や机上計測機能、接近性の改善などによって段取り時間など設備の非稼働時間を短縮するためのもので、生産現場での生産性向上に効果がある。
- (5) 自動化、無人化による稼働時間延長のためのシステム化：直接的には原価償却費と労務費との削減に効果があるが、さらに積極的に活用することで生産の無駄をなくすることができる。

- (6) 構成部品やユニットの標準化や保守性の改善による信頼性の向上：故障や定期点検の際の停止時間を極力圧縮することで稼働率の向上に寄与する。そのためには、工作機械メーカーでは標準化や保守性をよく考慮した機械設計と評価が行われるとともに、補修部品を迅速に顧客へ配送できるシステムの構築などが整備される必要がある。また標準化は、顧客の多様な要求に応えつつ生産する品種をいたずらに増やすことなく経済的な生産を行い、製品を妥当な価格で顧客に提供するためにも必要なことである。
- (7) ドライ加工，省エネルギー化，リサイクルなどによる環境への配慮：ドライ加工あるいはセミドライ加工によって切削水やその供給装置を不要にすることや高速加工によってサイクルタイムを短縮して被削材1個当たりの消費エネルギーを低減すること，工作機械部品のリサイクルなど，の研究開発がなされるようになっている。これらは単に環境への配慮ばかりでなく結果的に経済性の向上に寄与することになるので，今後の展開が注目される¹³⁾。

このように「MCの生産性向上」と一口に言っても，その内容は多岐に渡っており，そのすべてをここで取り上げることはできない。そこで本研究では，これらのうち(a)の”高速化”に着目し，主軸の最高回転数や最大送り速度の向上，ATC装置などの動作時間の短縮を実現してMCの加工能率を高めることによる生産性向上をめざす。近年の工作機械の開発状況を見ると，高速化は大きなテーマではあるが，生産性の向上効果が予め十分に検証されることなく，いたずらに高速仕様をねらったMCの開発が行われる傾向にあると感じられる。しかしながら上述のように，高速化は機械本体の価格上昇などの生産性低下要因も持っていることにも注意を払う必要がある。そこでこのような背景から本研究ではMCの”高速化”について考察し，真に生産性が高くかつ経済的なMCの開発を試みる。

MCはNCプログラムに従って，実際に切屑を排出する切削送り動作をはじめ，各軸の位置決めや割出，主軸の起動停止，工具交換，切削水の供給停止など，多様で複雑な動作を順次あるいは同時に自動的に実行する。1個の部品

を加工する際に要するこれらの動作時間を合計したものがサイクルタイムとなるが、MCの生産性向上にはすべての動作時間がバランス良く短縮されることが望ましい¹⁴⁾。一般にサイクルタイムに占める切削時間の割合は大きく、この短縮のために高速切削が有効と考えられている。図1.2には工具と切削速度の変遷を示す¹⁵⁻¹⁷⁾。19世紀の間は、工具の開発はゆっくりしたものであり、ほとんど切削速度の上昇が見られないが、今世紀になってからハイスをはじめとして、超合金やこれらへの種々のコーティング技術が開発され、鋼の切削速度は大きく向上した。またCBN焼結体の開発によって鋳鉄の切削速

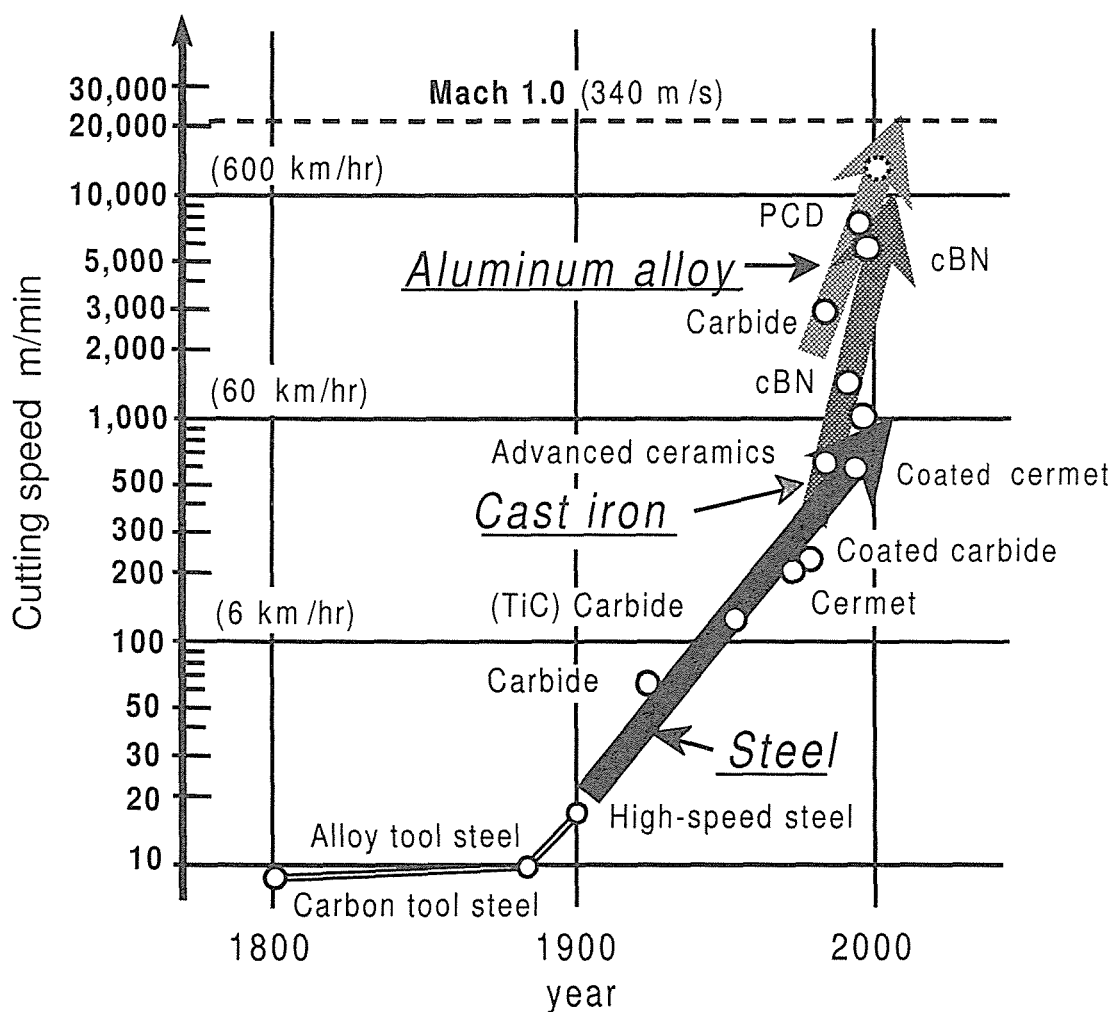


Figure 1.2 Trend of cutting speed and tool material¹⁵⁻²⁰⁾

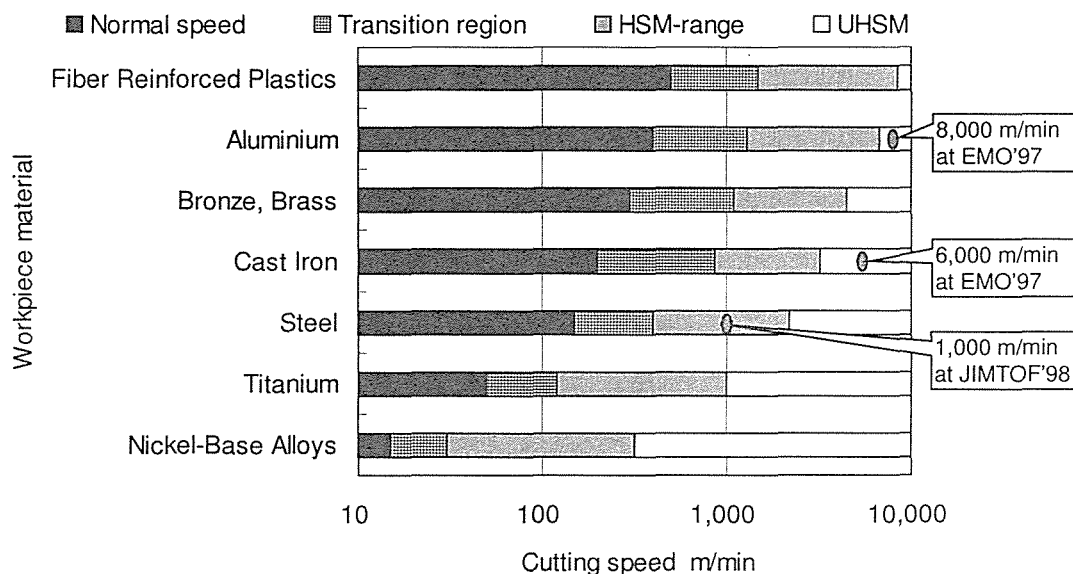


Figure 1.3 Definition of high-speed cutting ²¹⁾

度も著しく向上した。アルミニウム合金に対しては焼結ダイヤモンド（以下 PCD: Poli-Crestal Diamond とする）の合成に成功するとともに切削速度は革命的に向上した¹⁸⁻²⁰⁾。図 1.3 は最近定義された高速切削の領域を示す²¹⁾。右側の注記は、ヤマザキマザックが最近の国際工作機械見本市で行ったフライス加工の切削速度である。例えばアルミニウム合金の切削では、400 m/min 以下が従来の切削速度領域とされ、1,300 m/min を越えると高速切削領域、さらに 6,700 m/min を越えると超高速切削領域と定義されている。鋳鉄については 200 m/min 以下が従来の切削速度領域であり、870 m/min 以上を高速切削領域、3,200 m/min 以上を超高速切削領域と定義されている。鋼についても 150 m/min 以下を従来の切削速度領域、400 m/min を越えると高速切削領域、2,200 m/min 以上を超高速切削領域と定義されている。高速切削を可能にするための課題として、図 1.4 に示すような開発課題が考えられる。この中で本研究のテーマである工作機械の高速化に関連した課題を例示すると、主軸の高速化をめざして軸受および潤滑方式の開発^{22, 23)}などが行われている。また位置決め時間の短縮には送り駆動系の高速化、高加減速化が必要であり、リニ

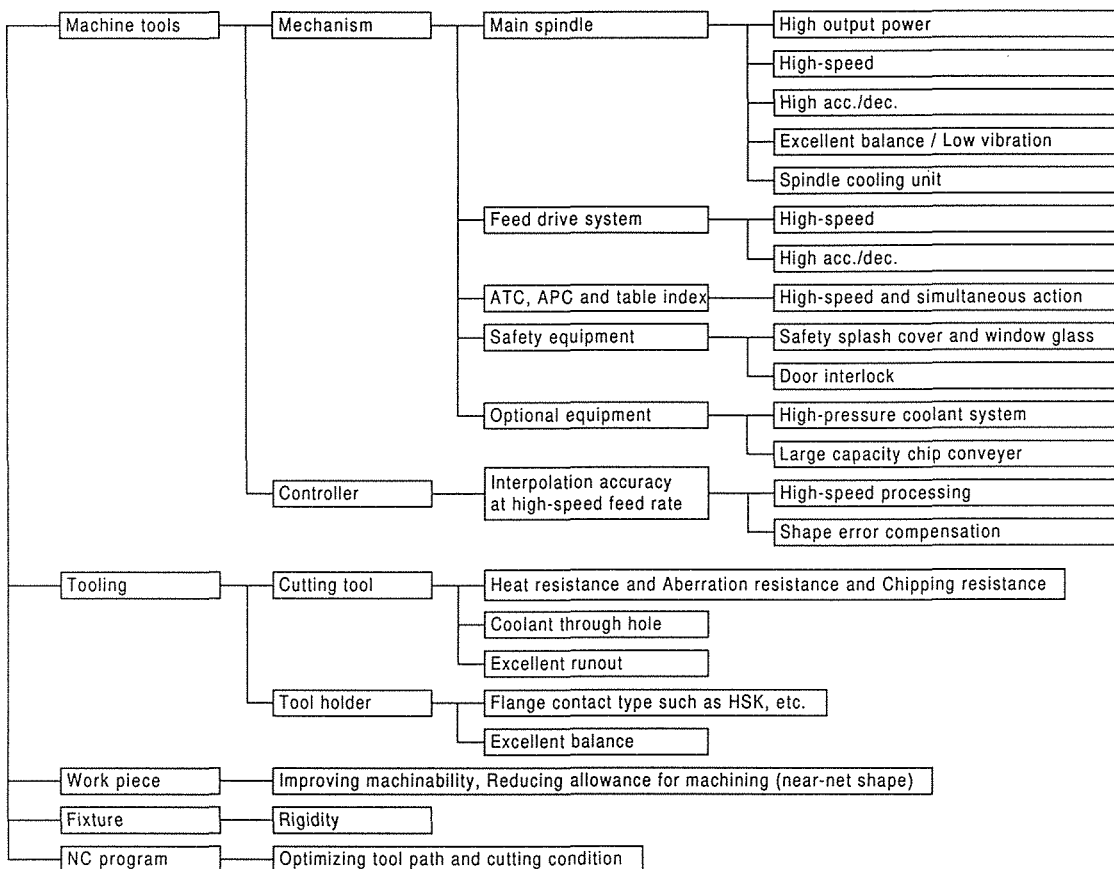


Figure 1.4 Subject for high-speed cutting

アサーボモータあるいはハイリードボールねじ（リードの大きなボールねじ）と低慣性サーボモータの組み合わせが有効であると考えられている^{24, 25}。一方で補間精度を低下させることなく切削送り速度の高速化を可能にするために、デジタルフィードフォワード制御を適用した高速高精度NC装置が開発されている²⁶。

図 1.5 にはヤマザキマザックにおける BT#40 相当のテーパを有するマシンニングセンタの主軸最高回転数の変遷を示す。20 年前には高々 4,000 rpm であった最高回転数は、今や 30,000 rpm にも達し、約 7 倍の高速化がなされている。また図 1.6 には送り駆動系の最大送り速度の向上を示す。当初 12 m/min であったものが現在最も速い機種では 90 m/min となっており、7 倍以上の高速化が達成

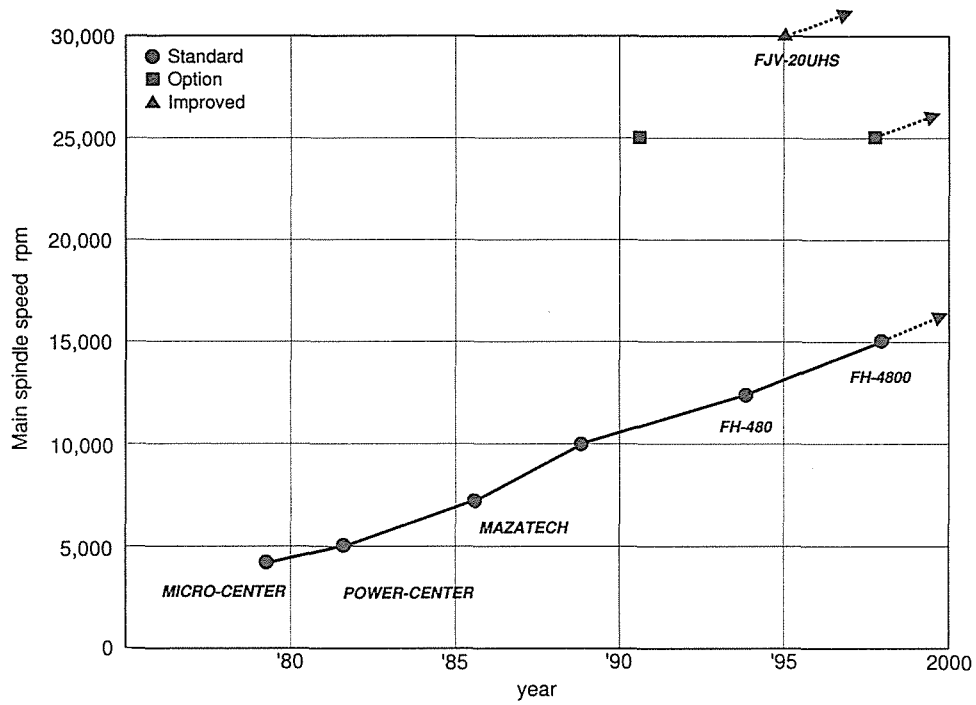


Figure 1.5 Trend of main spindle speed

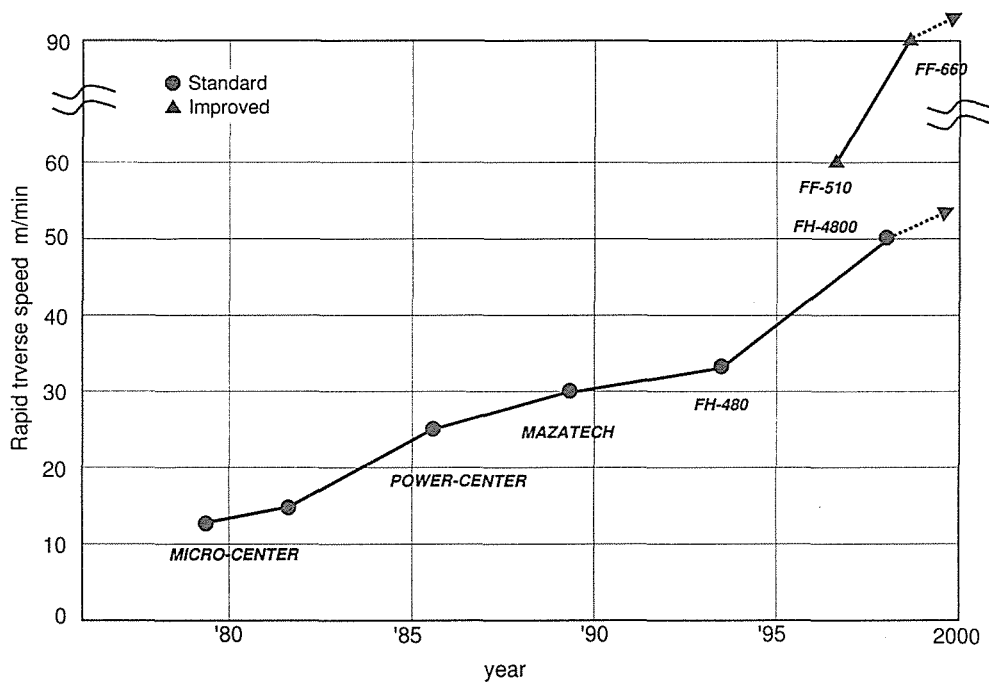


Figure 1.6 Trend of rapid traverse speed

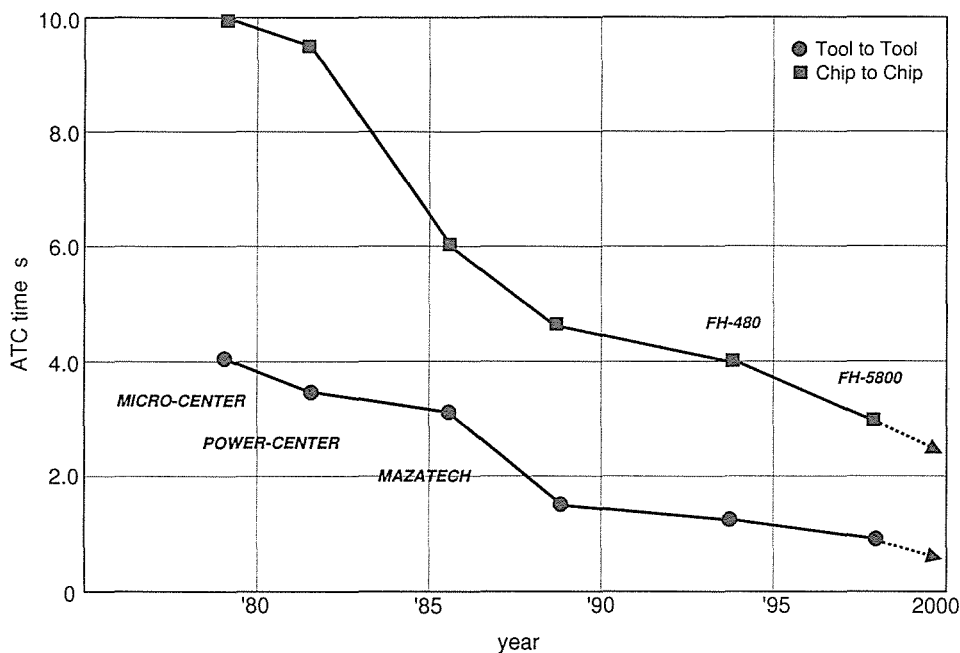


Figure 1.7 Trend of ATC time

されている，さらに図 1.7 には ATC 時間の短縮の経過を示す．ここで，”Tool to Tool”（以下 T-T とする）とは主軸とマガジン間の工具交換動作だけに要する時間で，”Chip to Chip”（以下 C-C とする）とは，工具を交換するために付随する位置決めや主軸の起動停止，工具マガジンのドアの開閉など一連の動作に要する時間を含むものである．T-T 時間は，当初 4 s であったものが今や 1 s 以下となっており，C-C 時間は当初 10 s であったものが 3 s 以下に短縮され，いずれも 3 倍以上の高速化が図られている．

図 1.8~1.10 にはヤマザキマザックが過去 5 年間の国際工作機械見本市 (IMTS, EMO, JIMTOF) で行ったアルミニウム合金，ねずみ鋳鉄および炭素鋼それぞれに対するフェイスミル加工，エンドミル加工，ドリル加工，タップ加工，ボーリング加工の切削速度を示す．切削速度は年々向上しており，アルミニウム合金のフェイスミル加工は 8,000 m/min に，ねずみ鋳鉄のものは 6,000 m/min に，炭素鋼のものは 1,000 m/min に達している，以上に述べた高速切削技術は

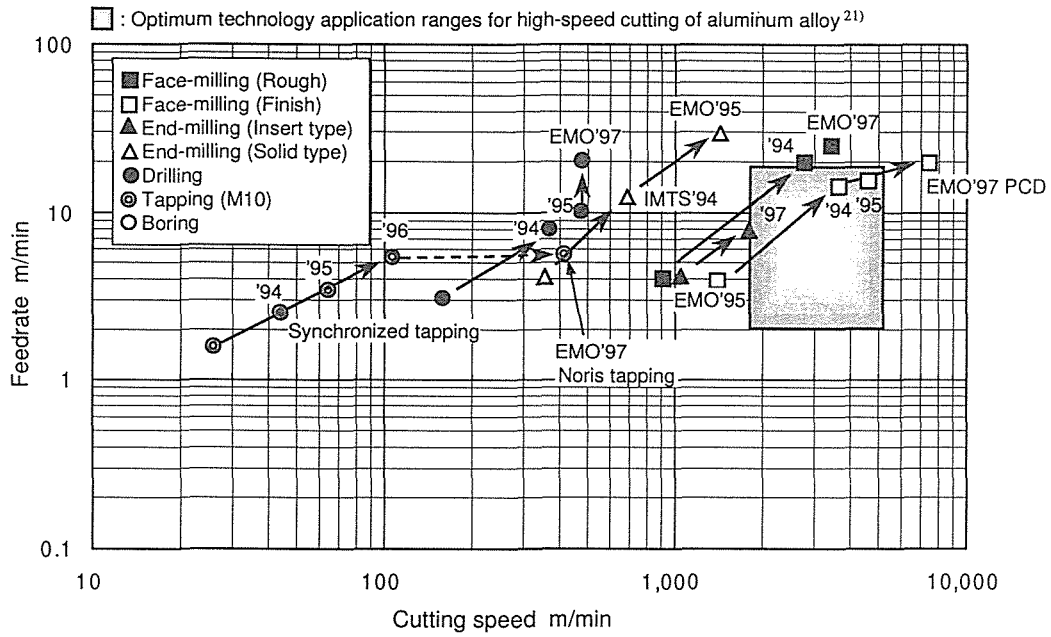


Figure 1.8 Trend of high-speed cutting of aluminum alloy

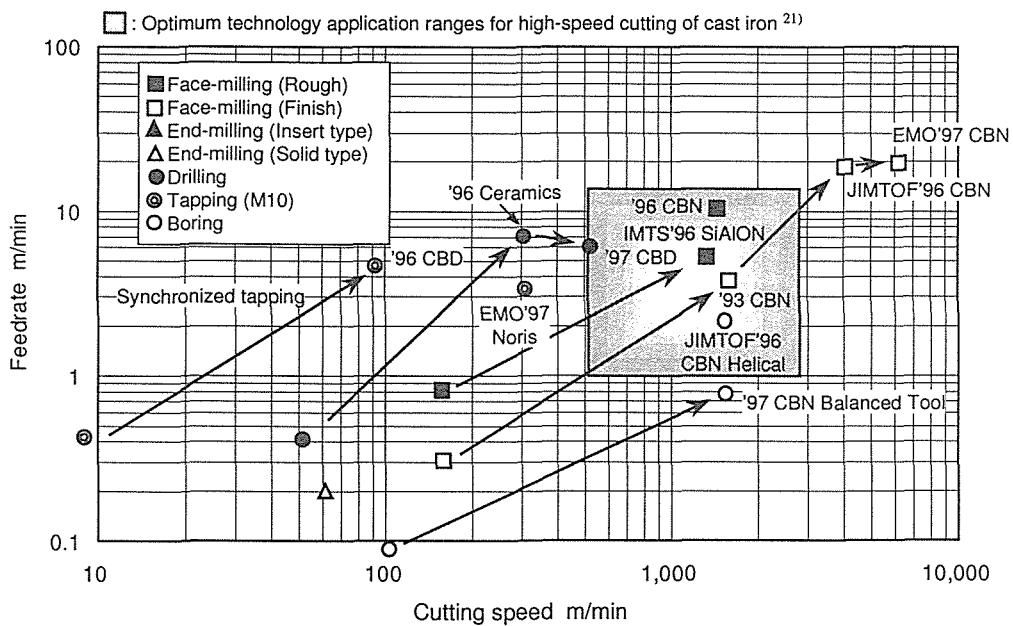


Figure 1.9 Trend of high-speed cutting of cast iron

述べる。このシミュレータは本研究における基本ツールであり、工作機械設計における初期段階である機械仕様の選定時に使用できることを目的としていることより、最新のNCの機能をほぼ忠実に再現でき、シミュレーション精度の高いことが必要である。そこで第2章の後半では、このシミュレータを用いて航空機部品、自動車部品、工作機械部品の加工について各動作時間を予測し、実機による実測時間との比較を行ってサイクルタイムシミュレータの精度を評価した。

次に第3章においては第2章で開発したシミュレータを用いて加工実績のある航空機部品、自動車部品、工作機械部品についてMCの機械仕様の変更と動作時間の関係を解析した。解析した主な機械仕様は、主軸の最高回転数と起動停止時間、送り駆動系の最大送り速度と加速度、ATCの動作時間などである。このような機械仕様の変更と切削条件の向上による、サイクルタイムに占める切削時間、位置決め時間、主軸の起動停止時間、ATC時間などの割合の変化をシミュレーションで求めた。

第4章と第5章では第3章で行われたサイクルタイム分析の結果を踏まえ、実用可能な技術とそのコストを考慮して生産性が向上すると考えられる機械仕様を立案し、これに基づくMCの試作について述べる。第4章においては航空機部品を加工対象とし、高速切削を適用することによる切削時間の短縮をめざして行った、Y軸ストローク410 mm、主軸の最高回転数30,000 rpm、主軸モータの最大出力54 kW、送り駆動系の最大送り速度60 m/min、最大加速度10 m/s²、ATC時間(T-T)4 sの立形MCの試作について述べる。このMCを用いて実際に航空機部品を加工してサイクルタイムを測定し、従来のMCによる場合と比較することで開発したMCの生産性を考察した。

第5章においては自動車部品を加工対象とし、高速切削の適用による切削時間の短縮だけでなく位置決め時間や工具交換時間などの非切削時間の短縮もめざして行った、パレットサイズ□400 mm、主軸の最高回転数15,000 rpm、主軸モータの最大出力18 kW、送り駆動系の最大送り速度60 m/min、最大加速度10 m/s²そしてATC時間(T-T)1.3 sの横形MCの試作について述べる。こ

のMCを用いて実際に自動車部品を加工してサイクルタイムを従来のMCによる場合と比較し、生産性を考察した。

これら4章と5章における実際の開発をとおして2章で開発されたシミュレータがMCの設計、開発に際して有効なツールであることを示すことができた。

第6章においては、第4章と第5章で試作されたMCを含めた最新のMCによる高速加工の到達点を把握するために、代表的な工業材料であるアルミニウム合金、ねずみ鋳鉄、炭素鋼についてフェイスミル加工、エンドミル加工、ドリル加工、タップ加工、ボーリング加工を行った結果を述べる。これらの加工をとおして超高速切削領域をめざした高速加工に挑戦するとともに、次世代MCおよび周辺技術の研究開発における課題についても考察した。

最後に第7章において本研究を総括した。

高能率MCの開発について本研究で提案したシミュレーション技術を組み合わせた手法を採用することで、対象とする加工部品の加工技術に応じた機械仕様を効果的に選定することができるばかりでなく、将来は主軸や送り駆動系、ATC装置などごとに加工分野に適した仕様をもつユニットのみを新たに開発して、あらかじめ用意されたベースとなるMCと組み合わせることも考えられる。したがって本研究はユニットの組み合わせの変更で複数の対象加工分野に適した仕様をもつモジュール設計思想にもつながる可能性も持っている。

第2章 マシニングセンタの設計支援を目的としたシミュレーションシステムの開発

2.1 緒言

マシニングセンタ (MC) は数値制御 (NC) プログラムに従って、実際に切屑を排出する切削送り動作をはじめ、各軸の位置決めや割り出し、主軸の起動や停止、工具やパレットの自動交換、その他切削水の供給や停止など、多様で複雑な動作を順次あるいは同時に実行する。そして、ある部品を加工する際に要するこれらの動作時間を合計したものがサイクルタイムと呼ばれている。生産性の高い MC の条件の一つは、部品加工のサイクルタイムが短いことで、そのためには機構の”高速化”が必要となる。生産性の高い MC の開発において具体的に高速化されるべき主な機械仕様は、主軸の最高回転数や各駆動軸の最大送り速度、そして自動工具交換機構やパレット交換機構の動作速度などであるが、このような仕様的高速化を実現するには、次のような新技術の開発、導入が必要である。

- (1) 主軸の高速化をめざしたセラミックボールを使用した転がり軸受、オイルアンドエア潤滑あるいはジェット潤滑など潤滑方式の開発改良など
- (2) 送り駆動系的高速化、高加減速化を図るためのリニアサーボモータあるいはハイリードボールねじ（リードの大きなボールねじ）と低慣性サーボモータの採用など
- (3) 送り駆動系的高速化にともなう加工精度の低下を防ぐためのハイゲイン制御やフィードフォワード制御の適用など

(4) 工具交換装置やパレット交換装置を高速化するためのカム機構の改良や油圧駆動から簡易サーボ制御への転換など

一方では材料技術や素形材技術の進歩によって被削材の取り代は小さくかつ均質になっていることも見逃せない。また工具技術の発展によって切削速度は年々向上していることもMCの開発において考慮されるべき事項である。

以上に述べた新技術はいずれもMCの生産性向上に寄与するものと考えられ、設計時にそのMCの製造コストを勘案しながらこれら新技術の採否を決定することが望ましい。しかしこれまでは、実際にMCを試作して部品加工を行ってサイクルタイムを測定するか、おおよその加工条件、位置決め距離などを想定して機械仕様からサイクルタイムなどを見積もる以外に、これら新技術の採用による効果を検証する方法はなかった。その結果、ややもすると必要以上の高速化をめざした新技術を採用し、MCの価格上昇を招くケースが見られたように思われる。またMCが対象とする加工部品は自動車部品、航空機部品、産業機械部品、金型などに大別され、それぞれに加工から見た特徴がある。したがってMCには“汎用性”が求められるものの、対象とする産業分野ごとに最適な機械仕様は異なると考えられる。生産財であるMCにはコストパフォーマンス、すなわち“適正な”価格が今後ますます要求されることを考えると、開発すべきMCの使用目的をより明確にして、その目的にあった新技術が厳選して採用されなければならない。したがって、設計段階において機械仕様の変更がサイクルタイムに及ぼす効果を正確に予測することが重要であると考えられる。

最近、実加工とほとんど同じ状況をコンピュータにより再現するミュレーション技術を用いて、NCプログラムを解析してプログラムの良否をNC旋盤やMCの機械性能を考慮して検証しようとする研究が発表されている^{27, 28)}。このようなシミュレーション技術を使用してMCの設計を行えば、対象加工分野に適した機械仕様を有するMCを、より短い開発リードタイムで開発することが可能になると期待される。そこで本章では、NCプログラムを解析してMCの機械仕様に従った切削動作や位置決め動作などの各動作ごとの所要時間

を積算できることを目的として開発したサイクルタイムシミュレータについて述べる^{29, 30)}。ここで開発したシミュレータの特徴は、現実には存在しないMCを用いた加工のサイクルタイムを設計段階において正しく知る必要があることから、高速動作における加減速時間を正確に算出できること、そして複数動作の同時実行や高精度補間など、最新のNC装置が備えている機能を忠実に再現できることなど、従来発表されているこの種のシミュレータにはない機能を備えている点である。

2.2 設計支援サイクルタイムシミュレータの機能と構成

開発したシミュレータは、MCの設計段階で機械仕様選定に使用する設計支援ツールとすることに主眼を置いて、サイクルタイムを「切削時間」、「位置決め時間」、「自動工具交換時間」、「Mコード処理時間」に分類して出力するよう設計されており、NCプログラムの読み込み部、G、M、S、Tなど各種コードが表す動作の認識部、動作時間の算出部、結果の出力部とからなる。ここでMコード処理時間とは、主軸の起動停止や工具交換に関連するMコードを除いたMコードなどの処理時間であり、例えば切削液のオン、オフや加工パレットの割出時間や交換時間あるいはシーケンサのスキャンタイムに依存して生ずる無駄時間など制御装置の内部処理時間が含まれる。このシミュレータのソースプログラムの記述には、NCプログラムの読み込み部にYACC (Yet Another Compiler Compiler) を、その他の部分にはC言語を用いている (YACCはASICなど特殊なICの駆動ソフトウェアをC言語などの高級言語で記述しようとする場合にその構文を定義するために用いられるものであるが、ここではこの機能を利用してNCプログラムの各種コードに対する演算処理手順を記述した)。このシミュレータを用いたサイクルタイム分析に基づいた設計支援システムの手順を図2.1に示す。まず主軸の最高回転数、出力特性、起動停止時間、送り駆動系各軸の最大送り速度および加速度、自動工具交換時

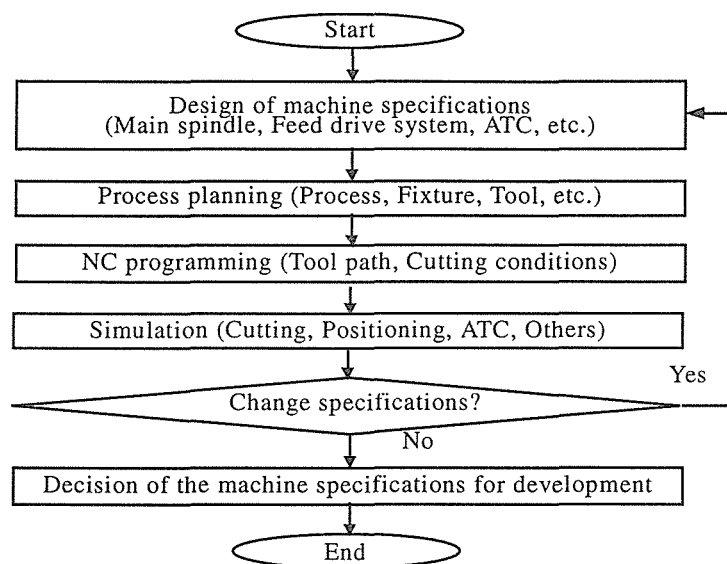


Figure 2.1 Flow chart of cycle time analysing system

間、制御装置の性能など、MCの主要な機械仕様を選定する。機械仕様の例を表2.1に示す。次に加工対象とする部品について工程設計を行う。ここでは必要な治工具を想定して加工順序を決定するとともに、あらかじめ実行加工可能であると検証された切削条件や工具軌跡、主軸の出力特性や送り駆動系の推力に対する加工負荷の大きさ、素材や治工具の剛性などを考慮しながら切削条件を決める。さらに次のステップとして、NCプログラムをEIA/ISOコードのテキストファイル形式で作成する。以上のステップで得られた情報はサイクルタイムシミュレータに送られる。図2.2はシミュレータでのサイクルタイム算出手順を示す。シミュレータは選定された機械仕様のもとで、作成されたNCプログラムを1ブロック毎に逐次解析して各種動作を認識し、切削時間、位置決め時間、主軸制御時間、自動工具交換時間、Mコード等の制御装置の内部処理時間に分類して積算する。全NCプログラムの解析が完了すると各動作毎の所要動作時間および全動作時間すなわちサイクルタイムを出力する。このようにして一つの機械仕様に対するサイクルタイムが算出されれば図2.1の判定ステップに進む。ここで機械仕様の変更が必要と判断される場合

Table 2.1 Input parameters of specifications for cycle time simulator

Parameter	Value
Non block time (ms)	0
Creep feedrate (mm/min)	15000
Rapid traverse rate of X axis (mm/min)	30000
Rapid traverse rate of Y axis (mm/min)	30000
Rapid traverse rate of Z axis (mm/min)	18000
Rapid traverse rate of 4th. axis (deg./min)	0
Processing time of M code (ms)	10
Processing time of S code (ms)	10
Processing time of T code (ms)	10
Rapid traverse rate of B axis (deg/min)	3600
Maximum speed of main spindle (rpm)	12000
Acc./dec. time of main spindle (ms)	1700
Spindle orient time (ms)	500
1st. reference point X (mm)	280
1st. reference point Y (mm)	350
1st. reference point Z (mm)	350
1st. reference point 4 (mm)	0
2nd. reference point X (mm)	-280
2nd. reference point Y (mm)	0
2nd. reference point Z (mm)	0
2nd. reference point 4 (mm)	0
3rd. reference point X (mm)	0
3rd. reference point Y (mm)	0
3rd. reference point Z (mm)	0
3rd. reference point 4 (mm)	0
4th. reference point X (mm)	0
4th. reference point Y (mm)	0
4th. reference point Z (mm)	0
4th. reference point 4 (mm)	0
Feedrate for calculation of acc. (mm/min)	18000
Linear acc./dec. time (ms)	85
ATC time (ms)	7000
M code processing (0 : simultaneous / 1 : in order)	0
Resolution for distance histogram of G00 (mm)	10
Resolution for distance histogram of G01 (mm)	10
Position loop gain (1/s)	33
Coefficient of feed forward (%)	90
Permitted error of circular interpolation radius (μ m)	100
Degree of reducing feed rate at corner (deg)	5
END	0

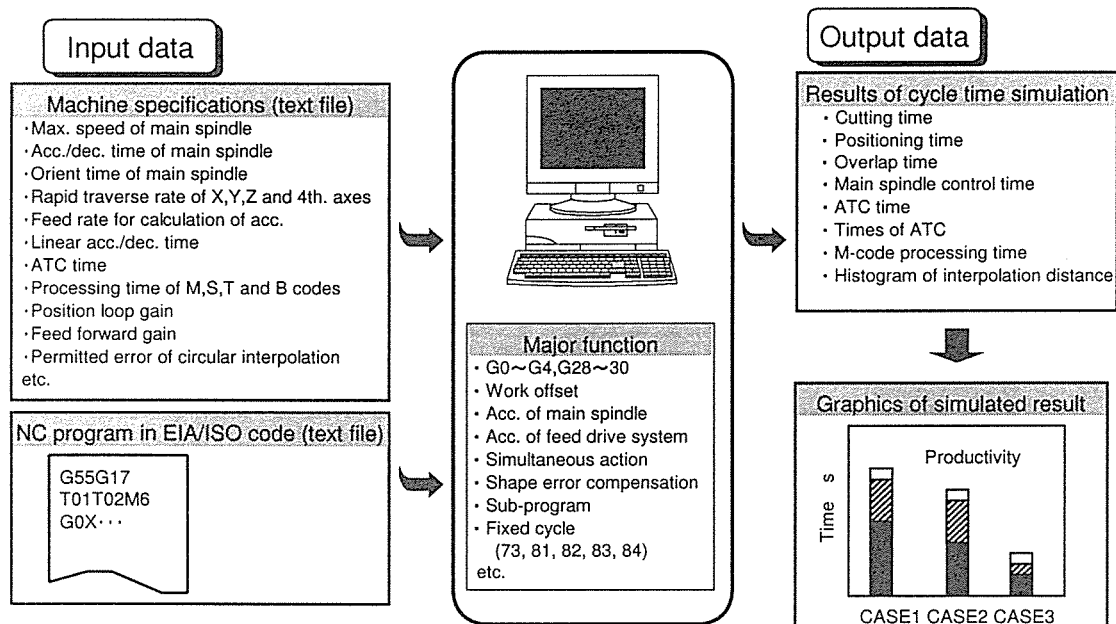


Figure 2.2 Process in cycle time simulator

には機械仕様選定のステップにもどり、主軸の最高回転数など機械仕様の一部を変更して再びサイクルタイムの算出を行う。このようにして機械仕様の変更がサイクルタイムの増減に及ぼす効果が、実機を試作して実加工により確認することなく示されるので、目的に適した機械仕様を短期間で正確に選定し、生産性の高いMCを設計することができる。

2.3 サイクルタイムの算出方法

ここでは開発したシミュレータにおけるサイクルタイムの算出方法を示す。一般的にNC工作機械の加工プログラムはNCプログラムと呼ばれ、表2.2に示すコードで記述される³¹⁾。これらのコードのバイナリ形式はEIA規格とISO規格でそれぞれ規定されているので”EIA/ISOコード”とも呼ばれる。主なGコードとMコードを表2.3、表2.4にそれぞれ示す³¹⁾。表2.3に示すGコードによって、直線補間や円弧補間などの切削送り動作、位置決めや原点復帰などの早送り動作、ドウェルなどの各種動作を指令することができる。また表2.4に

Table 2.2 Command of NC

Command	Name
G	G code (mode)
X, Y, Z, A, B, C,	Axis
F	Feed rate
S	Spindle speed
T	Tool No.
M	M code
N	Sequence No,
0 ~ 9, .	Numerical value
(,)	Comment
#, +, -, *, /, =, [,]	Macro code
;	End of block

示すMコードによって、工具やパレットの交換、切削液の供給や停止、主軸の起動、停止やオリエントなどシーケンサ (PLC: Programmable Logic Controller) を介して行う制御動作を指令することができる。ただし、本研究で開発したシミュレータは、Gコードのうち使用頻度の少ないものやMCの設計段階において考慮する必要のないものを除いて表2.5に示すものを認識できるようにした。NCプログラムは、”;” (End Of BlockまたはEOB) で区切られた複数のブロックからなる。同一ブロック中に複数の動作指令が記述されている場合には、NC装置はそれらの動作を同時に実行し、それら全てが完了すれば次のブロックの処理に移るというように1ブロック毎に逐次処理していく。したがって n 個のブロックからなるNCプログラムを実行する際のサイクルタイムは、各ブロック毎に指令された動作を完了するのに要する時間の総和として求めることができるので、式(2.1)のように表すことができる。

$$t_A = \sum_{i=1}^n t_i \quad (2.1)$$

ここで、 t_A はサイクルタイム、 t_i は i 番目のブロックの実行時間である。

NCプログラムにより指令される種々の動作のうち、例えば切削送り動作、早送り動作およびドウェル（状態保持動作）は、モーダル指令であるので同一

Table 2.3 G-code

G-code	Function	G-code	Function
0	Positioning	49	Tool length offset cancel
1	Linear interpolation	50	Scaling cancel
2	Circular interpolation CW	51	Scaling
3	Circular interpolation CCW	50.1	Mirror image cancel
2.1	Spiral interpolation CW	51.1	Mirror image
3.1	Spiral interpolation CCW	52	Local coordinate system setting
4	Dwell	53	Machine coordinate system selection
5	High-speed machining mode	54	Workpiece coordinate system 1 selection
6	-	55	Workpiece coordinate system 2 selection
6.1	Spline interpolation (fine spline function)	56	Workpiece coordinate system 3 selection
6.2	NURBS interpolation	57	Workpiece coordinate system 4 selection
7	Virtual-axis interpolation	58	Workpiece coordinate system 5 selection
8	-	59	Workpiece coordinate system 6 selection
9	Exact-stop check	60	Uni-directional positioning
10	Programmed parameter input	61	Exact-stop check mode
11	-	61.1	Shape correction mode
12	-	62	Automatic corner override
13	-	63	Tapping mode
14	-	64	Cutting mode
15	-	65	User macro simple call
16	-	66	User macro modal call A
17	Plane selection X-Y	66.1	User macro modal call B
18	Plane selection Z-X	67	User macro modal call cancel
19	Plane selection Y-Z	68	Programmed coordinates rotation
20	Inch command	69	Programmed coordinates rotation cancel
21	Metric command	70	-
22	Pre-move stroke check	71.1	Fixed cycle (chamfering cutter 1)
23	Pre-move stroke check cancel	72.1	Fixed cycle (chamfering cutter 2)
24	-	73	Fixed cycle (high-speed deep-hole drilling)
25	-	74	Fixed cycle (reverse tapping)
26	-	75	Fixed cycle (boring)
27	Reference point check	76	Fixed cycle (boring)
28	Reference point return	77	Fixed cycle (back spot facing)
29	Starting point return	78	Fixed cycle (boring)
30	No. 2 through 4 reference point return	79	Fixed cycle (boring)
31	Skip	80	Fixed cycle cancel
31.1	Multi-step skip 1	81	Fixed cycle (spot drilling)
31.2	Multi-step skip 2	82	Fixed cycle (counter boring)
31.3	Multi-step skip 3	83	Fixed cycle (deep-hole drilling)
32	-	84	Fixed cycle (tapping)
33	Threading	84.2	Fixed cycle (synchr. tapping)
34	-	84.3	Fixed cycle (synchr. reverse tapping)
35	-	85	Fixed cycle (reaming)
36	-	86	Fixed cycle (boring)
37	Automatic tool length measurement	87	Fixed cycle (back boring)
38	Tool diameter offset vector selection	88	Fixed cycle (boring)
39	Tool diameter offset corner arc	89	Fixed cycle (boring)
40	Tool diameter offset cancel	90	Absolute data input
40.1	Shaping cancel	91	Incremental data input
41	Tool diameter offset to the left	92	Coordinate system setting
41.1	Shaping to the left	92.5	Workpiece coordinate system rotation
42	Tool diameter offset to the right	93	Inverse time feed
42.1	Shaping to the right	94	Asynchronous feed (feed per minute)
43	Tool length offset (+)	95	Synchronous feed (feed per revolution)
44	Tool length offset (-)	96	-
45	Tool position offset (extension)	97	-
46	Tool position offset (reduction)	98	Initial point level return in fixed cycle
47	Tool position offset (double extension)	99	R-point level return in fixed cycle
48	Tool position offset (double reduction)	01~255	User macro G-code call (max. 10 codes)

Table 2.4 M-code

M-code	Function	M-code	Function
0	Programmed stop	45	External command of M-code 5
1	Optional stop	48	Spindle speed and feedrate correction valid
2	End of program (EIA/ISO)	49	Spindle speed and feedrate correction invalid
3	Revolution of spindle (normal)	50	Air blast
4	Revolution of spindle (reverse)	51	Spindle-through coolant
5	Spindle stop	52	Tapping coolant
6	Changing of tool (EIA/ISO)	58	Check of tool life for spare-tool management
7	Mist coolant	64	Pallet door closed
8	Liquid coolant	65	Pallet door opened
9	Stop all coolant and compressed air	68	Clamping of pallet
10	Clamping of tool in the spindle	69	Unclamping of pallet
11	Unclamping of tool in the spindle	71	Selection of pallet No. 1
15	Magazine cover closed	72	Selection of pallet No. 2
16	Magazine cover opened	73	Selection of pallet No. 3
19	Orientation of spindle	74	Selection of pallet No. 4
23	Error detection valid	75	Selection of pallet No. 5
24	Error detection invalid	76	Selection of pallet No. 6
30	End of program and rewinding of tape (EIA/ISO)	90	Cancellation of mirror image (MAZATROL)
33	Tool length measurement unit advanced	91	Mirror image WPC-X valid (MAZATROL)
34	Tool length measurement unit retracted	92	Mirror image WPC-Y valid (MAZATROL)
35	Detection of tool breakage	93	Mirror image WPC-4 valid (MAZATROL)
36	Selection of spindle speed range (Low)	98	Call-up of subprogram (EIA/ISO)
37	Selection of spindle speed range (Low/Medium low)	99	End of subprogram (EIA/ISO)
38	Selection of spindle speed range (Low/Medium/Medium high)	100	External command of M-code 1
39	Selection of spindle speed range (High)	101	External command of M-code 2
40	Selection of spindle speed range (Neutral)	122	Gap eliminator valid
42	Reverse rotation of indexing table	123	Gap eliminator invalid
43	External command of M-code 3	130	Niagara coolant
44	External command of M-code 4	132	Spindle-through air blast

ブロックで指令されることはありえない。それに対して、最近のMCではサイクルタイムの短縮を図るために、主軸の起動と位置決めや工具交換とパレット交換など複数の動作を同一ブロックで指令することによりこれらの動作を同時に行うことができるようになっている³¹⁾。このような同時動作を考慮すると、NCプログラムの*i*番目のブロックを実行するのに必要な時間 t_i は、そのブロックで処理される動作時間のうちで最長の動作時間になる。そこで、 $a \geq b$ のとき $Max(a, b) = a$ という関数を使用して、式(2.2)で表すことができる。

$$t_i = Max(t_{Ci}, t_{Pi}, t_{Si}, t_{Ti}, t_{Mi}, t_{Di}) \quad (2.2)$$

ここで、 t_{Ci} は切削送りの動作による切削時間、 t_{Pi} は早送り動作による位置決め時間、 t_{Si} は主軸の起動停止時間、 t_{Ti} は工具交換時間、 t_{Mi} は主軸の起動停止

Table 2.5 G-code considered in cycle time simulation

G-code	Function
G00	Positioning
G01	Linear interpolation
G02	Circular interpolation CW
G03	Circular interpolation CCW
G04	Dwell
G17	Plane selection X-Y
G18	Plane selection Z-X
G19	Plane selection Y-Z
G20	Inch command
G21	Metric command
G28	Reference point return
G29	Starting point return
G30	No.2 through 4 reference point return
G52	Local coordinate system setting
G53	Machine coordinate system selection
G54	Workpiece coordinate system 1 selection
G55	Workpiece coordinate system 2 selection
G56	Workpiece coordinate system 3 selection
G57	Workpiece coordinate system 4 selection
G58	Workpiece coordinate system 5 selection
G59	Workpiece coordinate system 6 selection
G73	Fixed cycle (high-speed deep-hole drilling)
G80	Fixed cycle cancel
G81	Fixed cycle (spot drilling)
G82	Fixed cycle (counter boring)
G83	Fixed cycle (deep-hole drilling)
G84	Fixed cycle (tapping)
G85	Fixed cycle (reaming)
G90	Absolute data input
G91	Incremental data input
G92	Coordinate system setting
G94	Asynchronous feed (feed per minute)
G95	Synchronous feed (feed per revolution)
G98	Initial point level return in fixed cycle
G99	R-point level return in fixed cycle

と工具交換以外のMコード処理時間, t_{Di} はドウェル時間である.

以下ではそれぞれの動作時間の算出方法について述べる.

2.3.1 切削送りの動作時間

切削送り動作には, 直線補間, 円弧補間, ヘリカル補間, 渦巻き補間, インポリュート補間などがある. これらはGコードによってモータル指令される. このうち多用される直線補間, 円弧補間の切削送り距離は, 式(2.3), 式(2.4)で求めることができる.

(1) 直線補間(G1)

$$s = \sqrt{(x_{ei} - x_{si})^2 + (y_{ei} - y_{si})^2 + (z_{ei} - z_{si})^2} \quad (2.3)$$

ここで, s は補間距離, $P_{si}(x_{si}, y_{si}, z_{si})$ は始点, $P_{ei}(x_{ei}, y_{ei}, z_{ei})$ は終点である.

(2) 円弧補間(G2: CW, G3: CCW); $x - y$ 平面(G17)の場合

$$s = 2r \sin^{-1} \left(\frac{l}{2r} \right) \quad (2.4)$$

ここで, s は補間距離 (mm) である. l は始点と終点の直線距離 (mm), r は補間半径 (mm) であり, $P_{si}(x_{si}, y_{si})$ を始点, $P_{ei}(x_{ei}, y_{ei})$ を終点, $P_{ci}(x_{ci}, y_{ci})$ を補間円弧の中心とすれば, 式(2.5), 式(2.6)で求めることができる.

$$l = \sqrt{(x_{ei} - x_{si})^2 + (y_{ei} - y_{si})^2} \quad (2.5)$$

$$r = \sqrt{(x_{ci} - x_{si})^2 + (y_{ci} - y_{si})^2} \quad (2.6)$$

$y - z$ 平面(G18), $z - x$ 平面(G19)の円弧補間距離も同様にして求めることができる.

従来のサーボ制御による切削送り動作や位置決め動作は, 図2.3に示すように行われている. NCの補間器から破線で示す矩形の指令が一次遅れ系のサーボ制御部へ出力されると, 結果として実線で示すように指令値に達するまでに T_s の時間を要する指数型の加減速制御が行われている. このような制御は補

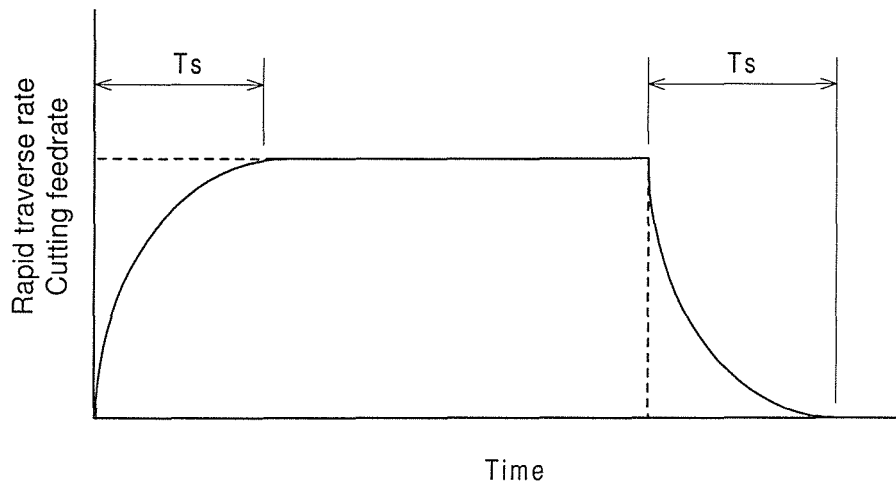


Figure 2.3 Conventional feedrate control

間後加減速制御と呼ばれ、この制御による場合は補間速度が高速になればなるほど追従誤差が大きくなる欠点がある。これに対して最近のNC装置には、補間器の演算処理で加減速処理を行ってサーボ制御部に指令を出力する補間前加減速機能が搭載されるようになっている。補間前加減速制御による場合には図2.4 (a)に破線で示すように加速度一定の加減速指令が与えられ、補間速度が高速となる場合でも実線で示すように追従誤差を補間後加減速に比べて小さくすることができる³³⁾。したがって本研究で開発したシミュレータの動作時間算出においては、補間前加減速制御による動作を前提としている。

補間距離が加減速距離に比べて長いときの動作時間は、

$$t_i = \frac{s}{F} + \frac{F}{a} \quad (2.7)$$

で求めることができる。ここで、 F は切削送りの速度指令値、 a は切削送りの設定加速度である。従来のサイクルタイム分析手法では、式(2.7)の右辺第2項、すなわち加減速時間が第1項に比べて小さいことから無視されていた。しかし最近のMCでは動作速度が速くなったことより、第2項を無視できなく

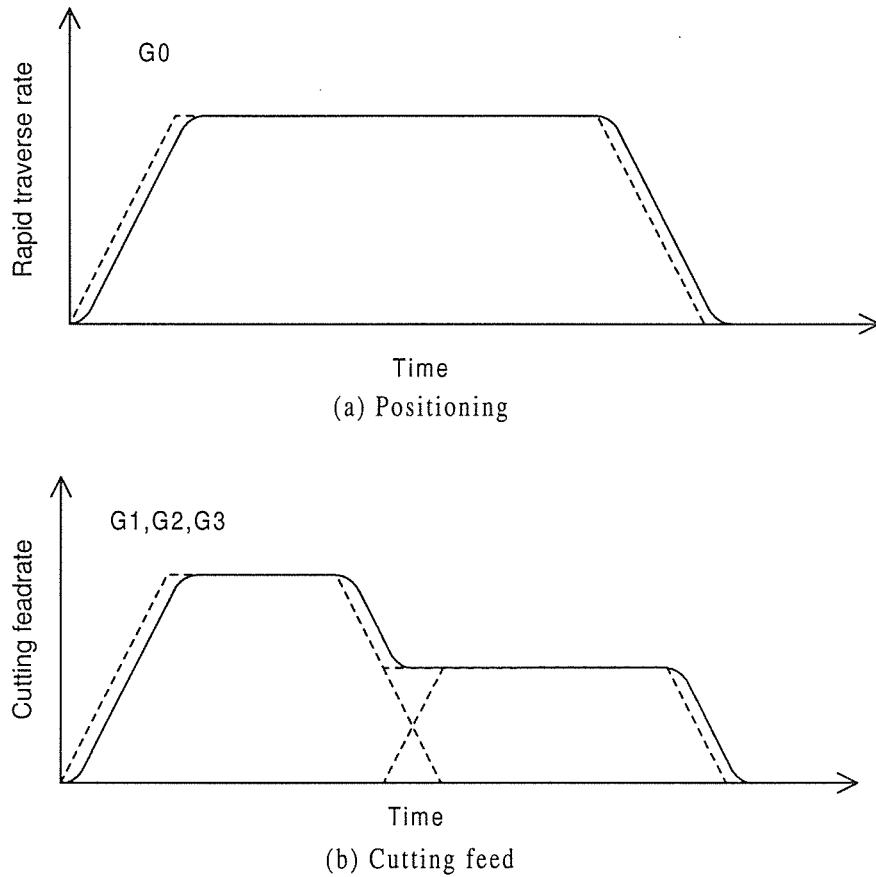


Figure 2.4 Advanced feedrate control

なっている。特に補間距離が加減速距離に比べて短いときは、

$$t_i = 2\sqrt{\frac{s}{a}} \quad (2.8)$$

で与えられることになり、加減速時間を無視して式(2.7)の右辺第1項のみから算出した動作時間よりも実動作動作時間はかなり長くなってしまふ。したがって正確な動作時間を求めるには、補間距離や送り速度、加速度を考慮した式(2.8)を用いなければならない。切削送りの補間は送り駆動系1軸だけでなく複数軸でも行われる。このときの加速度は、複数軸の送り速度を合成した速度に対してNC装置に制御パラメータとして設定される値で与えられる。

なお、円弧補間やヘリカル補間などは送り駆動系の最大加速度を超える補間動作をすることはできないので、補間前の加減速計算の際に送り速度 F が、

$$F_{max} = \sqrt{ra} \quad (2.9)$$

で求められる速度 F_{max} に制限されるようになっている。ここで、 r は補間半径、 a は切削送りの設定加速度である。また、円弧補間の誤差は送り速度の2乗に反比例して大きくなる。ある部品の指定された円弧形状の許容誤差 Δr_0 を満足する加工を行うにはその部分の円弧補間の送り速度 F が、

$$F_{max} = \sqrt{\frac{8K_p^2 r \Delta r_0}{1 - \left(\frac{K_f}{50}\right)^2}} \quad (2.10)$$

で求められる速度 F_{max} に制限されるようになっている。ここで、 K_p は位置ループゲイン、 k_f はフィードフォワード係数である。

また、切削送り動作が複数のブロックにわたって連続してプログラムされているときは、NCプログラムの先読みを行って図2.4 (b) に示すようなオーバーラップ処理が行われる。コーナー形状を補間する際は、連続する直線補間の間で速度ベクトルの角度（補間の方向）が大きく変化するので、完全にオーバーラップさせた制御を行うと、コーナ部で急激な加速度変化を生じて機械系が振動するとともにコーナの内側を補間することになるのでコーナ部の形状を正しく加工できなくなる。そこで速度ベクトルの角度変化 θ がNC装置に制御パラメータとして設定されるあるしきい値より大きいときには、コーナ部での送り速度が、

$$F_{lim} = a\Delta t\sqrt{2(1 - \cos\theta)} \quad (2.11)$$

で求められる送り速度 F_{lim} に制限される。ここで、 Δt は、NC装置の補間前制御におけるサンプリング周期である。

さらに送り駆動系には速度変化のたびに加速度が作用するが、これを微分した加-加速度が無限大になると送り駆動系に振動を生じて加工精度を低下させたり、工具の折損を招く。そこで、NC装置には加-加速度を適当な値に制限

するために一次遅れフィルタによる遅れ時間が設定できるようになっている。この値は、送り駆動系の動剛性が高ければ高いほど短い値を設定することができる。なお、シミュレーションにおいては、動作時間を算出する際は、この一次遅れフィルタの処理時間を速度変化の回数だけ加える必要がある。

2.3.2 位置決め動作時間

位置決め動作には、指令した点への位置決め動作(G0)と原点復帰動作(G28, G30)がある。これらの動作は経由点の補償はしなくてよいので、各軸はそれぞれの最大送り速度かつ最大加速度で動作する。位置決め動作時間は、

$$t_{Pi} = \text{Max}(t_{Pix}, t_{Piy}, t_{Piz}) \quad (2.12)$$

で求めることができる。ここで、X軸、Y軸、Z軸それぞれの動作時間 t_{Pix} , t_{Piy} , t_{Piz} は、式(2.7)または式(2.8)で計算することができる。

2.3.3 主軸の起動停止時間

主軸の高速化に伴い、主軸においても起動停止時間が無視できなくなっている。特に頻繁に工具交換を行う場合には、起動停止時間を無視したサイクルタイム分析は無意味なものとなる。主軸の起動または停止時間は、軸受部の摩擦などの負荷を無視すれば主軸の出力特性と主軸モータのロータイナーシャ、主軸スピンドルのイナーシャから、

$$t_{Si} = t_{S1} + t_{S2} + t_{S3} \quad (2.13)$$

で求められる。ここで主軸の出力が図2.5のようであるとき、 t_{S1} は主軸回転数が0 rpmから N_1 rpmまでの定トルク領域の加減速時間、 t_{S2} は主軸回転数が N_1 rpmから N_2 rpmまでの定出力領域の加減速時間、 t_{S3} は主軸回転数が N_2 rpmから N_3 rpmまでの出力がい減領域の加減速時間である。 t_{S1} , t_{S2} , t_{S3} は、主軸のスピンドルイナーシャと主軸モータのロータイナーシャの合計イナー

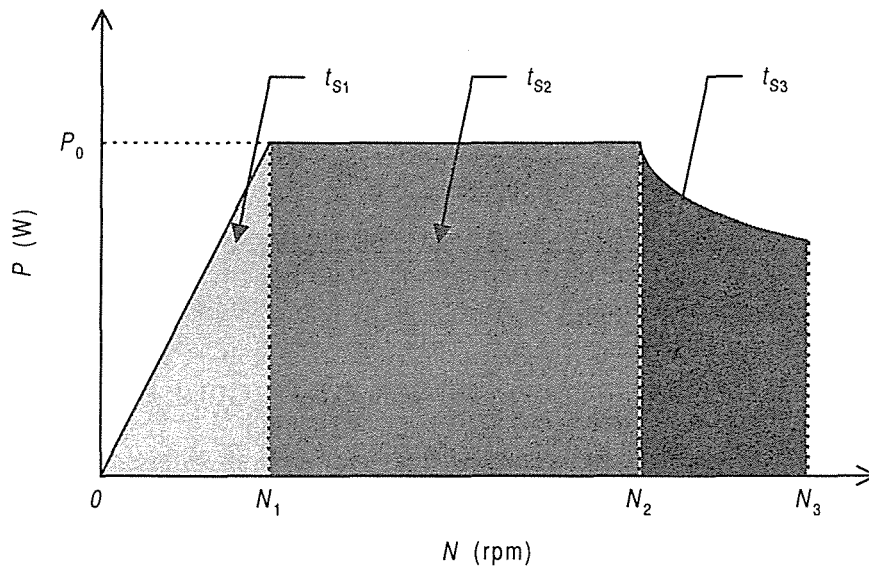


Figure 2.5 Output power control of main spindle motor

シャ GD^2 (kgm^2) と主軸モータの最大出力 P_0 (W) を用いてそれぞれ次式で求めることができる。

$$t_{s1} = \frac{1.03GD^2 N_1^2}{375P_0} \quad (2.14)$$

$$t_{s2} = \frac{1.03GD^2(N_2^2 - N_1^2)}{750P_0} \quad (2.15)$$

$$t_{s3} = \frac{1.03GD^2(N_3^2 - N_2^2)}{1125P_0 N_2} \quad (2.16)$$

また、工具交換 (M06) やボーリングの固定サイクル (G75) などでは、主軸のオリエント動作 (M19) を必要とする。この動作時間は NC 装置の制御性能に依存して決まるので、これを動作ごとに加えて主軸の起動停止時間に積算することになる。

2.3.4 工具交換時間

ATC 時間には、MAS 規格によってツール・ツー・ツール (Tool to Tool: 以下 T-T とする) とチップ・ツーチップ (Chip to Chip: 以下 C-C とする) の 2 種類

が規定されている。T-Tの時間は主軸がオリент状態で主軸頭ならびに次工具がATC待機位置にあり、ATCドアなども開いた状態で計測される時間である。この時間はまさに工具を主軸に付け換えるだけの時間である。C-Cの時間は、主軸が規定される回転数で回転し、主軸頭も規定される位置にあり、ATCドアも閉じている状態から、ATC動作を行ってもとの位置に位置決めし、元の回転数に起動するまでの時間である。したがってC-CのATC時間の方が実際的な動作時間を示す。

しかしながら実際の加工では、NCプログラムによって工具ごとに異なる主軸回転数が指令されるので主軸の起動停止時間も工具ごとに変化する。したがってここでのサイクルタイムの計算においては、一連のATC動作に要する時間を主軸頭の位置決め時間、主軸の起動停止時間とオリент時間、T-TのATC時間にそれぞれ分けて計算し、積算することにする。

2.3.5 Mコード処理時間

Mコードは、PLCを経由する制御をプログラムするのに使用される。完了信号を必要としない動作例えばクーラントのON、OFFなどは、Mコードを実行するたびにシーケンサのスキャンタイムだけ処理時間を要するので、全動作時間は指令回数に平均スキャンタイムを乗じて求めることができる。

一方、テーブルの割り出し動作(B)やパレットの交換動作(M171, M172)などは、いくつかの動作が組み合わされた動作であり、それぞれの動作毎に完了信号を必要とするので、ATC時間のように個別の動作時間を積算する必要がある。

2.4 サイクルタイムシミュレータの評価

開発したシミュレータの計算精度を評価するために、表2.6に示す仕様の標準的な立型MC（以下これを従来機とする）で、まず図2.6に示す部品をアルミニウム合金のブロックより削り出す際の実加工とシミュレータによって算

Table 2.6 Specifications of conventional vertical MC

Specifications	Conventional MC
Machine type	Double column vertical
Table Size	800 mm×450 mm
Load capacity	300 kg
Main spindle	
Rotational speed	35~12,000 rpm
Motor power	26 kW at peak
Acceleration time	2.2 s (0~12,000 rpm)
Feed drives	
Travel	X: 560 mm, Y,Z: 410 mm
Rapid traverse rate	X,Y/Z: 30/18 m/min
Cutting feedrate	0~18 m/min (with shape compensation function)
Acceleration	3.5 m/s ²
ATC time (T-T)	5.5 s
Machine Weight	4,100 kg
Floor space	2,110 mm×2,140 mm

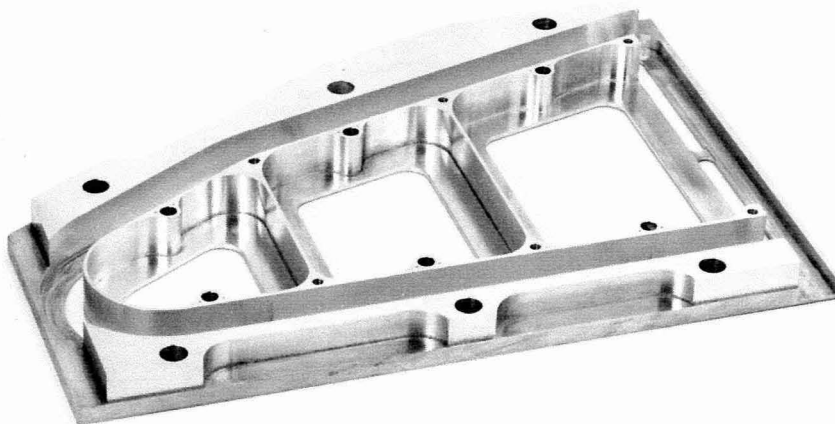


Figure 2.6 Workpiece of cycle time analysis (aerospace component)

Workpiece material: A5052, 400 mm×275 mm×30 mm

Table 2.7 Cutting conditions of aerospace component

Op.	Tool				Cutting speed m/min	Feed rate mm/min
	No.	Name	Material	Diameter mm		
10	1	Facemill (rough)	CBD	80	2,000	7,200
20	2	Facemill (finish)	CBD	100	2,000	3,200
30	3	Drill	CBD	8.5	200	2,250
40	4	Drill	CBD	5	190	3,600
50	5	Tap	HSS	M6	30	1,590
60	6	Endmill (rough)	CBD	20	500	2,800
70	7	Endmill (finish)	CBD	20	500	3,000
80	8	Endmill (groove)	CBD	10	300	1,500

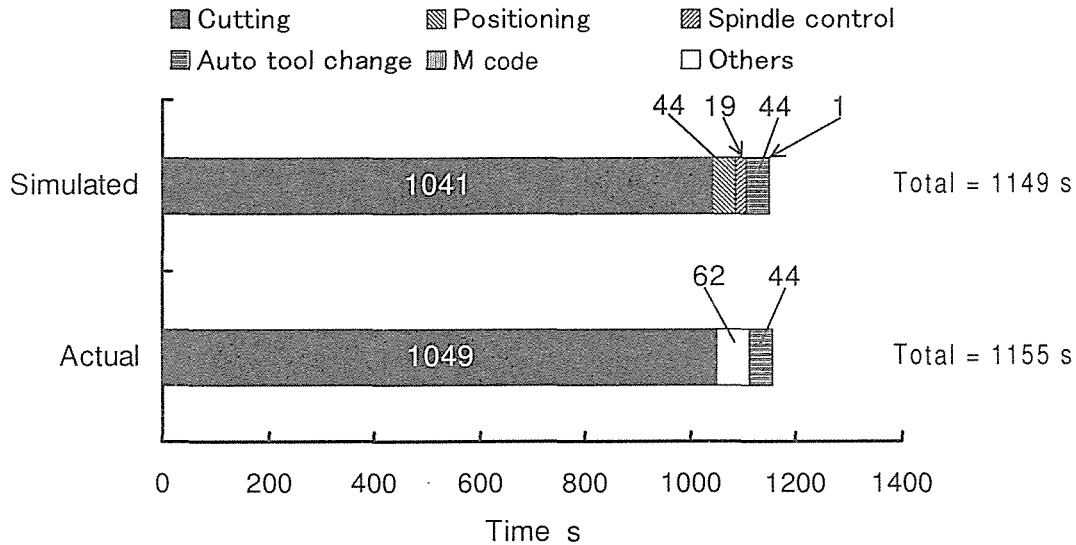


Figure 2.7 Evaluation of simulator (aerospace component)

出されたサイクルタイムとを比較した。図 2.6 の部品は、航空機部品に類似させたものである（航空機部品はその多くがブロック材からその 90%ないし 95%を切削除去することで製作されている）。したがって、切削時間がサイクルタイムの大部分を占める典型的な部品と言える。このときの使用工具と切削条件を表 2.7 に示す。この部品を加工するには、2 種のフェイスミル、3 種のエンドミル、2 種のドリル、1 種のタップの合計 8 本の工具が必要である。

図2.7に比較結果を示す。シミュレータによる計算結果では、切削時間1,041 s、位置決め時間44 s、主軸の起動停止時間19 s、ATC時間44 s、Mコード処理時間1 sであり、サイクルタイムは1,149 sとなっている。一方、実加工時間は、NC装置の稼働時間積算機能を利用して計測したが、切削時間1,049 s、位置決めと主軸の起動停止などの合計時間62 s（実加工では位置決め時間と主軸の起動停止時間とを分離できなかったので図2.7では”その他”としている）、ATC時間44 sであり、サイクルタイムは1155 sであった。したがって、実加工時間に対するシミュレーションにより求められた各動作時間およびサイクルタイムの誤差は3%程度であった。

次に切削時間と位置決め時間などとの比率が異なる他の部品について行った実加工とシミュレーションとを比較する。表2.6に示した立型MCで、図2.8に示すアルミニウム鋳物の部品の実加工時間とシミュレータによって算出されたサイクルタイムとを比較した。図2.8の部品は、自動車部品のなかでクラッチカバーと呼ばれ、エンジンプロックとミッションの間に配される部品である。自動車部品は量産コストを低減するために取り代の低減や均一化が図られて

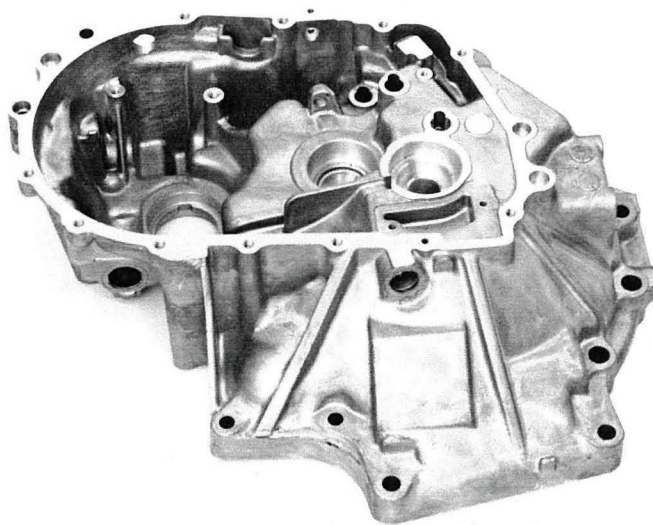


Figure 2.8 Workpiece of cycle time analysis (automobile part)

Workpiece material: AC4

Table 2.8 Cutting conditions of automobile part

Op.	Process	Tool				Cutting speed m/min	Feed -rate mm/min	Remarks
		No.	Name	Material	Diameter mm			
10	Facing (rough)	1	Facemill	CBD	80	2,010	3,200	
20	Facing (finish)					2,010	1,600	
30	Spot facing	2	Endmill	CBD	20	300	240	2- ϕ 16
40	Boring (rough)					300	717	2- ϕ 51.6 ϕ 39.6 ϕ 59.6
50	Boring (finish)					300	717	ϕ 61
60	Boring (finish)					300	717	ϕ 45
70	Boring (finish)	3	Boring	PCD	52	250	153	2- ϕ 52
80	Boring (finish)	4	Boring	PCD	40	250	199	ϕ 40
90	Boring (finish)	5	Boring	PCD	60	250	133	ϕ 60
100	Spot facing	6	Endmill	CBD	15	300	64	2- ϕ 15*13 ϕ 15*15
110	Spot facing	7	Endmill	CBD	14	300	68	2- ϕ 14*10
120	Spot facing	8	Burnishing reamer	CBD	14	50	57	ϕ 14*37 ϕ 14*32
130	Drilling	9	Burnishing drill	CBD	11	50	145	ϕ 11*32 ϕ 11*22
140	Drilling	10	Drill	CBD	6.8	320	1,200	14- ϕ 6.8*25
150	Drilling	11	Drill	CBD	5	190	1,200	2- ϕ 5*12 2- ϕ 5*18 ϕ 5*32
160	Spot chamfering	12	Chamfer	CBD	32	300	300	2- ϕ 14*C1 2- ϕ 15*C1 3- ϕ 14*C1
170	Spot chamfering					300	300	ϕ 28-C3
180	Bore chamfering					300	300	2- ϕ 52*C1 ϕ 40*C1
190	Spot chamfering	13	Chamfer	HSS	12	200	530	14- ϕ 6.8*C1 2- ϕ 5*C1 ϕ 14*C1
200	Tapping	14	Tap M8*1.25	CBD	8	60	3,000	14-M8
210	Tapping	15	Tap M6*1.0	CBD	6	56	3,000	2-M6

おり、切削除去量が少ない。一方締結のためのボルト穴やタップ穴の加工、軸受が組み付けられるために精度が要求されるボーリング穴などを多く含んでいる。したがって、一つの穴の加工時間は比較的短い、が、頻繁な位置決めと工具交換が要求される部品である。表2.8に使用工具と切削条件を示す。この部品を加工するには、1種のフェイスミル、3種のエンドミル、3種のドリル、2種のタップ、2種の面取りカッタ、1種のリーマ、3種のボーリングの合計15本の工具が必要である。

図2.9に比較結果を示す。シミュレータによる計算結果では、切削時間217 s、

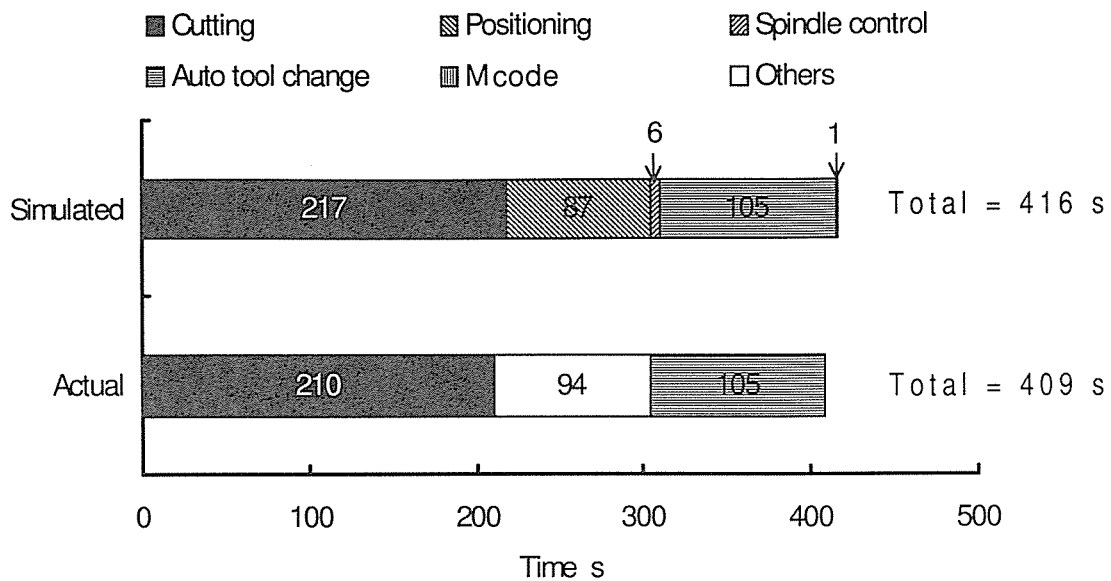


Figure 2.9 Evaluation of simulator (automobile part)

位置決め時間87 s, 主軸の起動停止時間6 s, ATC時間105 s, Mコード処理時間1 sであり, サイクルタイムは416 sとなっている. 一方, 実加工時間は, NC装置の稼働時間積算機能を利用して計測したが, 切削時間210 s, 位置決めと主軸の起動停止などの合計時間94 s (実加工では位置決め時間と主軸の起動停止時間とを分離できなかったのので図2.9では”その他”としている), ATC時間105 sであり, サイクルタイムは409 sであった. したがって, 実加工時間に対するシミュレーションにより求められた各動作時間およびサイクルタイムの誤差は約3%であった.

また図2.10に示す工作機械部品についても, 表2.9に仕様を示す標準的な横形MCでの実加工とシミュレーションとを比較してみた. この部品の材質は炭素鋼で先述の2つの部品に比べて被削性が悪く, しかも素材がブロック材であるので多くの切削除去を必要とする. したがって切削時間が長い. 表2.10に使用工具と切削条件を示す.

図2.11に比較結果を示す. シミュレータによる計算結果では, 切削時間726 s, 位置決め時間64 s, 主軸の起動停止時間0 s, ATC時間11 s, Mコード処理時間



Figure 2.10 Workpiece of cycle time analysis (machine tools part)
 Workpiece material: S45C, 200 mm×150 mm×65 mm

Table 2.9 Specifications of conventional horizontal MC

Specifications	Conventional MC
Machine type	Horizontal
Table Size	500 mm×500 mm
Load capacity	500 kg
Main spindle	
Rotational speed	35~12,000 rpm
Motor power	26 kW at peak
Acceleration time	1.7 s (0~12,000 rpm)
Feed drives	
Travel	X: 710 mm, Y: 610 mm, Z: 660 mm
Rapid traverse rate	X, Y, Z: 32 m/min
Cutting feed rate	0~32 m/min (with shape compensation function)
Acceleration	3.0 m/s ²
ATC time (T-T)	1.7 s
Machine Weight	12,200 kg
Floor space	3,230 mm×5,062 mm

Table 2.10 Cutting conditions of machine tools part

Op.	Tool				Cutting speed m/min	Feed rate mm/min
	No.	Name	Material	Diameter mm		
10	1	Facemill (Rough)	CBD	100	195	1,303
20	2	Facemill (Finish)	CBD	100	253	644
30	3	Insert drill	CBD	38	182	241
40	4	Roughing endmill	Coated HSS	20	28	134
50	5	Endmill	CBD	20	65	362
60	6	Chamfer	Cermet	32	400	1,592
70	7	Spot drill	SKH	20	25	36
80	8	Drill	Coated HSS	8.7	36	302
		Tap (Synchronized)	Coated HSS	10	13	621

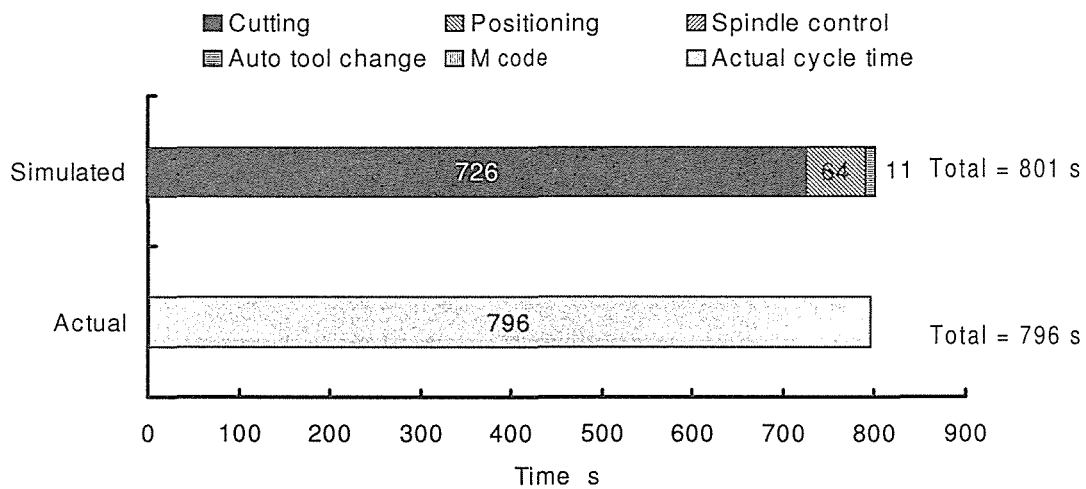


Figure 2.11 Evaluation of simulator (machine tools part)

0 s であり、サイクルタイムは 801 s となっている。ここで主軸の起動停止時間が 0 s になっているのは、主軸の起動とイニシャル点への位置決めが同時動作するように NC プログラムの同一ブロックで指令されており、主軸の起動時間がイニシャル点への位置決め時間に比べて短いからである。一方、実加工でのサイクルタイムは 796 s であった。したがって、実加工時間に対するシミュレーションにより求められたサイクルタイムの誤差は約 1 % であった。

以上の比較実験より，切削時間や位置決め時間など動作時間の割合が異なる部品加工でも，このシミュレータの計算誤差は3~4 %程度と考えて良いであろう。

2.5 結言

本章では，MCの開発設計において重要なステップである機械仕様の決定において，仕様の変更が生産性に及ぼす効果の評価を行うことで設計を支援するために開発したサイクルタイムシミュレータについて述べた．この設計支援シミュレータを用いて，航空機部品，自動車部品，工作機械部品についてサイクルタイムを算出し，実機による加工時間と比較した．航空機部品の加工はアルミニウム合金からの削り出しによって所望の形状寸法を得るものであるため切削動作が主体である．自動車部品はニアネットシェイプ化によって取り代が軽減されているもののドリル加工やタップ加工を多く含むことから，この加工では切削動作だけでなく頻繁な位置決め動作やATC動作を要する．工作機械部品の加工は被削材がS45Cで切削条件が他のものよりも厳しく，しかもブロック材からの削り出しを必要とする．これら加工工程，切削条件などが異なる部品について行ったシミュレーションでの誤差は3~4 %程度であることが確認され，開発された設計支援シミュレータが，MCの開発において，実機の試作に劣らない設計情報を提供できることがわかった．そして，このシミュレータを中心として，MCの設計支援システムを作り上げることができた．

第3章 サイクルタイムシミュレータを用いたマシニングセンタの高速化に関する考察

3.1 緒言

一般的にNC工作機械を導入する際には、対象とする加工部品の物理的な大きさを考慮するだけでなく、切削時間がサイクルタイムの7~8割を占めるような機械仕様を有する機種が選定されることが多い。これは加工対象部品によって加工工程や加工条件が異なるからである。さらに、生産財であるマシニングセンタ(MC)ではコストパフォーマンスも重要な選定基準となる。したがって、MCの高速化、高能率化を図る際にも、むやみに高性能化をめざした過剰な仕様になることなく、加工対象に適した機械仕様の選定が必要であると考えられる。そこで本章では加工工程、加工条件が異なる代表例として、航空機部品、自動車部品、そして工作機械部品を取り上げ、それぞれの部品を加工対象としたMCにとって望ましい機械仕様とは何かについて生産性の観点から考察する。具体的には、第2章で開発したシミュレータを用いて、主軸の最高回転数、起動停止時間、送り駆動系の最大送り速度と加速度などの機械仕様の変更がそれぞれの部品加工のサイクルタイム短縮に及ぼす効果を解析する³⁰⁾。

3.2 航空機部品の加工に関するサイクルタイム分析

航空機部品はアルミニウム合金ブロックからの削り出しによって製作されるので、エンドミルを用いた輪郭制御による切削時間がサイクルタイムに占める割合が非常に大きい。一方、ドリルやタップによる穴加工などは比較的少ないために穴から穴への位置決め時間はわずかである。また、使用する工具の本数が比較的少なく、工具交換はあまり行われなない。このことは第2章の図2.6に示した航空機部品の加工におけるサイクルタイム分析結果である図2.7により確認できる。

したがって、上述した航空機部品のような特徴を持つ部品を加工するMCにおいては、位置決め速度の向上などによる高速化はあまり効果的でなく、切削時間の短縮を図る必要があると考えられる。そこで、このことを検証するために第2章の図2.6に示した航空機部品の加工を例にとりあげ、MCの機械仕様の高速化とサイクルタイムとの関係を解析する。

3.2.1 送り駆動系最大送り速度の向上

これまでのMCの高速化においては位置決め時間等の非切削時間の短縮を期待して、送り駆動系ならびに自動工具交換(ATC)装置の高速化が図られているが、必ずしもその効果が定量的に予測されているとは言えない。そこで、図2.6の航空機部品を最大送り速度の異なるMCで加工したときのサイクルタイムのシミュレーション結果を図3.1に示す。ここでは比較しやすいように位置決め時間の部分を拡大して示している。図3.1は第2章で示した従来機(表2.6)の最大送り速度(XY軸30 m/min, Z軸18 m/min)をXYZ軸すべてを90 m/minまで高速化した場合である。図3.1より明らかなように高速化によっても位置決め時間(左から2番目のパラメータ)は従来機の44 sから41 sへと3 s, 7%ほどしか短縮されておらず、シミュレータの計算精度を考えるとほとんど効果がないことがわかる(他の動作時間は当然のことながら全く変化していない)。

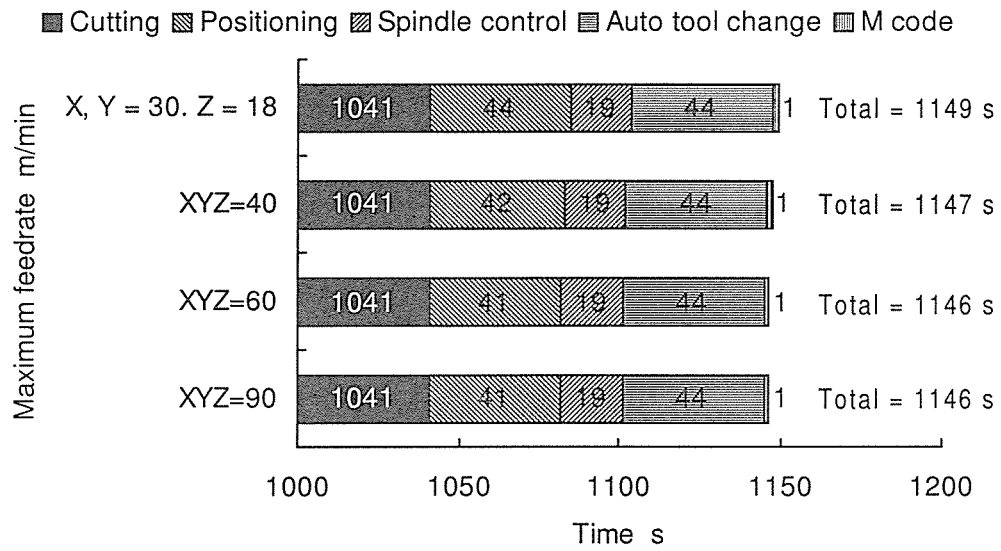


Figure 3.1 Effect of maximum feedrate on cycle time

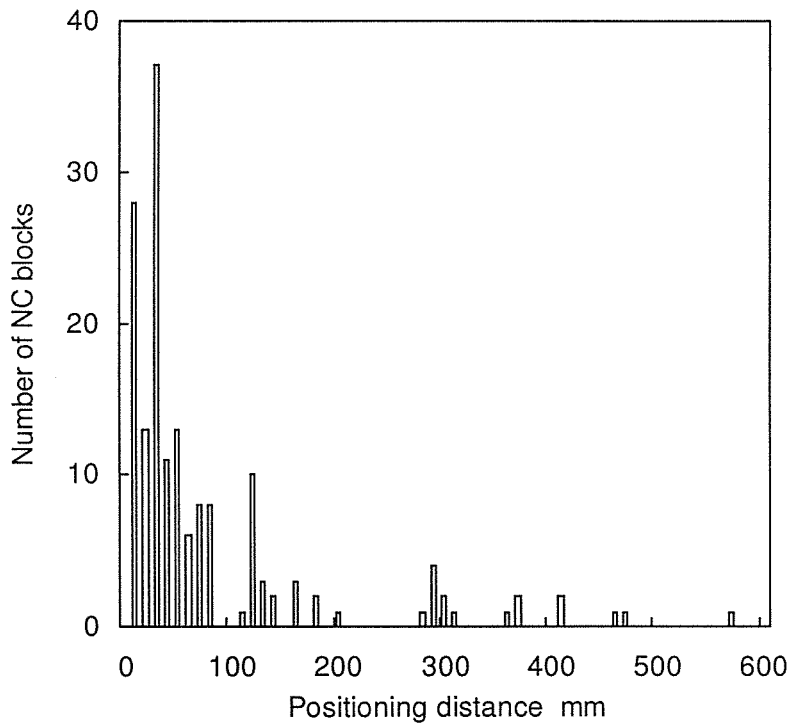


Figure 3.2 Histogram of positioning distance

このことの理由を探るために位置決め動作距離とその頻度を調べた結果を図3.2に示す。ここで2軸以上による位置決め動作の距離は、XYZ各軸の最も長いもので代表した。送り駆動系の加速度が従来機の仕様である 3.5 m/s^2 のとき、例えば最大送り速度 30 m/min に到達するには 72 mm 以上、最大送り速度 90 m/min に到達するには 643 mm 以上もの動作距離が必要である。しかしながら、図3.2は全位置決め回数162回のうち 70 mm 以下の短距離の位置決め回数が116回、72%であることを示している。したがって、設定された最大送り速度に達する位置決めが行われているのはほんのわずかであることが読みとれ、送り駆動系の高速化だけでは位置決め時間はほとんど短縮されないことが理解できる。

3.2.2 送り駆動系加速度の向上

送り駆動系の加速度を大きくする（高加減速化を図る）ことで、比較的短距離の位置決めでも最大送り速度に達するようになるので、位置決め時間の短縮が期待される。そこで最大送り速度を従来機と同じにして、送り駆動系の加速度を従来の 3.5 m/s^2 から 25 m/s^2 まで変化させてみた。その結果を図3.3に示す。加速度を 10 m/s^2 程度に増加させることで、期待どおり位置決め時間は従来機の 44 s から 34 s へと23%短縮されている。しかしながら図3.3はこれ以上に加速度を大きくしてもあまり位置決め時間は短縮されないことも示している。

そこで最大送り速度を 30 m/min から 120 m/min まで、また加速度を 3.5 m/s^2 から 25 m/s^2 までそれぞれ変化させたときの位置決め時間の変化を図3.4に示す。従来機では 44 s であった位置決め時間は、最大送り速度を 60 m/min 、加速度を 10 m/s^2 とすることで、 29 s となり34%短縮されていることがわかる。最大送り速度と加速度をより一層高めることで位置決め時間はさらに短縮される。しかしながら、その効果は次第に小さくなるので送り駆動系のコストも考慮すると上記の速度、加速度が有利な選択と考えられる。このように位置決め時間の効果的な短縮には、位置決め距離とその頻度を考慮した最大送り

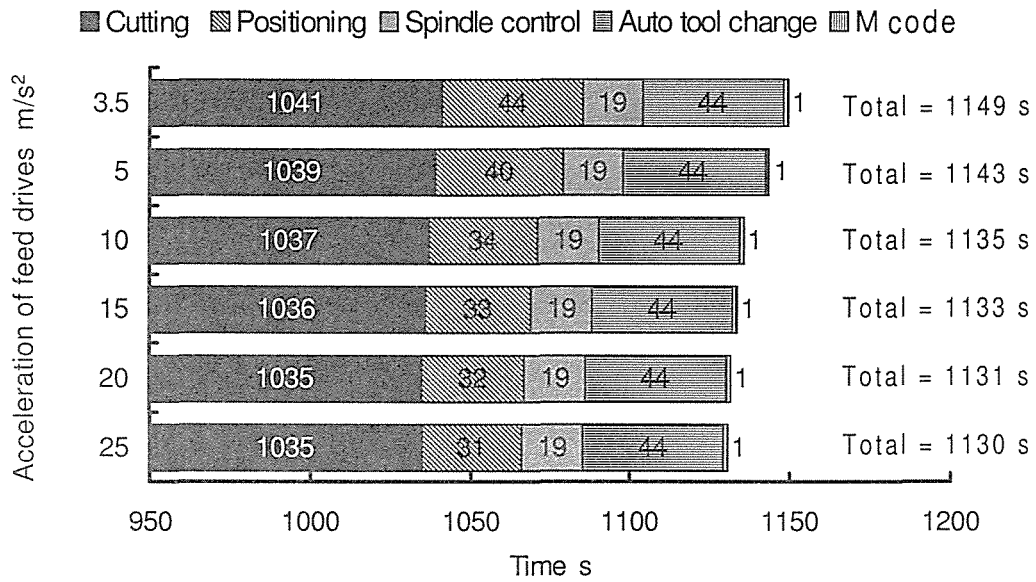


Figure 3.3 Effect of acceleration on cycle time

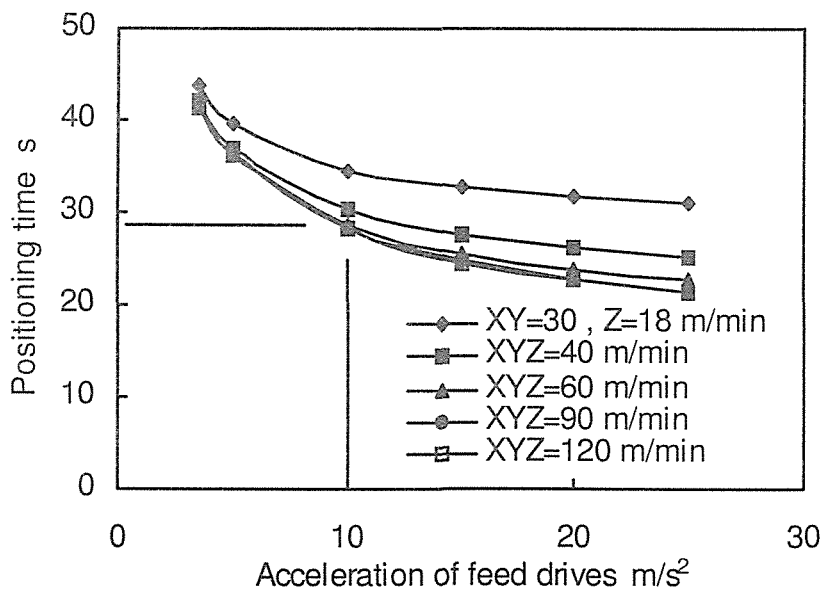


Figure 3.4 Effect of maximum feedrate and acceleration on positioning time

速度と、その速度が十分利用できる程度の加速度とが適切に選定される必要がある。

しかしながら図2.7に示したように、航空機部品では切削時間がサイクルタイムの大半を占めており、送り駆動系の高速化だけではサイクルタイムの短縮を期待できないことに注意しなければならない。

3.2.3 切削送り速度の向上

図3.3などで明らかのように送り駆動系の高速化、高加減速化は位置決め時間短縮には有効であるものの、切削時間の短縮にほとんど寄与していない。その理由は、これまでのシミュレーションでは一般的な工具の使用が想定されており、フェイスミル、エンドミル、ドリルの切削送り速度は3~4 m/min、タップは2 m/min程度に設定されているからである。したがってさらなるサイクルタイムの短縮には、その約9割が費やされている切削時間の短縮を図る必要がある。

切削時間を短縮するには、切削動作距離を短くするか、切削送り速度を向上させることが考えられる。切削動作距離は、主軸モータの出力を大きくして切り込み量を増加させれば切り込み回数が減少して短縮できる。しかしながら航空機部品は、ブロック素材の95%以上を切削して薄肉リブ形状にする

Table 3.1 High-speed cutting conditons of aerospace component

Op.	Tool				Cutting speed m/min	Feed -rate mm/min
	No.	Name	Material	Diameter mm		
10	1	Face mill (rough)	CBD	80	3,770	25,000
20	2	Face mill (finish)	PCD	100	5,000	12,000
30	3	Drill	CBD	8.5	534	15,000
40	4	Drill	CBD	5	314	10,000
50	5	Tap	HSS	M6	75	4,000
60	6	Endmill (rough)	CBD	20	1,571	30,000
70	7	Endmill (finish)	CBD	20	1,571	10,000
80	8	Endmill (groove)	CBD	10	471	2,250

必要がある。このような場合に、大出力の主軸で高切り込みの重切削を行えば、切削負荷が大きくなり、薄肉リブを創成することは強度的、精度的に困難である。また切削送り速度と主軸回転数とにより決まる1刃あたりの切り込み量が工具のチップポケットの大きさで制限される。したがって航空機部品加工の切削時間を短縮するには、主軸回転数を増加させて1刃あたり切り込み量の増加を抑えた加工が行われなければならない。そこで最新の工具と加工技術の使用を想定し、主軸の最高回転数を12,000 rpmから25,000 rpmに増加させるとともにこれにともなって主軸モータの出力を従来機の26 kWから、54 kWに増加させ、切削送り速度を第2章の表2.7に示したのものから表3.1に示すようにフライス、エンドミル、ドリルは10~30 m/min、タップは3 m/minとした場合（以下、これらを高速切削条件と呼ぶ）のサイクルタイムシミュレーションを行った。この結果を図3.5に示す。

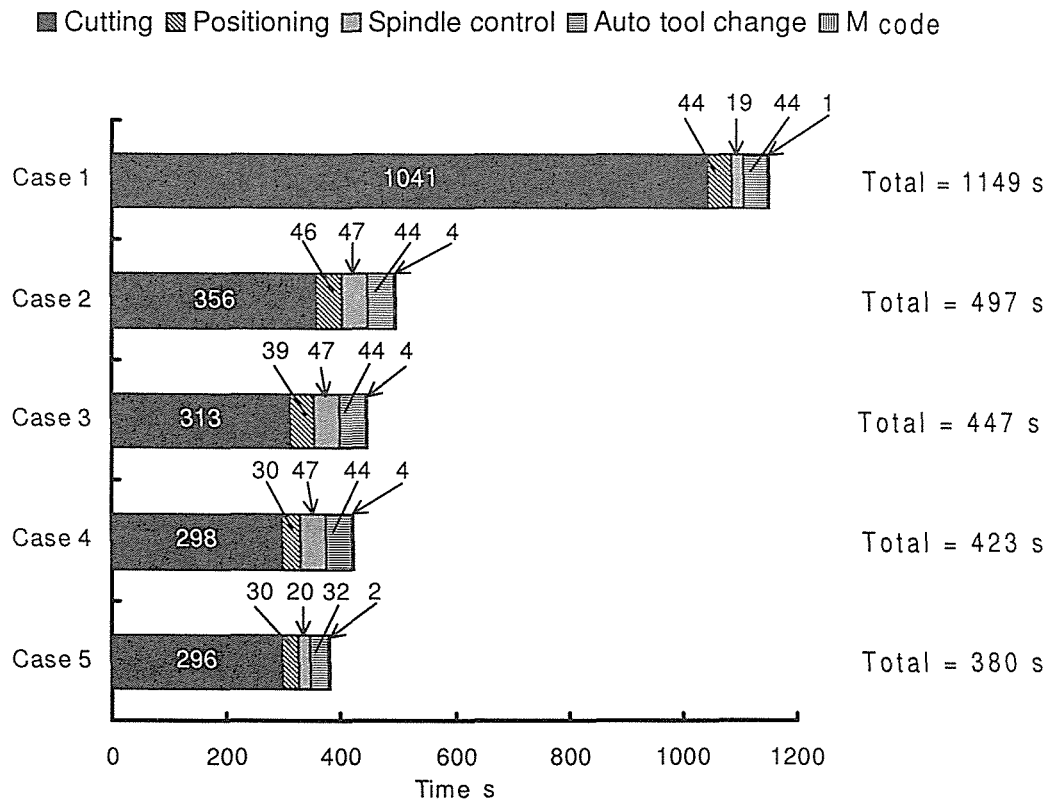


Figure 3.5 Effect of cutting conditions on cycle time

ここで Case 1 とは従来機で従来の切削条件で加工した場合であり，Case 2 とは従来機で高速切削条件を適用した場合である．Case 1 と Case 2 との比較から，最大送り速度 30 m/min，加速度 3.5 m/s^2 程度の送り駆動系であっても，高速切削が可能であれば切削時間は 1,041 s から 356 s へと 66 % 短縮され，サイクルタイムは 1,149 s から 497 s へと 57 % 短縮されることがわかる．このことから，サイクルタイムの短縮を図るには高速切削の適用による切削時間の短縮が最も効果的であり，送り駆動系の最大送り速度や加速度の向上効果を過大評価すべきではないと考えられる．

次に Case 3 は高速切削条件を適用するとともに送り駆動系の加速度を 10 m/s^2 とした場合であるが，図 3.3 に示したように位置決め時間が短縮されるだけでなく，切削時間も Case 2 では 356 s であるのに対して 313 s へと 12 % 短縮され，サイクルタイムは 497 s から 447 s へと 10 % 短縮されることがわかる．これは，切削送り速度の向上によって加速度の向上効果が大きくなったためである．以上の Case 1~3 では最大切削送り速度が Z 軸の最大送り速度 18 m/min に制限されていたので，Case 4 では送り駆動系の最大送り速度を XYZ 軸ともに 60 m/min にした．その結果，位置決め時間は Case 3 の 39 s から 30 s へと一層短縮されているばかりでなく切削時間も Case 3 の 313 s から 298 s に短縮されている．

しかしながら図 3.5 をよく見ると Case 2~4 では，主軸の起動停止に要する時間が Case 1 の 19 s に比べて 47 s と長くなっていることがわかる．これは主軸を高速化したにも関わらず，主軸の起動停止時の加速度を従来機と同程度にしているためである．また切削時間と位置決め時間の短縮によって，サイクルタイムに占める ATC 時間の割合が増加している．そこで Case 4 の機械仕様をさらに変更して，主軸の起動あるいは停止に要する時間を 3 s に短縮し，1 回の ATC 時間も 4 s に短縮した場合のシミュレーション結果を Case 5 に示す．この場合には主軸の起動停止時間は Case 4 の 47 s から 20 s，ATC 時間も 44 s から 32 s へと短縮されている．また主軸の起動停止時間の短縮によって主軸と Z 軸とを同期させたタップ加工が速くなるので，切削時間も 298 s から 296 s へ

とわずかながら短縮されている。

3.2.4 まとめ

以上のことから、航空機部品のような切削動作が主体の部品を対象とする場合のサイクルタイムを短縮するためには、高速切削によって切削送り速度を向上させて切削時間を短縮することが最も効果的であるといえる。したがって機械仕様の改善ポイントは、まず主軸の高速化、高出力化を図って高速切削を可能にし、次に送り駆動系の加速度を高めて切削時間と位置決め時間の短縮を図り、その上で送り駆動系の最大送り速度の向上によってさらに位置決め時間を短縮した後、主軸の起動停止時間の短縮とATC装置の高速化によって工具交換に伴う時間を短縮することであると考えられる。

3.3 自動車部品の加工に関するサイクルタイム分析

自動車部品の加工においては、多種類の工具を使用するドリル加工、タップ加工などの点加工が中心である。したがって、加工点間の移動を行う位置決め動作や工具交換動作などがしばしば行われることになり、位置決め時間や工具交換時間などの非切削時間がサイクルタイムに占める割合が3.2節で示した航空機部品の場合よりも大きくなる。このことは第2章の図2.8に示したアルミニウム鋳物製のクラッチカバーの加工におけるサイクルタイム分析結果である図2.9により確認できる。したがって、自動車部品のような特徴を持つ部品の加工においてサイクルタイムを短縮するには、切削時間だけでなく非切削時間の短縮も図る必要がある。そこで、第2章の図2.8に示したクラッチカバーについてのサイクルタイム分析を行う。

3.3.1 送り駆動系最大送り速度の向上効果

まず位置決め時間の短縮を図るために送り駆動系の最大送り速度を向上させたときの結果を図3.6に示す。最大送り速度を30 m/minから60 m/minまで

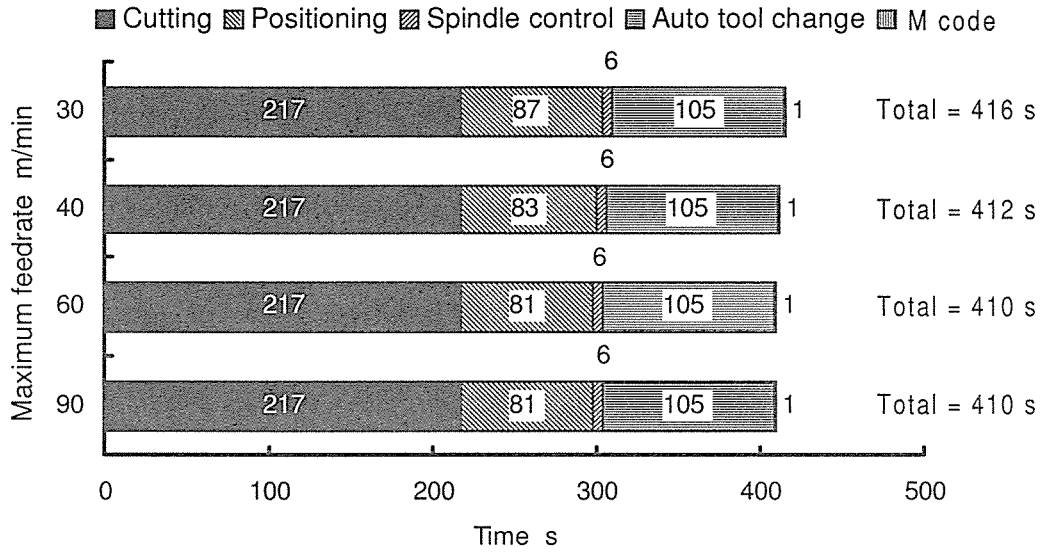


Figure 3.6 Effect of maximum feedrate on cycle time

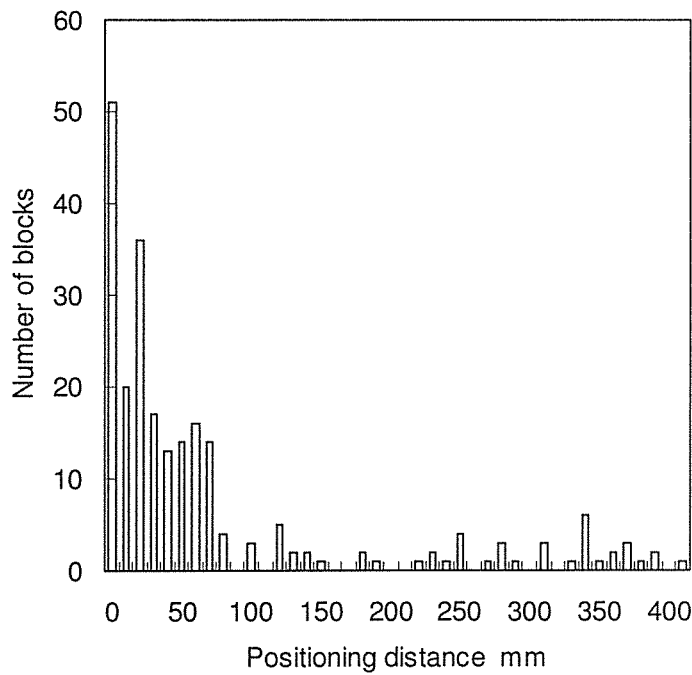


Figure 3.7 Histogram of positioning distance

向上させても位置決め時間のみが87 sから81 sへと6 s, 7 %短縮される程度で, さらに最大送り速度を90 m/minに向上させても全く効果のないことを確認することができる。

このことの原因を探るために位置決め動作距離とその頻度を調べた結果を図3.7に示す。送り駆動系の加速度が従来機の仕様である 3.5 m/s^2 のとき, 最大送り速度30 m/minに到達するには72 mm以上の動作距離を必要とするが, 図3.7は70 mm以下の短距離の位置決め回数が181回と全位置決め回数234回の77 %を占めていることを示している。したがって, 設定された最大送り速度に達する位置決めが行われているのはほんのわずかであることが読みとれ, 図3.2の場合と同様に送り駆動系の高速化だけでは位置決め時間はほとんど短縮されないことが理解できる。

3.3.2 送り駆動系加速度の向上

送り駆動系の加速度を大きくすると, 比較的短距離の位置決めでも最大送り速度に達するようになるため, 位置決め時間の短縮が期待される。そこで最大送り速度を従来機と同じにして, 送り駆動系の加速度を従来の 3.5 m/s^2 から 25 m/s^2 まで変化させてみた。その結果を図3.8に示す。加速度を 15 m/s^2 程度に増加させることで, 期待どおり位置決め時間は従来機の87 sから56 sへと35 %短縮されている。しかしながら図3.8はこれ以上に加速度を大きくしても位置決め時間の短縮割合は徐々に小さくなることも示している。

そこで最大送り速度を30 m/minから120 m/minまで, また加速度を 3.5 m/s^2 から 25 m/s^2 までそれぞれ変化させてみる。このときの位置決め時間の変化を図3.9に示す。従来機では87 sであった位置決め時間は, 最大送り速度を60 m/min, 加速度を 10 m/s^2 とすることで, 55 sとなり37 %短縮されている。最大送り速度と加速度をより一層高めることで位置決め時間はさらに短縮されるものの, その効果は次第に小さくなることから送り駆動系のコストを考慮すれば上記の速度, 加速度が適切な選択と考えられる。このように位置決め時間を効果的に短縮するには, 位置決め距離とその頻度を把握し, コスト

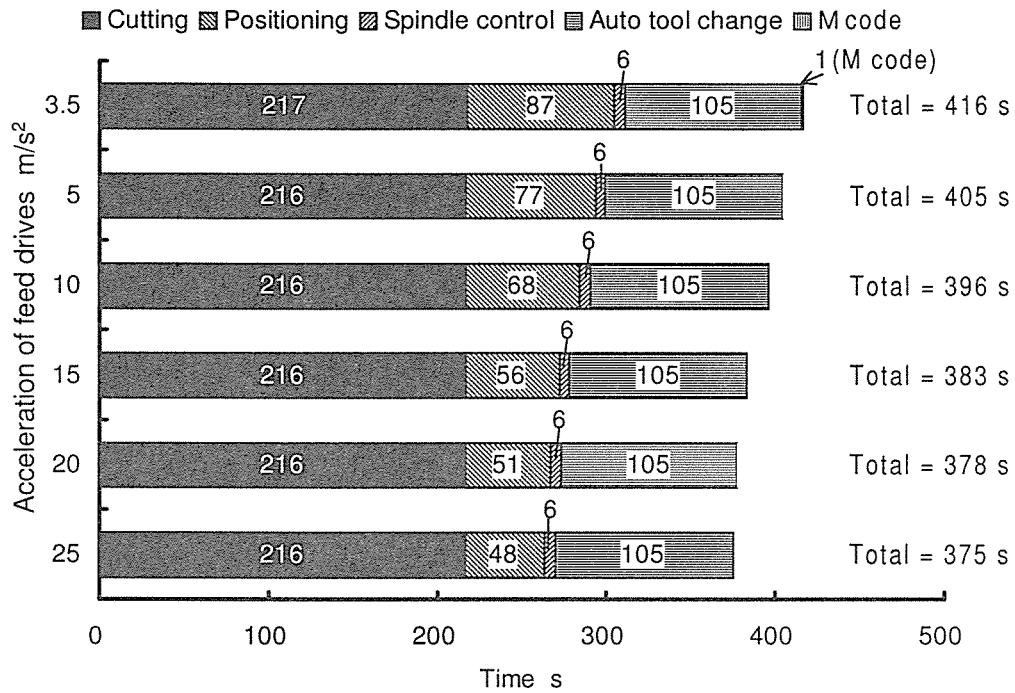


Figure 3.8 Effect of acceleration on cycle time

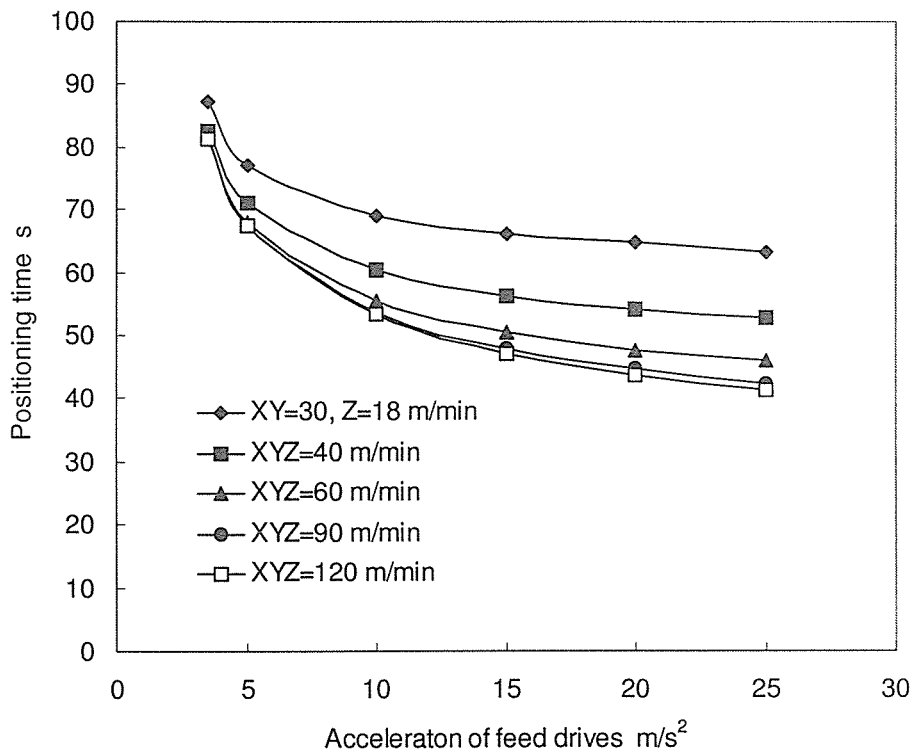


Figure 3.9 Effect of maximum feedrate and acceleration on positioning time

を考慮しつつそれに適した最大送り速度と、その速度が十分利用できる程度の加速度とが選定される必要がある。

3.3.3 切削送り速度の向上

送り駆動系の高加減速化は、図3.8などからわかるように位置決め時間短縮には有効であるものの、切削時間の短縮にほとんど寄与していない。その理由は、ここまでのシミュレーションでは想定している工具と切削条件は、自動車メーカーが一般的に専用機ラインで採用しているものであって、表2.8に示したようにフェイスミル、タップは3 m/min程度、エンドミル、ドリルの切削送

Table 3.2 High-speed cutting conditions of automobile part

Op.	Process	Tool				Cutting speed m/min	Feed -rate mm/min	Remarks
		No.	Name	Material	Diameter mm			
10	Facing (rough)	1	Facemill	CBD	80	2,512	10,000	
20	Facing (finish)					3,014	5,000	
30	Spot facing	2	Endmill	CBD	20	942	3,000	2-φ16
40	Boring (rough)					942	6,000	2-φ51.6 φ39.6 φ59.6
50	Boring (finish)					942	3,000	φ61
60	Boring (finish)					942	3,000	φ45
70	Boring (finish)	3	Boring	PCD	52	360	150	2-φ52
80	Boring (finish)	4	Boring	PCD	40	314	175	φ40
90	Boring (finish)	5	Boring	PCD	60	301	112	φ60
100	Spot facing	6	Endmill	CBD	15	330	750	2-φ15*13 φ15*15
110	Spot facing	7	Endmill	CBD	14	308	700	2-φ14*10
120	Spot facing	8	Burnishing reamer	CBD	14	75	265	φ14*37 φ14*32
130	Drilling	9	Burnishing drill	CBD	11	80	350	φ11*32 φ11*22
140	Drilling	10	Drill	CBD	6.8	288	4,500	14-φ6.8*25
150	Drilling	11	Drill	CBD	5	212	3,500	2-φ5*12 2-φ5*18 φ5*32
160	Spot chamfering	12	Chamfer	CBD	32	854	2,400	2-φ14*C1 2-φ15*C1 3-φ14*C1
170	Spot chamfering					854	1,500	φ28-C3
180	Bore chamfering					854	4,000	2-φ52*C1 φ40*C1
190	Spot chamfering	13	Chamfer	HSS	12	38	1,200	14-φ6.8*C1 2-φ5*C1 φ14*C1
200	Tapping	14	Tap M8*1.25	CBD	8	75	3,750	14-M8
210	Tapping	15	Tap M6*1.0	CBD	6	56	3,000	2-M6

り速度は1 m/min以下であり、ボーリングの送り速度は0.1 m/min以下とアルミニウムの加工としては極めて低く設定されているからである。

自動車部品の加工ではドリルやタップなどの穴加工が多いので、切削時間を短縮するには、切りくずの排出性を考慮して高速切削による切削送り速度の向上が効果的であると考えられる。このためには切削速度の高速化と切りくず排出性の良い工具の選定が必要である。そこで最新の工具と加工技術の使用を想定し、主軸の最高回転数を12,000 rpmから15,000 rpmとし、第2章の表2.8で示した切削送り速度を増加させて、3.3.3のようにフライス、エンドミルは3～10 m/min、ドリル、タップは4 m/min程度、タップは3 m/minとした場合（以下、これらを高速切削条件と呼ぶ）のサイクルタイムシミュレーションを行った。その結果を図3.10に示す。

ここでCase 1とは従来機で従来の切削条件で加工した場合であり、Case 2

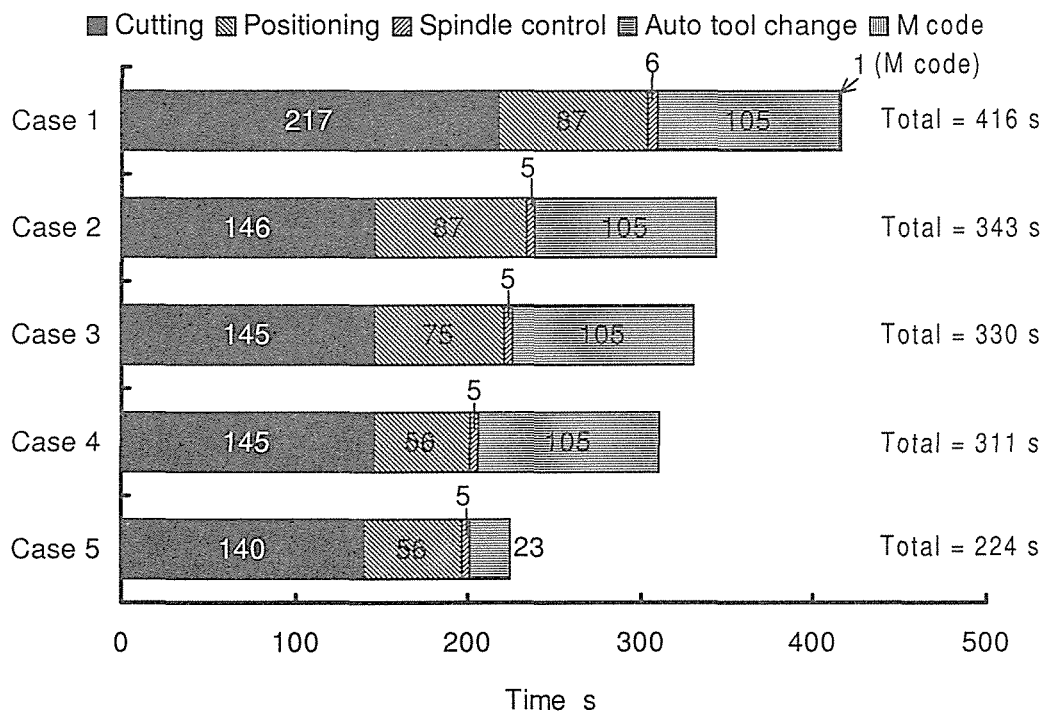


Figure 3.10 Effect of cutting condition on cycle time

とは従来機で高速切削条件を適用した場合である。Case 1 と Case 2 との比較から、最大送り速度 30 m/min, 加速度 3.5 m/s^2 程度の送り駆動系であっても、高速切削が可能であれば切削時間は 217 s から 146 s へと 33 % 短縮され、サイクルタイムは 416 s から 343 s へと 18 % 短縮されることがわかる。このことから 3.2 節の場合と同様に、サイクルタイムの短縮を図るには高速切削の適用による切削時間の短縮が最も効果的であることが確認できる。

次に Case 3 は高速切削条件を適用するとともに送り駆動系の加速度を 10 m/s^2 とした場合であるが、図 3.8 と同様に位置決め時間が 87 s から 75 s へ短縮される。しかしながら、切削時間は Case 2 の 146 s から 145 s へ、そしてサイクルタイムは Case 2 の 343 s から 330 s へと 4 % 短縮されているのみで、シミュレータの精度を考慮するとほとんど短縮されていないと言える。このことから切削送り速度を向上させてもそれが 10 m/min 以下の領域では、あまり加速度の向上効果を期待できないことがわかる。以上の Case 1 ~ 3 では最大切削送り速度が Z 軸の最大送り速度 18 m/min に制限されていたので、Case 4 では送り駆動系の最大送り速度を XYZ 軸ともに 60 m/min にした。その結果、位置決め時間は Case 3 の 75 s から 56 s へと一層短縮されている。

ここで図 3.10 を改めてみると Case 2 ~ 4 では、工具交換時間に要する時間が 105 s のままで、Case 4 ではサイクルタイムの 33 % と大きな割合を占めることがわかる。そこで Case 4 の機械仕様をさらに変更して、主軸の起動あるいは停止に要する時間を 1.3 s に短縮し、1 回の ATC 時間も 1.5 s に短縮した場合のシミュレーション結果を Case 5 に示す。この場合には主軸の起動停止時間は Case 4 と Case 5 とともに 5 s と変化していないものの、ATC 時間は 105 s から 23 s へと 78 % も短縮されている。また主軸の起動停止時間の短縮によって主軸と Z 軸とを同期させたタップ加工が速くなるので、切削時間も 145 s から 140 s へとわずかながら短縮されている。

3.3.4 まとめ

以上のことから、自動車部品のように位置決め動作や工具交換動作が主体の部品加工において、サイクルタイムを短縮するためには、高速切削によって切削送り速度を向上させて切削時間の短縮を図ることも重要であるが、位置決めや工具交換時間などの非切削時間の短縮をめざす必要がある。したがって機械仕様の改善ポイントは、まず送り駆動系の最大送り速度と加速度を高めて位置決め時間の短縮を図り、かつ主軸の起動停止時間の短縮とATC装置の高速化によって工具交換に伴う時間を短縮することであると考えられる。

3.4 工作機械部品の加工に関するサイクルタイム分析

これまでに解析してきた航空機部品、自動車部品はアルミニウム系の素材であった。それに対して工作機械部品は鋼鉄または鋳鉄によりつくられるために、切削抵抗が格段に大きくなる。作業内容は自動車部品に近く、点加工が多いのであるが、切削抵抗の大きさや工具寿命の点から切削速度をあまり高くすることができず、結果として切削時間のサイクルタイムに占める割合が多くなる。このことは第2章の図2.10に示した炭素鋼製の部品加工におけるサイクルタイム分析結果である図2.11により確認できる。したがって、工作機械部品のような特徴を持つ部品の加工においてサイクルタイムを短縮するには、3.2節の場合と同様に切削時間の短縮が大きな課題である。そこで、図2.10に示す部品の加工におけるMCの機械仕様とサイクルタイムとの関係を解析する。

3.4.1 送り駆動系最大送り速度の向上効果

位置決め時間の短縮を図るために送り駆動系の最大送り速度を向上させたときの結果を図3.11に示す。最大送り速度を32 m/minから90 m/minまで向上させても位置決め時間だけが64 sから58 sへとわずか6 s、9%短縮されているのみである。

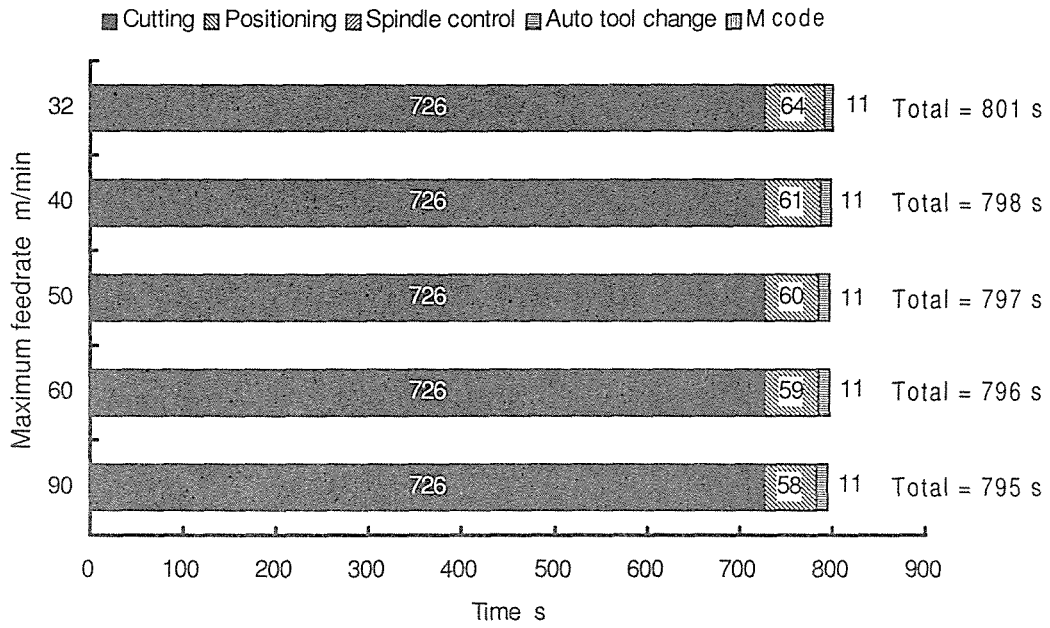


Figure 3.11 Effect of maximum feedrate on cycle time

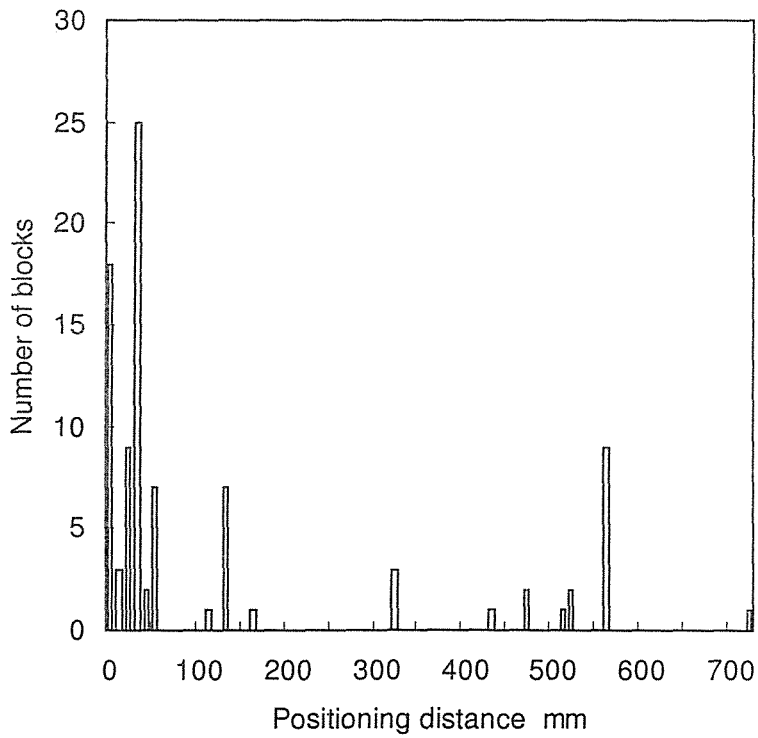


Figure 3.12 Histogram of positioning distance

このことの理由を探るために位置決め動作距離とその頻度を調べた結果を図3.12に示す。送り駆動系の加速度が従来機の仕様である 3 m/s^2 のとき、最大送り速度 32 m/min に到達するには 95 mm 以上の動作距離を必要とするが、図3.12より 100 mm 以下の短距離の位置決め回数が64回と全位置決め回数92回の70%を占めていることを示しており、ほとんどの位置決め動作が設定された最大送り速度に達していないことがわかる。3.2節や3.3節と同様に送り駆動系の高速化だけでは位置決め時間はほとんど短縮されないことがわかる。

3.4.2 送り駆動系加速度の向上

送り駆動系の加速度を大きくすることで、比較的短距離の位置決めでも最大送り速度に達するようになるため、位置決め時間の短縮が期待される。そこで最大送り速度を従来機と同じにして、送り駆動系の加速度を従来の 3 m/s^2

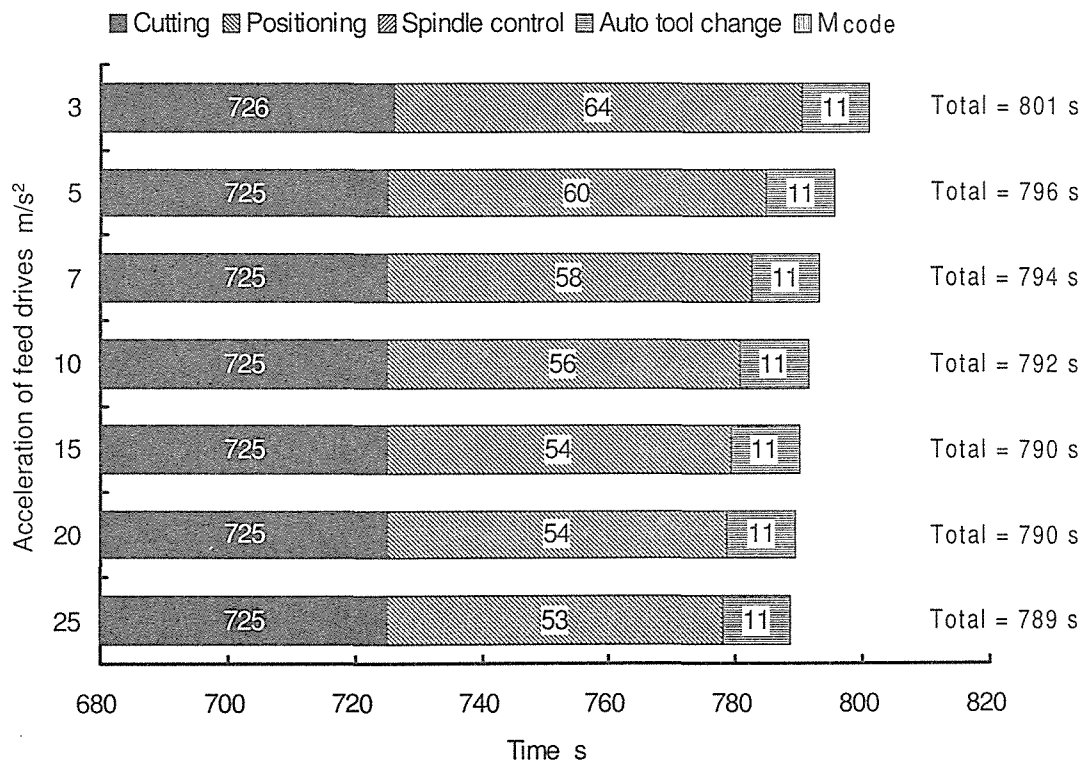


Figure 3.13 Effect of acceleration on cycle time

から 25 m/s^2 まで変化させてみた。その結果を図 3.13 に示す。加速度を 7 m/s^2 まで増加させることで位置決め時間は従来機の 64 s から 58 s へと 10% 短縮されている。しかし加速度をこれ以上大きくしても次第に位置決め時間の短縮効果が小さくなることも図 3.13 より読み取ることができる。

ここで最大送り速度を 32 m/min から 120 m/min まで、また加速度を 3 m/s^2 から 25 m/s^2 までそれぞれ変化させてみる。このときの位置決め時間の変化を図 3.14 に示す。従来機では 64 s であった位置決め時間は、最大送り速度を 50 m/min 、加速度を 7 m/s^2 とすることで、 51 s となり 20% 短縮されている。最大送り速度と加速度をより一層高めることで位置決め時間はさらに短縮されるが、切削抵抗の大きい鋼の加工を行う機械にはその加工負荷に見合う剛性をもつ構造体が必要でおのずと重量も大きくなる。したがって重いコラムやテーブルなどを高い加速度で動作させるにはリニアモータなどの採用が必要

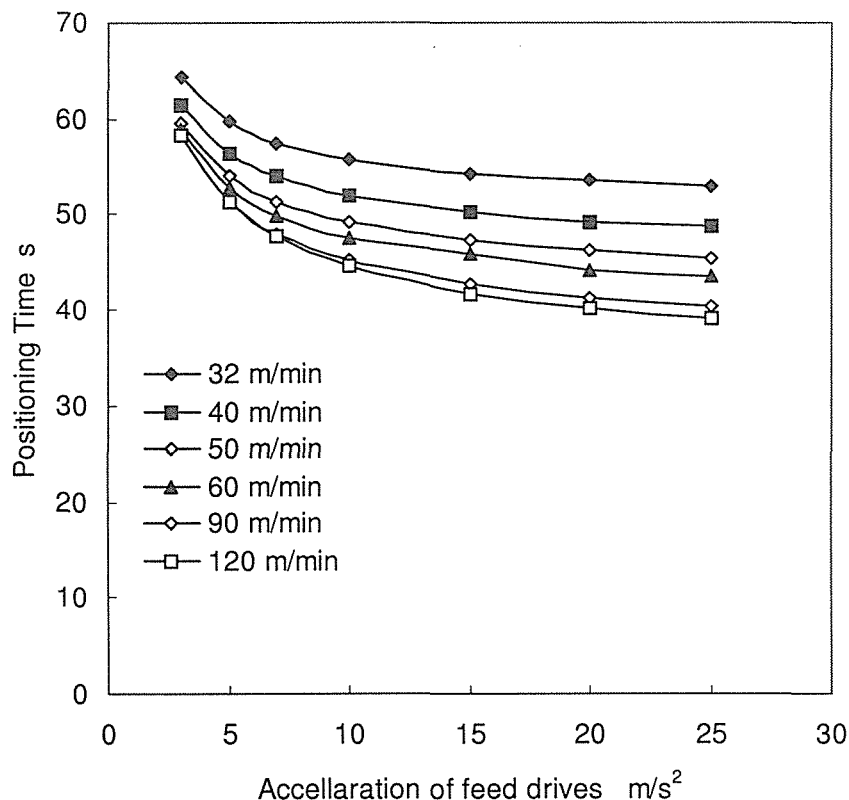


Figure 3.14 Effect of maximum feedrate and acceleration on positioning time

になるが、□500 mm程度の小型MCではコストの上昇比率が大きくなり、現実的な価格で販売できなくなると考えられる。したがって上記の速度、加速度が妥当な選択と考えられる。このように位置決め時間を効果的に短縮するには、位置決め距離とその頻度を把握し、コストを考慮して最大送り速度と加速度とが選定される必要があろう。

3.4.3 切削送り速度の向上

送り駆動系の高加減速化は、図3.14などからわかるように位置決め時間短縮には有効であるものの、切削時間の短縮にほとんど寄与していない。その理由は、ここまでのシミュレーションでは想定している工具と切削条件は工具メーカーが一般に推奨する切削条件を参考に設定されたものであるが、表2.10に示したようにフェイスミル、エンドミル、ドリル、タップともに切削送り速度は1 m/min程度もしくはそれ以下の低い条件であるからである。したがってさらなるサイクルタイムの短縮には、その大部分が費やされている切削時間の短縮を図る必要がある。

炭素鋼の加工は、アルミニウム合金やアルミニウム鋳物と比較して被切削性が悪く、工具摩耗が著しいので、Ti系のコーティングが施された超硬合金

Table 3.3 High-speed cutting conditions of machine tools part

Op.	Tool				Cutting speed m/min	Feed -rate mm/min
	No.	Name	Material	Diameter mm		
10	1	Face mill (Rough)	CBD	100	350	2,674
20	2	Face mill (Finish)	Cermet	100	400	1,019
30	3	Insert drill	CBD	38	220	332
40	4	Roughing endmill	Coated HSS	20	28	134
50	5	Endmill (Rough)	Coated CBD	20	500	7,985
60	6	Endmill (Finish)	Coated CBD	32	500	2,387
60	6	Chamfer	Cermet	32	400	1,592
70	7	Drill	Coated CBD	20	300	955
80	8	Chamfer	Cermet	8.7	300	716
90	9	Tap (Synchronized)	Coated HSS	10	40	2,195

やサーメットの使用が有効であると考えられる。そこで最新の工具と加工技術の使用を想定し、切削送り速度を第2章の表2.10から増加させて、表3.3に示すようにフライス、エンドミルは3~8 m/min, ドリル, タップは1~2 m/min程度とした場合(以下, これらを高速切削条件と呼ぶ)のサイクルタイムシミュレーションを行った。この結果を図3.15に示す。

ここでCase 1とは従来機で従来の切削条件で加工した場合であり, Case 2とは従来機で高速切削条件を適用した場合である。Case 1とCase 2との比較から, 最大送り速度32 m/min, 加速度3.5 m/s²程度の送り駆動系であっても, 高速切削が可能であれば切削時間は726 sから163 sへと563 s, 78%短縮されており, サイクルタイムも801 sから221 sへと580 s, 72%短縮されることがわかる。このことから, サイクルタイムの短縮を図るには高速切削の適用による切削時間の短縮が最も効果的であることが確認できる。

次にCase 3は高速切削条件を適用するとともに送り駆動系の加速度を7 m/s²とした場合であるが, 図3.13と同様に位置決め時間が47 sから37 sへと10 s,

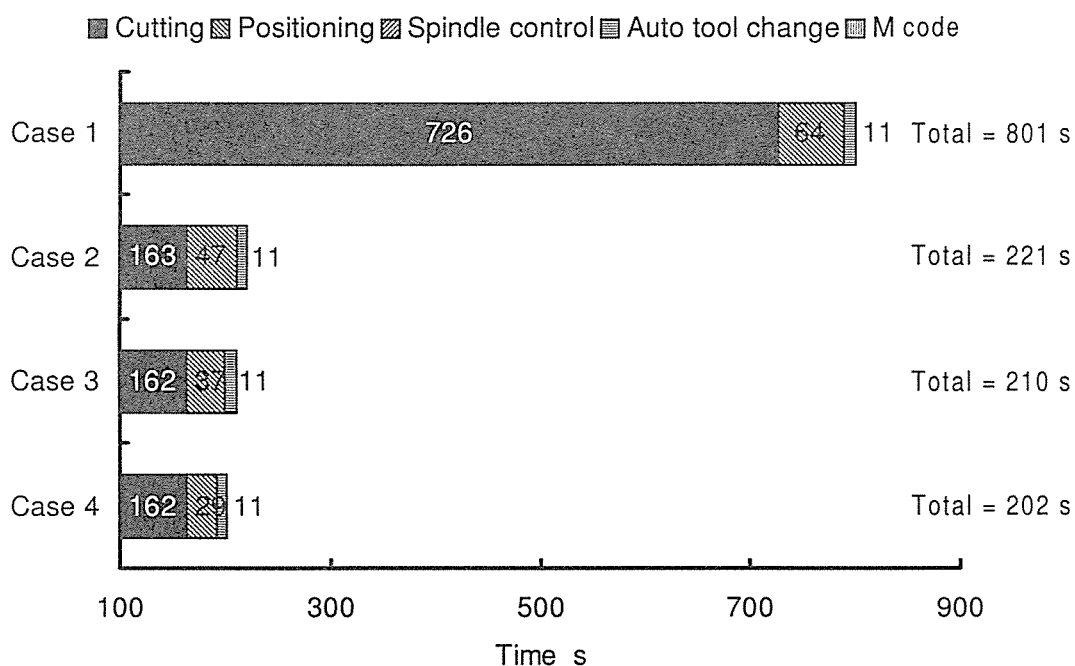


Figure 3.15 Effect of cutting condition on cycle time

21 %短縮されるだけで、切削時間はCase 2では163 sであるのに対して162 s、サイクルタイムは221 sから210 sへとわずか10 s、5 %短縮されているにすぎない。これはシミュレータの精度を考慮するとほとんど短縮効果がないと考えて良からう。このことから切削送り速度を向上させてもそれが数m/min以下の領域では、あまり加速度の向上効果を期待できないことがわかる。Case 4では送り駆動系の最大送り速度をXYZ軸ともに50 m/minにした。その結果、位置決め時間はCase 3の37 sから29 sへと一層短縮されている。

なお、このシミュレーションで想定した従来機の工具交換速度や主軸の起動停止時間は十分短く、サイクルタイムに占める割合も小さい。したがって、これ以上の高速化は機械コストの上昇を伴う可能性があり適切ではないと考えられる。

3.4.4 まとめ

以上のことから、工作機械部品のように切削動作が主体の部品加工においてサイクルタイムを短縮するためには、高速切削によって切削送り速度を向上させて切削時間を短縮することが最も効果的であるといえる。しかしながら現在の工具技術、加工技術では切削送り速度を高くすることができないので、現有の機械仕様でさえ十分生かすことができていない。したがって今後の工具技術、加工技術の発展によって切削送り速度の向上が可能になった場合にはMCの高速化が効果を現すことになる。

3.5 結言

本章では、MCの高速化がサイクルタイムに及ぼす効果を明らかにするため、2章で開発したサイクルタイムシミュレータを用いて、航空機部品、自動車部品、工作機械部品をそれぞれ加工対象としたときについてサイクルタイム解析を行った。主な解析結果を以下に示す。

(1) シミュレーションによるサイクルタイム解析から、送り駆動系の高速化は、

高加減速化が同時に行われる場合にはじめてサイクルタイムの短縮に寄与することがわかった。

- (2) サイクルタイムの短縮には、高速切削の適用による切削送り速度の向上が効果的であり、このためには主軸の高速化と高出力化が必要である。
- (3) アルミニウム合金製の航空機部品のような切削動作が主体の部品を対象とする場合にサイクルタイムを短縮するためには、高速切削によって切削送り速度を向上させて切削時間を短縮することが最も効果的である。この際の機械仕様の改善ポイントは、まず高速切削を可能にするために主軸の高速化、高出力化を図り、次に切削時間と位置決め時間の短縮のために送り駆動系の加速度を高め、さらに位置決め時間短縮のために送り駆動系の最大送り速度を向上させた後、工具交換に伴う時間短縮のために主軸の起動停止時間やATC装置の動作時間を短縮することである。
- (4) アルミニウム鋳物製の自動車部品のように位置決め動作や工具交換動作が主体の部品加工においてサイクルタイムを短縮するには、まず切削時間を短縮するために高速切削によって切削送り速度を向上させた後、位置決めや工具交換時間などの非切削時間を短縮することが効果的である。したがって機械仕様の改善ポイントは、まず位置決め時間を短縮するために送り駆動系の最大送り速度と加速度を高め、かつ工具交換に伴う時間を短縮するために主軸の起動停止時間とATC装置の動作時間を短縮することである。
- (5) 鋼製の工作機械部品のように切削動作が主体の部品加工におけるサイクルタイムの短縮には、高速切削によって切削送り速度を向上させて切削時間を短縮することが最も効果的である。しかしながら現在の工具技術、加工技術では切削速度、切削送り速度が十分高くなってはいない。したがって、生産性向上には工具技術、加工技術の発展による切削送り速度の向上が期待される。

第4章 小物航空機部品加工用高速高能率マシニングセンタの開発

4.1 緒言

本章では第3章のシミュレーション結果を踏まえ、高速加工の適用を前提とし、小物航空機部品を加工対象ワークとする高速マシニングセンタ (MC) の開発について述べる。一般に航空機部品はアルミニウム合金ブロックからの削り出しによって製作されるため、サイクルタイムに占める切削時間の割合が大きい。したがって加工の“高速化”をめざして行った3.2節のシミュレーション結果においても、切削時間を短縮することがサイクルタイムの短縮に対して最も効果的であることが示された。切削時間の短縮には、高速切削が可能な工具の開発、主軸の高速化をめざした軸受および潤滑方式の開発、そして部品の被削性改善などを行なうとともに^{16-19,41,42)}、主軸の起動停止時間の短縮、送り駆動系の最大送り速度や加速度の向上、自動工具交換 (ATC) などの動作時間の短縮を図る必要がある。位置決め時間の短縮には送り駆動系の高速化、高加減速化が必要であり、リニアサーボモータあるいはハイリードボールねじ (リードの大きなボールねじ) と低慣性サーボモータの組み合わせが有効であると考えられている^{24, 25)}。一方で補間精度を低下させることなく切削送り速度の高速化を可能にするための制御方式を適用した高速高精度数値制御 (NC) 装置が開発されている^{26, 33)}。以上に述べた新技術はいずれも MC の生産性向上に寄与するものと考えられるが、これらの新技術の選定および採用にあたってはその経済性も考慮されなければならない。そこで、これら実用可能な新技術とそのコストを考慮して生産性が向上すると考えられる機械仕様を選定し、これに基づいた MC を試作する。さらに、試作された MC を用い

て実際に加工を行い，サイクルタイムを従来のMCの場合と比較する^{30,43-45}).

4.2 目標仕様の選定

一般に航空機部品は欠陥検査を合格した圧延アルミニウム合金のブロック材から削り出し加工される．翼げたような大きな部品は，ガントリー形MCで加工され，ランディングギアやエンジン周りの中型の部品は，3軸もしくは5軸の横形MCで加工される．これに対して電装品の中継箱などを中心とする小さな部品や機体の桁とリブを接続する部分に取り付けられる補強部品のような小物部品は，小形の立形MCで加工される．その理由は，小物部品の加工が航空機メーカーではなく，その協力工場で行われるので，立形MCの方が横形MCより比較的導入コストが低いことがあげられる．その上，航空機部品はロットサイズが非常に小さいので，横形MCに専用ジグを取り付けて連続加

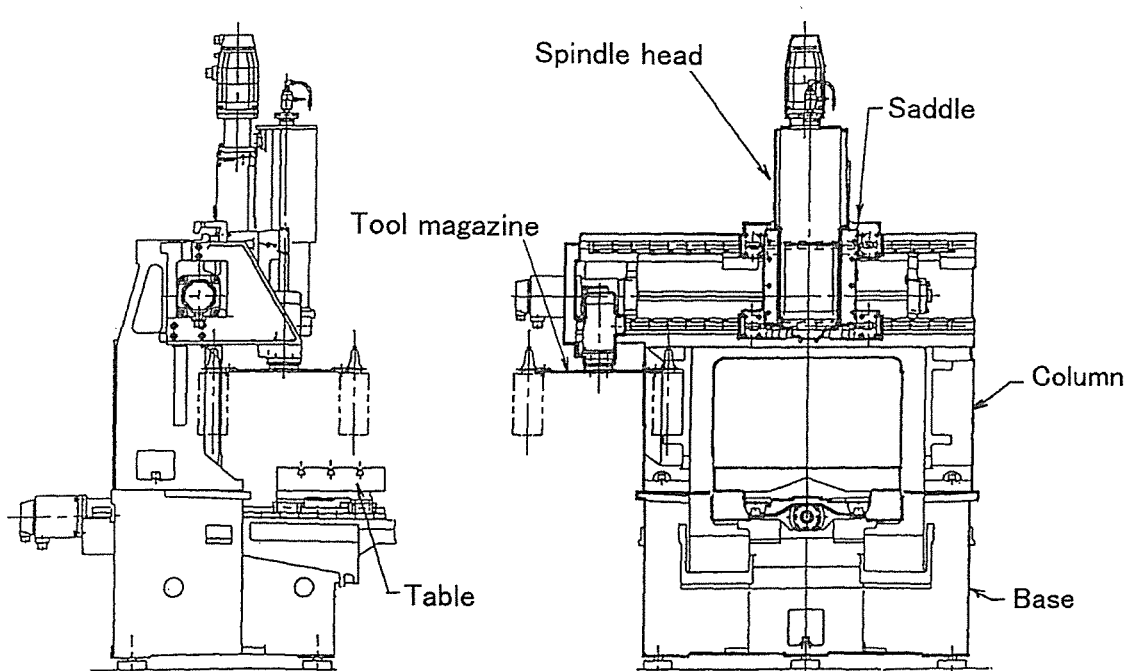


Figure 4.1 Structure of vertical machining center

工するより、立形MCに汎用バイスを取り付け、これにワークを把握して、工程毎にワークの着脱をする方が、経済的でありかつ柔軟性が高い場合が多いからである。そこで、図4.1に示すような標準的な立形MCをベースマシンとして、その基本構造、XYZ各軸の移動量やテーブルの最大積載質量などを変えず、第3章での図3.5, Case 5の仕様に基づいた機械仕様の改良を加えて高能率MCを試作することにした。

4.2.1 主軸の仕様選定

高速切削の能力を優先させる必要がある小物航空機部品の加工では直径1/4から3/4 inのエンドミルによる加工が主であるので、切削能力を考慮してツールインターフェースのサイズを40番相当とし、図3.5の仕様を満たせるように主軸の最高回転数を使用頻度の高いミーリングホルダの許容最高回転数と同じ30,000 rpmとした。また、主軸駆動モータの最大出力を54 kWとした。その理由は出力が従来機の26 kWのままでは、最高回転数の向上に伴ってトルクが小さくなることにより、最大切込み量が制限されて切り込み回数が増加し、かえって切削時間が長くなると考えたからである。

4.2.2 送り駆動系の仕様選定

次に送り駆動系については、第3章、図3.5の機械仕様に従って加速度を10 m/s²程度、最大送り速度を60 m/minとすることとした。

4.2.3 ATC装置の仕様選定

航空機部品の加工では、サイクルタイムの大半を切削時間が占め、ATC時間が占める割合は小さいので、ATC時間の短縮によるサイクルタイムの短縮効果は小さい。そこで、ATC機構は、ATCアームによらずX軸とZ軸の移動によって工具交換する機構とし、送り駆動系の高速化、高加減速化によってATC時間の短縮を図ることとした。

Table 4.1 Machine specifications of improved vartical machining center

Specifications	Conventional MC	Improved MC
Machine type	Double column vertical	Double column vertical
Table Size	800 mm×450 mm	800 mm×450 mm
Load capacity	300 kg	300 kg
Main spindle		
Rotational speed	35~12,000 rpm	35~30,000 rpm
Motor power	26 kW at peak	54 kW at peak
Acceleration time	2.2 s (0~12,000 rpm)	3 s (0~30,000 rpm)
Feed drives		
Travel	X:560 mm, Y,Z:410 mm	X:560 mm, Y,Z:410 mm
Rapid traverse rate	X, Y / Z: 30 / 18 m/min	X, Y, Z: 60 m/min
Cutting feedrate	0~18 m/min (with shape compensation function)	0~60 m/min (with shape compensation function)
Acceleration	3.5 m/s ²	10 m/s ²
ATC time (T-T)	5.5 s	4 s
Machine Weight	4,100 kg	4,700 kg
Floor space	2,110 mm×2,140 mm	2,510 mm×2,140 mm

4.3 機構設計

図 3.5 の機械仕様をもとに決定された試作 MC の開発目標とする機械仕様を従来機と比較して表 4.1 に示す。本節ではこの目標仕様を実現するための機構について考察する。

4.3.1 主軸の機構設計

主軸は可能な限り従来機と同様の切削負荷にも耐えられるようにするため、スピンドル径を 70 mm とした。スピンドル径 70 mm、最高回転数 30,000 rpm の主軸の dn 値（スピンドル径 d mm × 最高回転数 n rpm）が 210 万となることから、軸受にはセラミックスボールを使用した高速仕様のものを採用することにした。潤滑方式にはオイルアンドエア潤滑方式を採用することにした。その理由は、ジェット潤滑方式の方がオイルアンドエア潤滑方式に比べて高速回転時の潤滑性能の点で優れていると考えられるが、次のような点で課題があるからである。

- (1) 潤滑油の温度制御装置など特別な機器が必要で比較的大きなコスト上昇とフロアスペースの拡大を伴う。

- (2) 動力損失が比較的大きいので、高速回転時に切削に寄与できる主軸出力が小さくなる。
- (3) 粘性の低い特殊な潤滑油が必要とされる場合があり、海外でこれ入手することが困難であると現地ユーザに経済的な負担をかける。

なお軸受の予圧方式は、従来の定位置予圧に比べて最高回転速度域の信頼性に優れる定圧予圧方式とすることにした。

主軸の起動停止時間を短縮するには、負荷イナーシャを小さし、モータのトルクを大きくすればよいが、このためにだけモータの出力トルクを大きくするのは経済的ではない。そこで、主軸スピンドルを可能な限り短くすると同時にロータ長の短い主軸モータを選定して低慣性化を図った³²⁾。さらに基底回転数を従来のモータより低くすることによって、低速部でのトルクを大きくして加減速時間の短縮をめざすことにした。

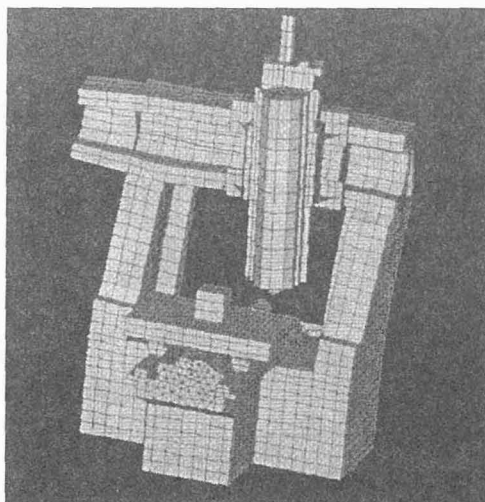
主軸のスピンドルと工具ホルダとのインターフェースは、高速回転によってスピンドルのテーパ部が拡大するため、従来のBTテーパでは高速回転域で工具ホルダを確実に把握できないことがあるので、二面拘束ホルダの1種であるHSK63 Form Aを採用することにした²¹⁾。

4.3.2 送り駆動系の設計

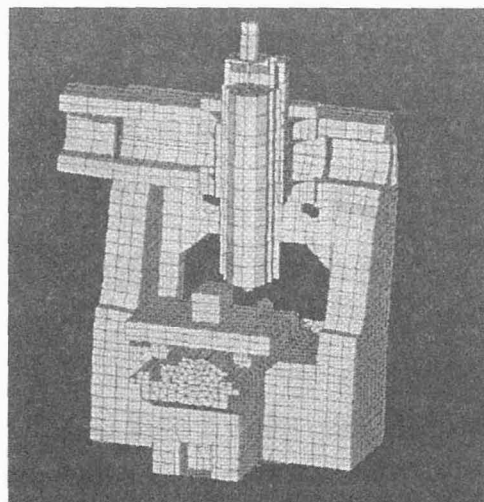
次にXYZ各軸の送り駆動系の機構を検討した。リニアサーボモータを採用すれば要求仕様を越える高い送り速度、加速度の性能が実現されるがコストの上昇も伴う。それに対して、従来のボールねじ送り駆動機構でもハイリード化によって経済性を犠牲にすることなくある程度的高速化が可能で、要求仕様を満たすことができる²⁵⁾。そこでハイリードボールねじを使用して従来機と同程度の疲労寿命を確保しつつ要求仕様である最大送り速度60 m/minを実現した。ボールねじのdn値は、従来では7万程度であったが、最近の研究開発によって12万程度まで可能になっているので、ボールねじの径を40 mm、リードを20 mmとして、これを最高回転数3,000 rpmで駆動する。さらに加速

度 10 m/s^2 の要求仕様を満たすために、低慣性高出力 AC サーボモータを採用した。なお送り駆動系のサーボ剛性はねじリードの二乗に反比例するので、機械的な剛性を向上させてサーボループのハイゲイン化が必要であると指摘されている³⁵⁻³⁹⁾。そこで送り駆動系のスラスト方向の剛性を高めるためにボールねじの支持方式を両端固定とし⁴⁰⁾、有限要素法による構造解析（以下 FEM 解析とする）を利用してサドル、コラム、ベースの支持軸受ハウジング組み付け部位の高剛性化を図った。

送り駆動系の高速化により、質量の大きな主軸頭、サドルやテーブルが従来機の 3 倍以上の加減速で運動することになるので、慣性力でコラムなどの構造体の変形量が増大して従来機と同等の精度では加工できなくなると考えられる。図 4.2 (a) は従来構造で主軸頭とサドルがコラム上を 10 m/s^2 で加減速した際の機械の変形を FEM 解析した結果を示しているが、変形量が大きく加工精度の低下が心配される。そこで主軸頭、サドル、コラム、ベースならびに基礎部品の FEM 解析を行って、XYZ 各軸が加減速する際の主軸先端とテーブルとの相対変位を抑えて従来機と同程度の加工精度を維持できるように肉厚やリブ配置、鋳抜き穴の形状寸法を変更した。このような補強を行った場合



(a) Conventional structure



(b) Improved structure

Figure 4.2 Deformation of vertical machining center analyzed by FEM ($\times 2000$)

の変形を図4.2 (b)に示すが、テーブルと主軸先端との相対変位が(a)の場合に比べて半減しているのがわかる。このようなFEM解析を繰り返し、十分な強度を持った構造を選定した。

4.3.3 ATC装置の設計

ATC装置はアームレス方式として機械式のアンクラップ機構を採用し、送り駆動系の速度、加速度の向上によって、ATC時間の短縮を図れるようにした。

4.4 性能評価

4.3節の設計に基づいて試作された立形MCを図4.3に示す。

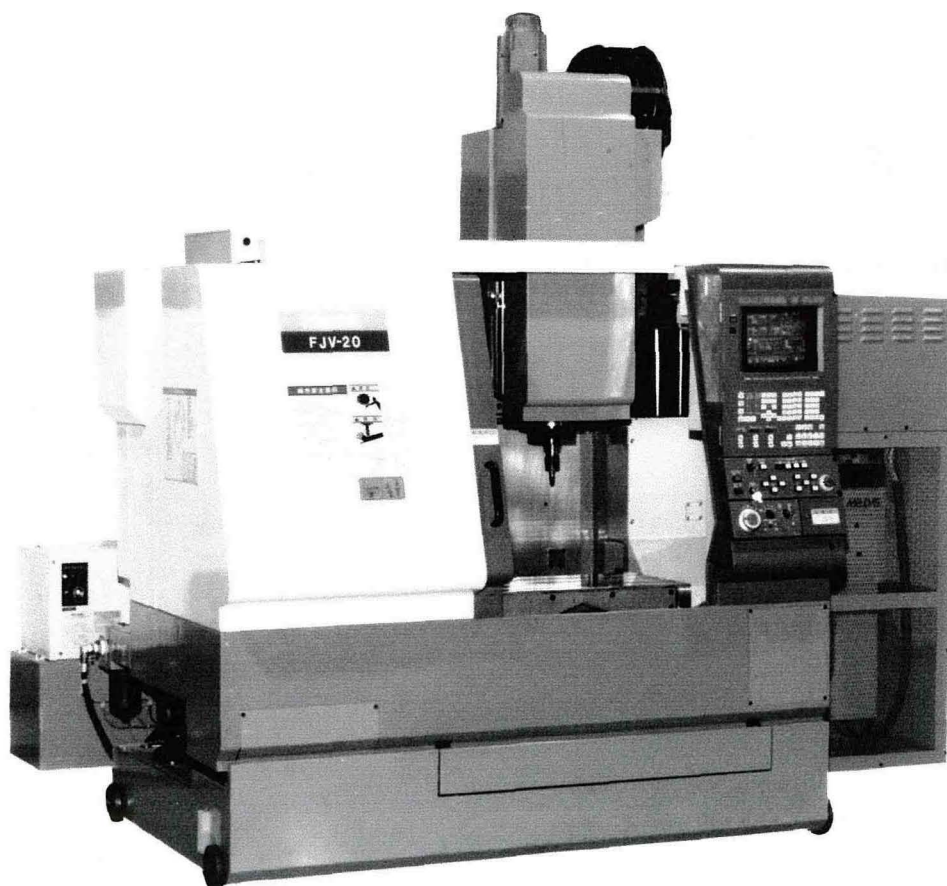


Figure 4.3 Improved vertical machining center

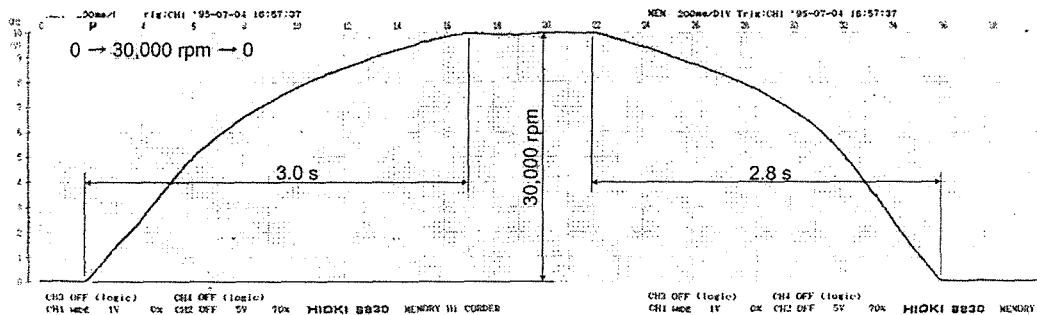


Figure 4.4 Acceleration of main spindle

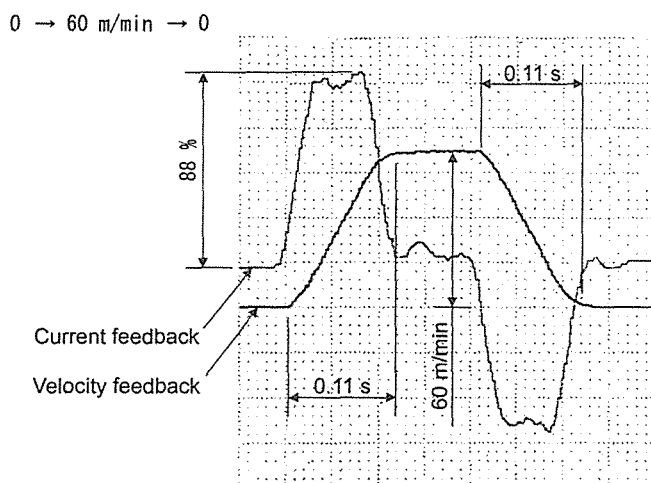


Figure 4.5 Acceleration of feed drive

4.4.1 目標仕様の確認

試作MCが目標とした設計仕様を満足していることを確認するために、まず主軸の加減速時間を主軸アンプ部で主軸の速度フィードバック信号をモニタすることにより測定した。この結果を図4.4に示す。0 rpmから最高回転数30,000 rpmまでの加速時間は3 sで、30,000 rpmから停止するまでの時間は2.8 sであった。

また送り駆動系の加減速時間についてもサーボアンプ部で速度フィードバック信号をモニタすることにより測定した。X軸の例を図4.5に示す。60 m/min

までの加速とその速度から停止するまでの時間は、速度変動時の振動を抑制するために有効な一次遅れフィルタによる遅れを含めても0.11 sであり、最大加速度 10 m/s^2 の設計仕様を満足していることが読みとれる。このときの送り駆動系の位置ループゲインは 38 s^{-1} であるが、電流フィードバックのオーバーシュートもほとんどなく、安定に動作している。この位置ループゲインの値は従来機の 33 s^{-1} に比べて高く、より高速な補間を行っても補間精度の低下を小さくできると期待される。そこで直径35 mmの円弧を送り速度6 m/minで真円補間行わせてみた。その時の補間精度を図4.6に示す。このデータは光学式の平面スケール（HEIDENHAIN 製）でテーブルと主軸端との相対位置を計測して得られたものである。真円誤差は(a)のエンコーダによるセミクロズドループ運転では $7.1 \mu\text{m}$ 、(b)の光学スケールによるフルクロズドループ運転では $5.0 \mu\text{m}$ である。以上の実測により、試作されたマシニングセンタは設計仕様を満足していることが確認されたと同時に、高い送り速度でも従来機と同等の加工精度を維持できる能力があることも確認された。

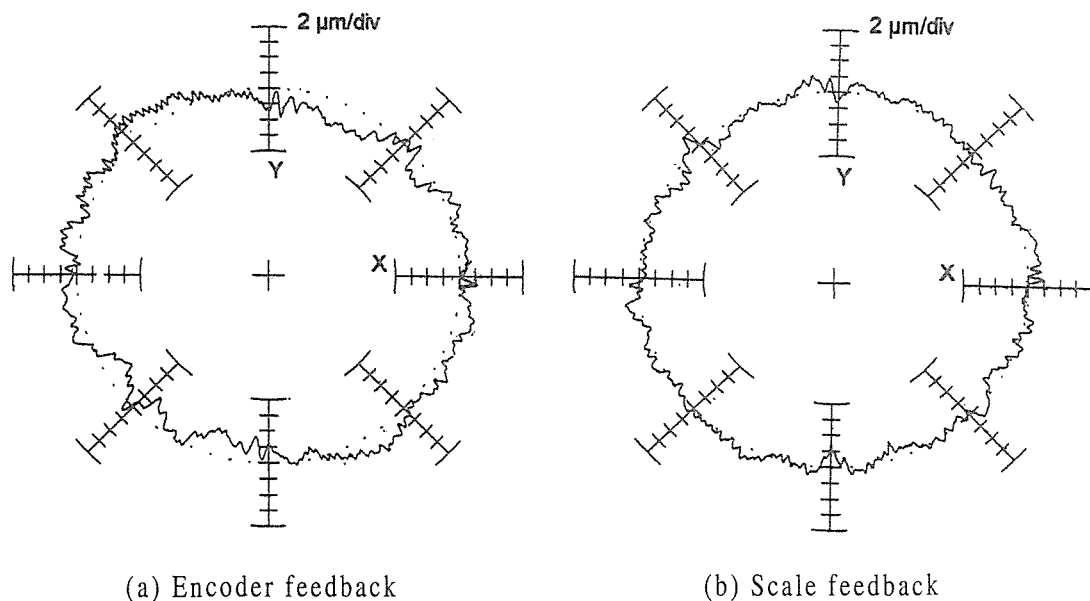


Figure 4.6 Accuracy of circular interpolation

4.4.2 加工能力の評価

直径 80 mm, 4 刃のフェイスミルでアルミニウム合金 (A5052) を切削したところ, 最大切削除去量は従来機では $3,000 \text{ cm}^3/\text{min}$ であるのに対して試作 MC では $8,000 \text{ cm}^3/\text{min}$ であった. 切削除去量と主軸負荷との関係を図 4.7 に示す. 主軸の負荷は主軸アンプからの電流フィードバック信号をモニタして得られた値である. 図 4.7 から切削除去量に比例して主軸負荷が増大していることがわかり, 主軸の高出力化が切削能力の向上に不可欠であるといえる. さらに上記のアルミニウム合金を直径 20 mm, 4 刃の超硬合金製エンドミルを使用し, 30,000 rpm で切削したところ, 最大送り速度 60 m/min での切削が可能であることも確認した.

このように従来機に比べて高い性能を持つにも関わらず, 表 4.1 で示したように所要床面積や機械質量などの増加はほとんどなく, またコスト的にも妥当なものとなっている.

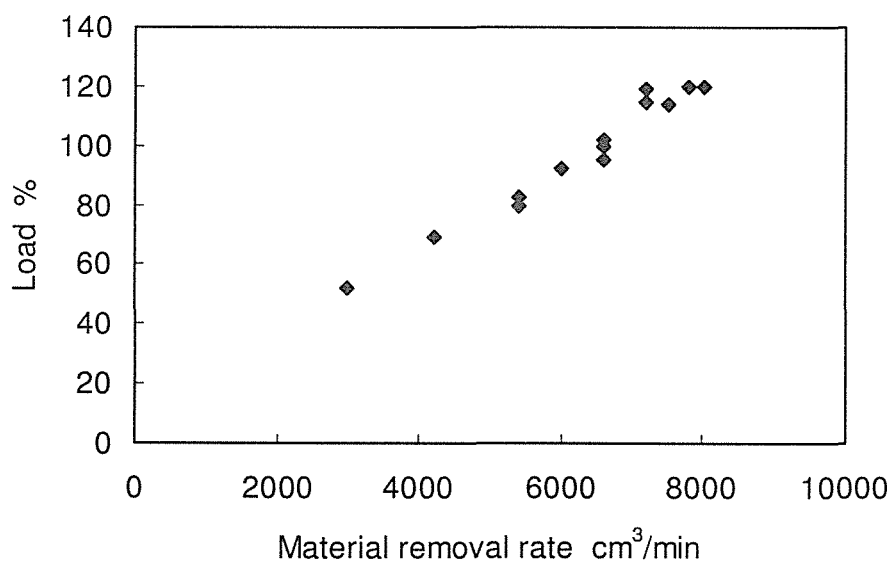


Figure 4.7 Cutting capacity of face milling

4.4.3 加工時間の検証

図 2.6 の部品を試作 MC により実際に加工して各動作時間，サイクルタイムを測定し，第 3 章のシミュレーション結果（図 3.5 の Case 5）と比較した．この結果を図 4.8 に示す．実加工に対するシミュレーションでの各動作時間の予測誤差は 1~4 % と小さく，サイクルタイムも実加工での 378 s に対してシミュレーションでは 380 s となっていることがわかる．このように試作した MC はほぼシミュレーションで予測された時間で動作していることより，本研究で開発したサイクルタイムシミュレータは十分な予測精度を持つと言える．したがって今後，さらに高性能の MC を開発する際にもこのサイクルタイムシミュレータを使用することで有用な予測情報，設計指針を得ることが可能であると考えられる．

次に試作 MC の生産性を検証するために，図 2.6 の航空機部品の従来機による実加工結果（図 2.7）との比較を図 4.9 に示す．サイクルタイムは従来機での 1155 s に対して試作機では 378 s と約 1/3 になっているのが確認できる．これは

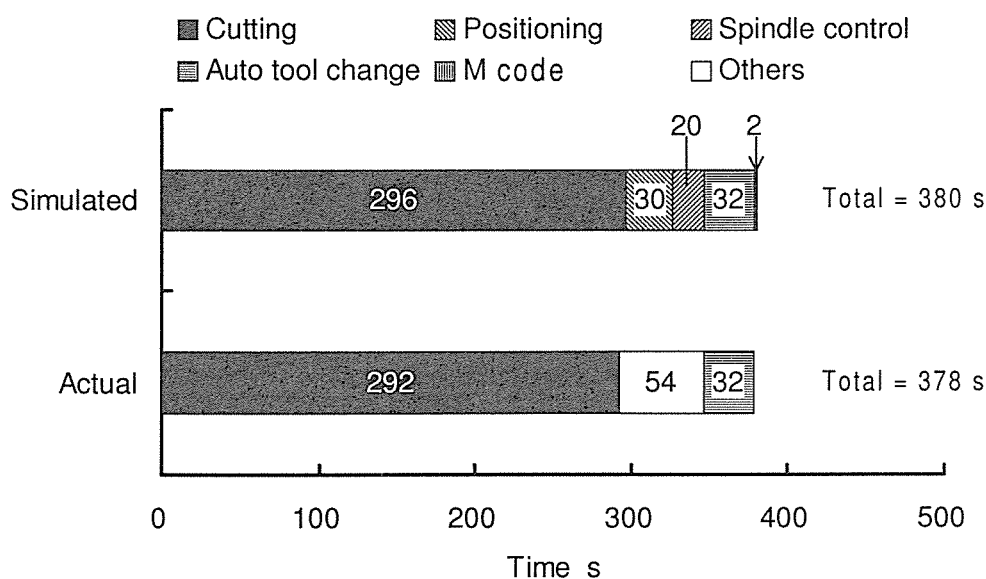


Figure 4.8 Evaluation of simulator

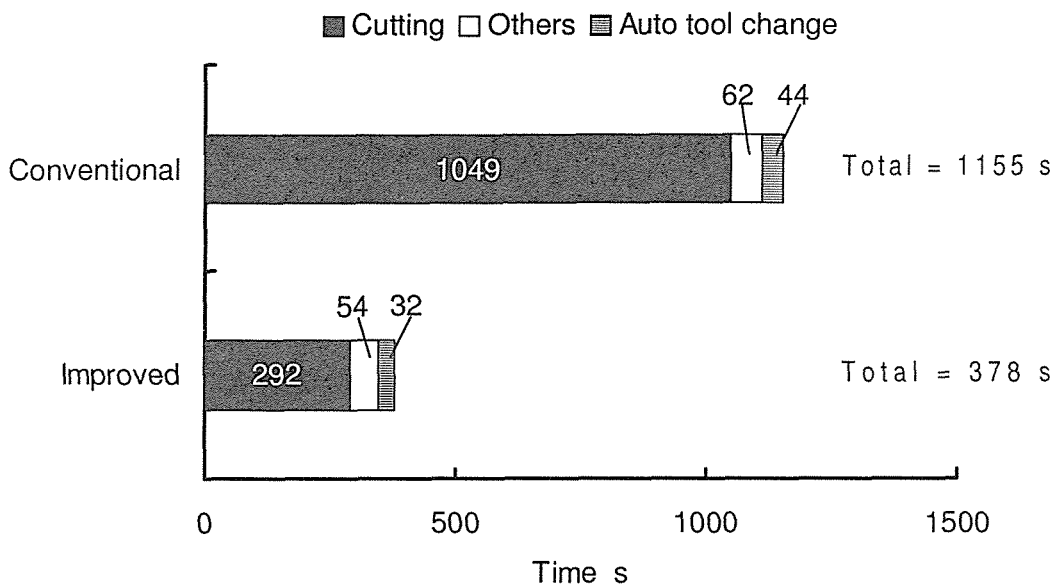


Figure 4.9 Cycle time comparison of improved vertical machining center

高速切削を重視した開発方針により切削時間が1,049 sから292 sへと72 %も短縮されたことが大きく寄与している。またATC時間も送り駆動系の高速化により28 %短縮されている。しかしながら“その他”として示されている位置決めと主軸の起動停止時間の合計は10 %強しか短縮されていない。これは送り駆動系の高速化による位置決め時間の短縮が、主軸最高回転数の増加による起動停止時間の増大により相殺されたためである。

4.5 結言

3章で行った小物航空機部品に関するサイクルタイム分析の結果を踏まえて、高速化による高能率MCの機械仕様を選定した。次にこの仕様に基づいて実機を試作し、性能を評価した。その結果を次にまとめる。

- (1) シミュレーション結果に基づいて、切削速度の向上をめざした主軸の最高回転数30,000 rpm、最大出力54 kW、送り駆動系の最大送り速度60 m/min、加速度10 m/s²の立形マシニングセンタを設計、試作した。

- (2) 試作MCは、設計仕様を満足し、高い送り速度でも従来機と同程度の精度で加工することが可能であり、サイクルタイムを従来機に比べて1/2～1/3に短縮することが可能であることが確認された。したがって、試作MCは高い生産性を有するとともにコスト的にも妥当なものであることが確認された。
- (3) 開発されたシミュレータと試作MCとによるサイクルタイムを比較した結果、シミュレーションの精度は3～4%程度であることが確認された。したがって第2章で開発されたシミュレータは、高速切削の適用を想定した高速高加減速MCの仕様選定に有効な開発ツールとなることを確認した。

第5章 自動車部品加工用高速高能率 マシニングセンタの開発

5.1 緒言

本章では第3章のシミュレーション結果を踏まえ、高速加工の適用を前提とし、自動車部品を加工対象ワークとする高速マシニングセンタ(MC)の開発について述べる。一般に自動車部品の多くは軽量化と被削性に優れるアルミニウム鋳物である。これらは素材の歩留まりの向上と切削能率の向上を図るために、取り代が小さくかつ均質になるように管理されているので、切削負荷は小さくかつ切削量も少ない。その結果、自動車部品の加工ではドリル加工やタップ加工などの点加工が主体となるので、高速加工によって切削時間の短縮を図るだけでなく、同時に位置決め時間の短縮や工具交換時間の短縮を図る必要があることが第3章のサイクルタイム分析で示されている。したがって、本章で開発するMCは非切削時間の短縮に主眼を置き、利用可能な技術とそのコストを考慮して生産性が向上すると考えられる機械仕様を選定し、これに基づいたMCを試作する^{44, 45)}。さらに、試作されたMCを用いて実際に加工を行い、サイクルタイムを従来のMCの場合と比較する。

5.2 目標仕様の選定

一般に自動車部品のような大量生産品を大企業で量産加工する場合には、自動化による省人化、無人化が図られる。このために切り屑処理が比較的容易でシステム化し易い横形MCが選定される。その際には、汎用MCに比べて柔軟性よりも設備コストが重視されることがある。

そこで、第3章の図3.10, Case 5の機械仕様を満たすような高能率でしかも比較的低価格の横形MCを試作することにした。

5.2.1 主軸の仕様選定

自動車部品の加工は、点加工が主体であり、切削負荷も小さくことから、主軸の最高回転数および出力を従来の汎用MCと同程度の15,000 rpm, 18 kWにする。しかしながら非切削時間を短縮するためには主軸の起動停止時間を短縮する必要がある、1.5 s以下とすることとした。ドリル加工の際の切りくず排出性を向上させる手段として有効な高圧クーラントスルースピンドルを採用した。ロータリジョイントのV-P値の制限から最大圧力を7.0MPaとした。

5.2.2 送り駆動系の仕様選定

送り駆動系については、3節での考察から加速度を10 m/s²程度、最大送り速度を60 m/minとすることとした。

5.2.3 ATCの仕様選定

自動車部品の加工では、サイクルタイムに占める工具交換(ATC)時間の割合が大きい。そこで、ATC機構は、ATCアームによる高速ATC機構を採用することとし、ATC時間(T-T)を1 s以下とすることとした。

5.3 機構設計

5.2節で決定された試作MCの開発目標とする機械仕様を表5.1に示す。

5.3.1 主軸の機構設計

主軸には大きなラジアル方向の切削負荷が作用しないので、スピンドル径を55 mmとしてスピンドルの低慣性化を図り、起動停止時間の短縮を目指し

Table 5.1 Machine specifications of improved horizontal machining center

Specifications	Improved MC
Machine type	Column traveling horizontal
Table Size	400 mm×400 mm
Load capacity	250 kg
Main spindle	
Rotational speed	35~15,000 rpm
Motor power	21 kW at peak
Acceleration time	1.3 s (0~15,000 rpm)
Feed drives	
Travel	X, Y, Z: 510 mm
Rapid traverse rate	X, Y, Z: 60 m/min
Cutting feedrate	0~60 m/min (with shape compensation function)
Acceleration	10 m/s ²
ATC time (T-T)	1.3 s
Machine Weight	7,600 kg
Floor space	1,600 mm × 4,070 mm

た. スピンドル径 55 mm, 最高回転数 15,000 rpm の主軸の dn 値は 82.5 万と小さく, 保守性を考慮すれば, グリース潤滑が選定されるのが妥当であるが, 切削水の侵入による軸受の故障を防ぐためにオイルアンドエアー潤滑とし, ドリル加工の際に生ずるスラスト方向の切削負荷に対して剛性を高くするために定位置予圧方式とすることにした.

5.3.2 送り駆動系の設計

XYZ各軸の送り駆動系の機構を検討した. リニアサーボモータを採用すれば第3章でシミュレーションしたような高い送り速度, 加速度の性能が期待されるがコストの上昇も伴うので, 第4章で開発した立形MCと同様にハイリードボールねじを使用して従来機と同程度の疲労寿命を確保しつつ所要の最大送り速度 60 m/min を実現した (ボールねじの径を 40 mm, リードを 2 mm とし, これを最高 3,000 rpm で駆動する). さらに加速度 10 m/s² の要求仕様を満たすために, 低慣性高出力 AC サーボモータを採用すると同時に負荷イナーシャを低減するために, ボールねじを可能な限り短くすると同時に, コラム

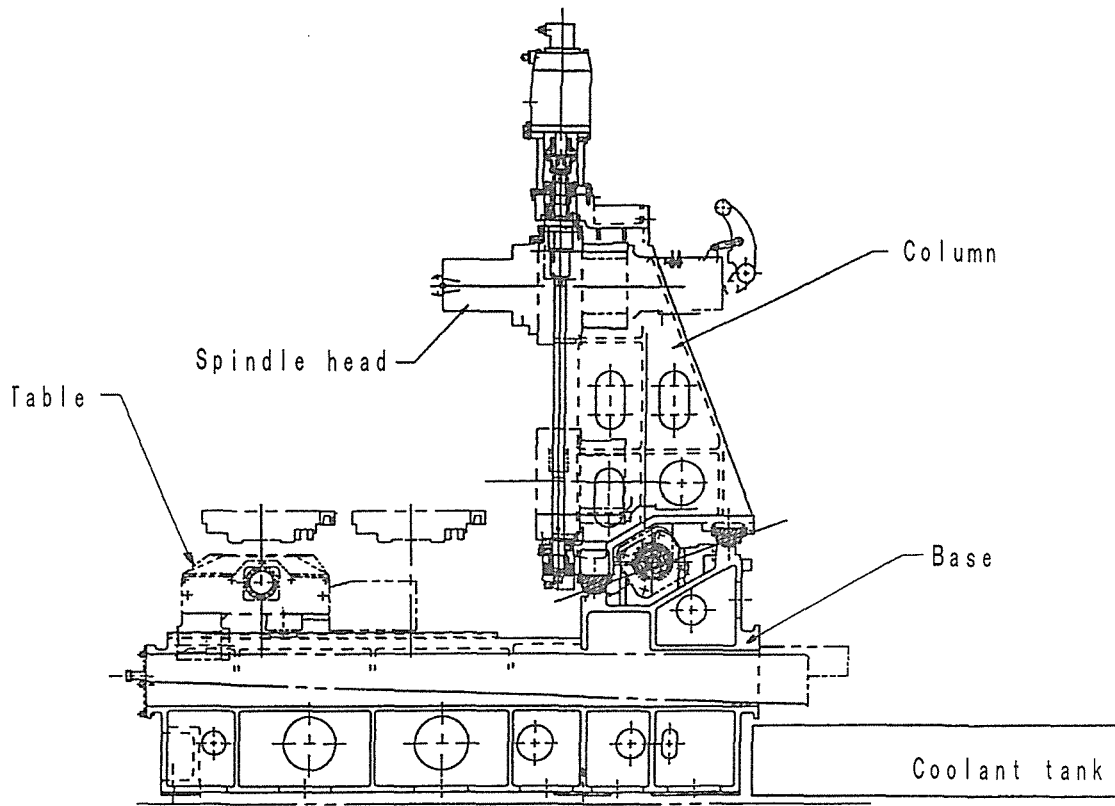
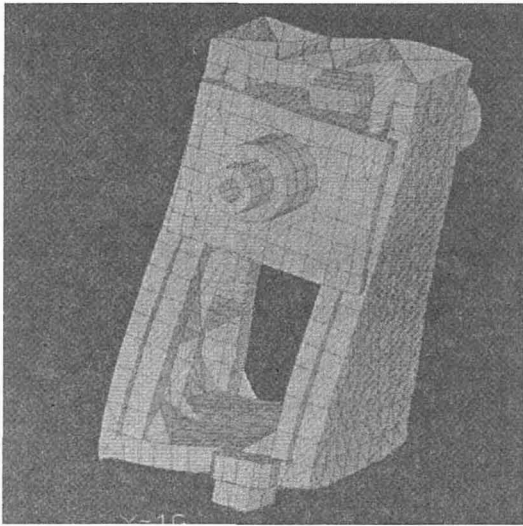


Figure 5.1 Structure of horizontal machining center

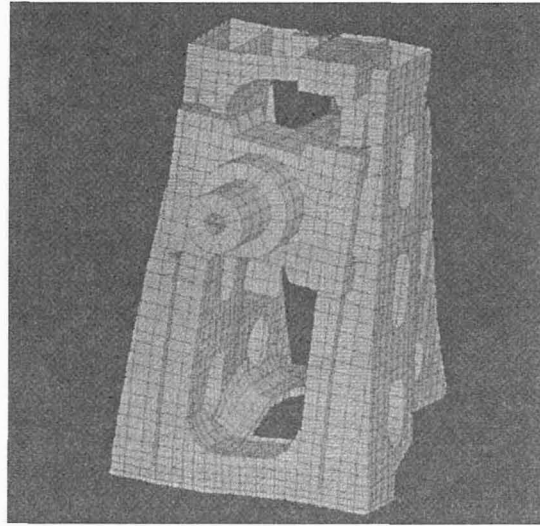
などの移動する構造体の軽量化を図った。図5.1に機械構造を示すが、コラムを駆動するX軸のボールねじを主軸頭と干渉しない範囲で上方に配置することでコラム下部の重量を低減している。

送り駆動系のスラスト方向の剛性を高めるために、ボールねじの支持方式を両端固定とした。また有限要素法による構造解析（以下FEM解析とする）を利用してコラム、ベースの支持軸受ハウジング組み付け部位の高剛性化を図った。

送り駆動系の高速化により、質量の大きな主軸、コラムやテーブルが従来機の3倍以上の加減速で運動することになるので、慣性力で特にコラムの変形量が増大して従来機と同等の精度では加工できなくなると考えられる。図5.2(a)は従来の設計手法によるMCの構造でコラムがX軸方向に 10 m/s^2 の加速



(a) Conventional Structure



(b) Improved Structure

Figure 5.2 Structure of horizontal machining center analyzed by FEM ($\times 1000$)

度で加減速した際の変形をFEM解析した結果を示しており、かなりの変形の生じることがわかる。そこで主軸頭、コラム、テーブル、ベースなど基礎部品のFEM解析を行って、XYZ各軸が加減速する際の主軸先端とテーブルとの相対変位を抑えて従来機と同程度の加工精度を保てるように肉厚やリブ配置、鋳抜き穴の形状寸法を変更した。このような補強を行った結果を図5.2 (b)に示すが、主軸端のテーブルとの相対変位が従来機に比べて半減しているのがわかる。このようなFEM解析を繰り返し行って、従来機と同程度の質量で、しかも従来機に比べて高い加速度が生じる場合でも従来機と同程度の精度が維持できるような構造を選定した。また、コラムが高い加速度で動作すると機械全体がロッキングモードの振動を生ずると考えられるので、ベースを設置面に固定する基礎部品についてもFEM解析し、固定部品の剛性を向上させた。

先に述べたように自動車部品の加工では位置決め動作が頻繁に行われ、その際にボールねじは最高回転数で駆動されることからボールねじの発熱による伸びが大きくなると予想される。ボールねじの伸びが大きくなると位置決

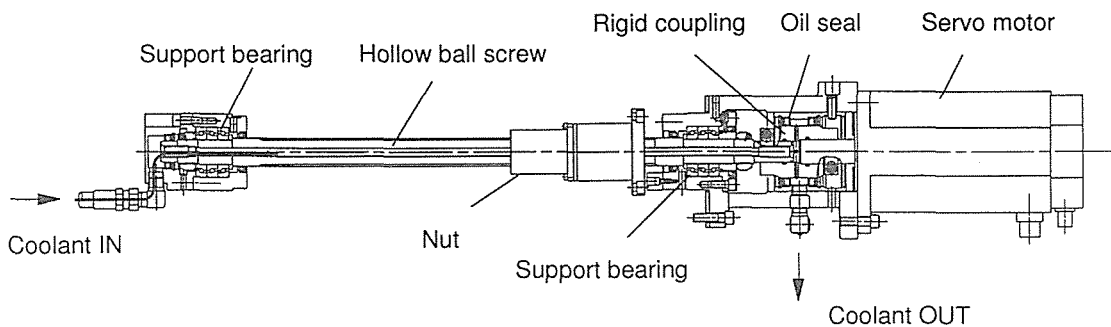


Figure 5.3 Cooling system of ballscrew

め精度が低下するだけでなく、ボールねじの支持軸受に大きなスラスト力が作用し、支持軸受の寿命が著しく短くなる恐れがある。そこで、おねじに内径 12 mm の貫通穴を開けた中空ボールねじを採用し、図 5.3 に示す回路でボールねじおよび支持軸受部を冷却するようにした。この試作機では冷却油の回収をリジッドカップリング部で行うようにすることで、ボールねじ長の増大を抑え、スラスト剛性の低下を防ぐように配慮した。このようなボールねじ軸芯の冷却を行うことでサーボモータの発熱をボールねじに伝えない効果も期待することができる。

5.3.3 ATC 装置の設計

ATC 装置はローラギアカムを簡易サーボモータで駆動する方式を採用し、アンクランプ機構には油圧シリンダではなく Y 軸の移動に同期するカム方式を採用して ATC 動作の高速化を図ることにした。

5.4 性能評価

5.3 節の設計に基づいて試作された高速高加減速横形 MC を図 5.4 に示す。

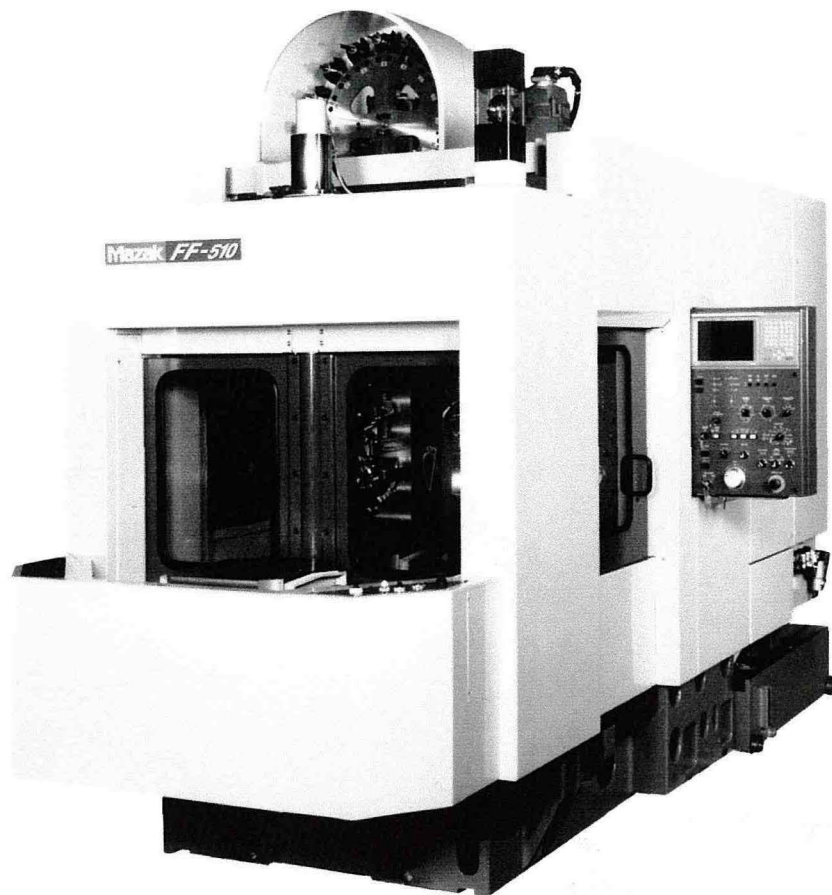


Figure 5.4 Improved horizontal machining center

5.4.1 目標仕様の確認

試作MCが目標とした設計仕様を満足していることを確認するために、まず試作MCの主軸アンプ部で速度フィードバックをモニタして主軸の起動停止時間を測定した。その結果を図5.5に示す。主軸が停止状態から最高回転数の15,000 rpmに達するまでの時間は1.2 sであり、最高回転数から完全に停止するまでの時間は1.4 sであった。次に送り駆動系の加減速時間をサーボアンプ部で速度フィードバック信号をモニタして測定した。そのときのX軸の結果を図5.6に示す。この図より停止状態から最大送り速度である60 m/minまで加速、または最大送り速度から停止するのに要する時間は0.11 sであり、速度変化時

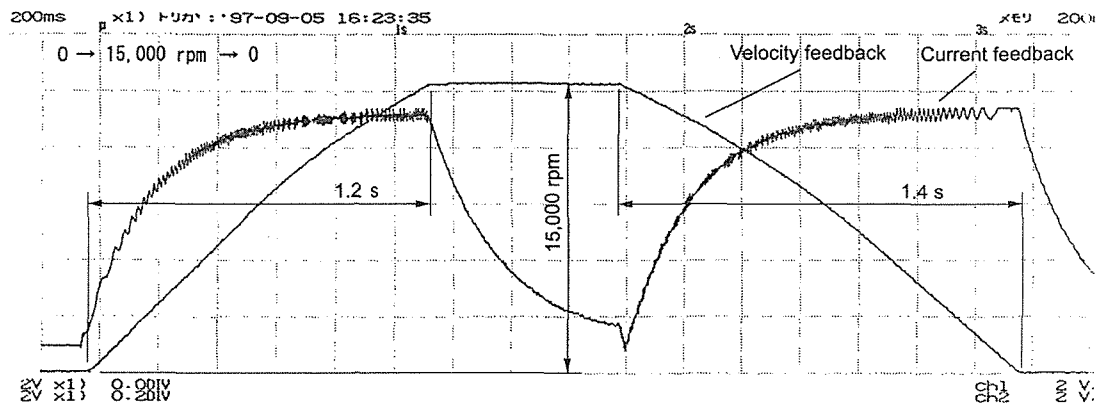


Figure 5.5 Acceleration of main spindle

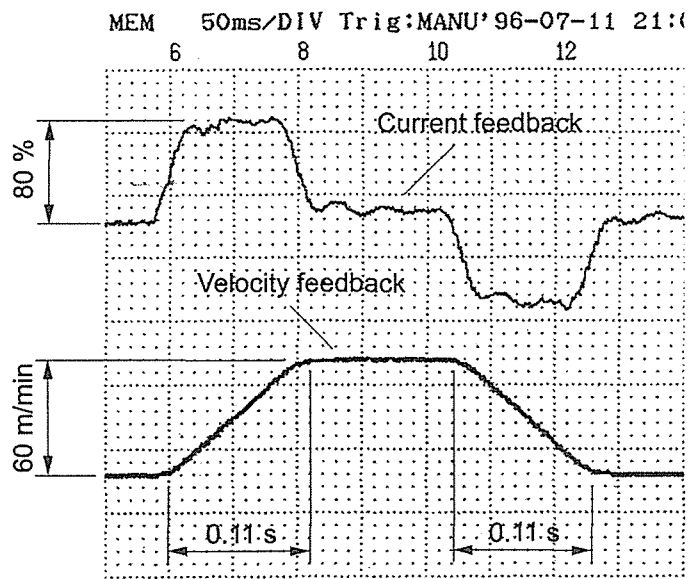


Figure 5.6 Acceleration of feed drive

の一次遅れフィルタによる遅れを含めても当初の目標仕様を満足しているといえる。またこのときの位置ループゲインは従来機の 33 s^{-1} に対して 47 s^{-1} であり、機械剛性の向上効果を確認することができたと同時に、円弧補間など従来のトランスファーマシンラインなどに採用されている専用機では不可能な加工を適用することで切削時間の短縮が可能になると期待することができる。

次にボールねじの軸芯冷却の効果を検証するために図 2.8 と同様の自動車部品が連続加工された場合のノックピン穴の位置精度を測定した。図 2.8 に示すような自動車部品は組立の際、部品相互の相対位置を合わせるためにノックピンが打たれる。またノックピン穴は、加工時においても被削材を治具に位置決めするのに使用される。このためノックピン穴の位置精度が要求される（測定した被削材に要求されるノックピン穴の位置精度は X 軸方向，Y 軸方向それぞれ約 200 mm のピッチに対して $\pm 0.05 \text{ mm}$ の公差内で加工されなければならない）。

機械は土曜日と日曜日を除いて 24 時間稼働であるが、工場温度は特別に管理されていない。約 3ヶ月間にわたり加工して抜き取り測定を行った。その結果を図 5.7 に示す。X 軸方向，Y 軸方向ともに公差内で加工されていることが確認できる。

自動車部品などを量産する場合には、加工設備がどの程度安定した精度で

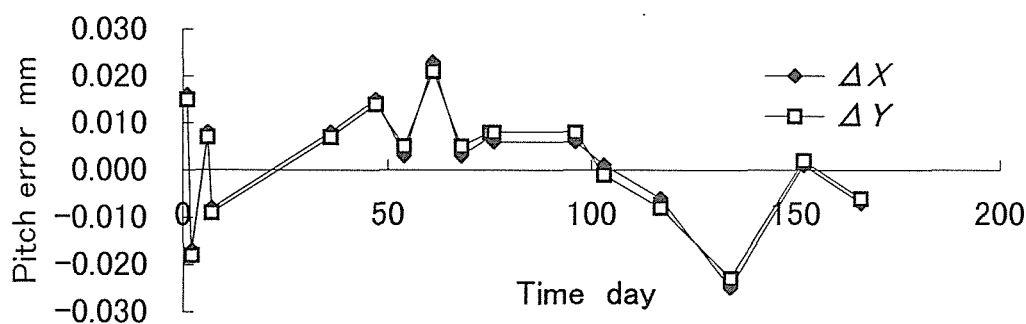


Figure 5.7 Machining accuracy of improved horizontal machining center

加工できるかが課題であり、これを表すものとして工程能力 C_P 値が用いられる。 C_P 値は、

$$C_P = \frac{e}{6\sigma} \quad (5.1)$$

で表される。ここで e は部品図に図示された公差、 σ は実加工部品の測定値から算出される標準偏差である。

寸法のばらつきが正規分布するものと考えると C_P 値が1の場合には、加工されたものの99.7%が公差内であり、 C_P 値が1.33の場合には、加工されたものの99.994%が公差内であると言える。一般的に自動車部品の加工現場では C_P 値1.33以上が求められ、これは10万個の加工を行って6個の不良品ができることを意味する。図5.7の測定結果から標準偏差を算出するとX軸方向は $0.0118 \mu\text{m}$ 、Y軸方向は $0.0117 \mu\text{m}$ であり、 $\pm 0.05 \text{ mm}$ の公差に対する C_P 値は、X軸方向、Y軸方向それぞれ1.41と1.43と十分な工程能力をそなえていることが確認された。これによってボールねじの軸芯冷却による熱変位の低減効果を確認することができた。

5.4.2 加工時間の検証

図2.8の自動車部品を試作MCにより実際に加工してサイクルタイムを測定し、3章のシミュレーション結果（図3.10のCase 5）と比較した。この結果を図5.8に示す。サイクルタイムは実加工での223 sに対してシミュレーションでは224 sとなっており、実加工に対するシミュレーションでのサイクルタイムの予測誤差は、1 sと小さいことがわかる。このように試作したMCはほぼシミュレーションで予測された時間で動作していることより、サイクルタイムシミュレータは第4章とは異なる機械仕様のMCについても正しく性能を予測したことになる。したがって本章でもサイクルタイムシミュレータの設計支援性能が確認された。

次に試作MCの生産性を検証するために、図2.7の自動車部品の従来機による実加工結果（図2.9）との比較を図5.9に示す。サイクルタイムは従来機での

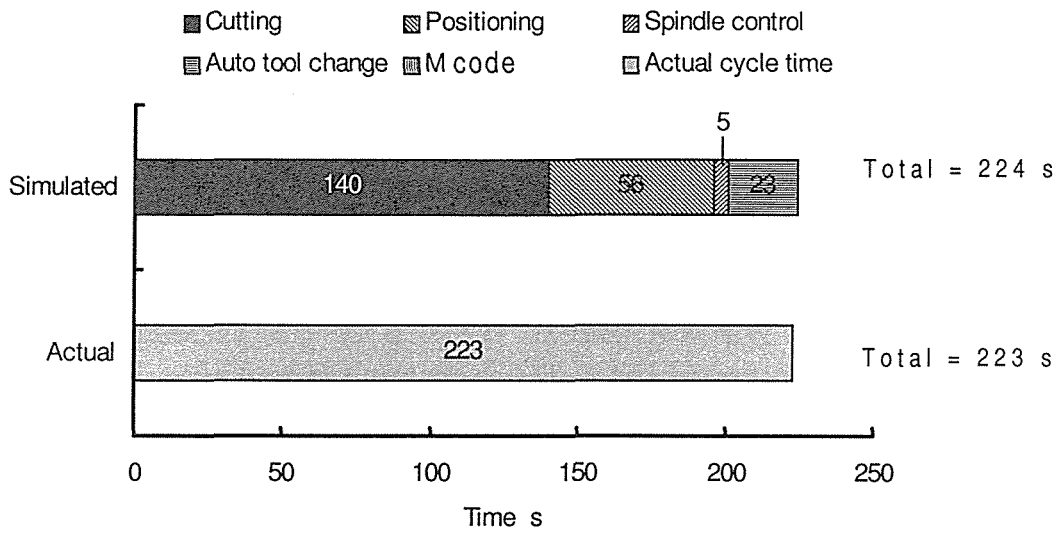


Figure 5.8 Evaluation of simulator

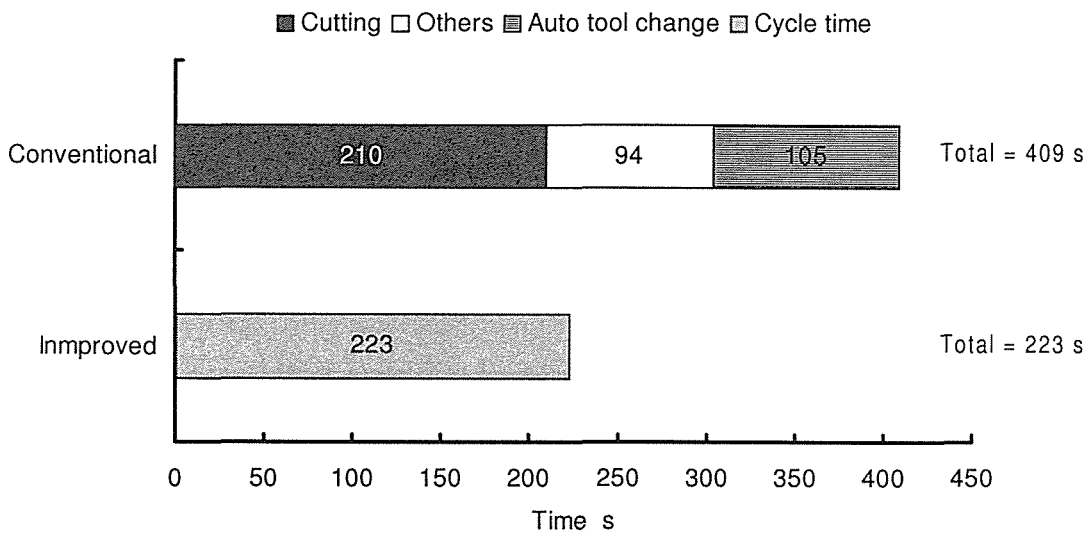


Figure 5.9 Cycle time comparison of improved horizontal machining center

409 sに対して試作機では223 sと45 %短縮されているのが確認できる。これは非切削時間の短縮を考慮した開発方針により位置決め時間および工具交換時間が短縮されたことが大きく寄与していると考えられる。

5.5 結言

3章で行った自動車部品に関するサイクルタイム分析の結果を踏まえて、高速化による高能率MCの機械仕様を選定した。次にこの仕様に基づいて実機を試作し、性能を評価した。その結果を次にまとめる。

- (1) シミュレーション結果に基づき、位置決め時間の短縮をめざして主軸の最高回転数15,000 rpm、最大出力18 kW、送り駆動系の最大送り速度60 m/min、加速度10 m/s²、ATC時間(T-T) 1.3 sの横形MCを設計、試作した。
- (2) 試作MCは高速切削の適用と位置決め時間の短縮などの効果によってサイクルタイムを従来機に比べて1/2程度に短縮することが可能であり、高い生産性を有するとともにコスト的にも妥当なものであることが確認された。
- (3) 開発されたシミュレータと試作MCとによるサイクルタイムを比較した結果、シミュレーションの精度は3～4 %程度であることが確認された。したがって第2章で開発されたシミュレータは、高速切削の適用を想定した高速高加減速MCの仕様選定に有効な開発ツールとなることを確認した。

第6章 高速高能率切削加工の試み

6.1 緒言

近年，さまざまな機械加工分野で生産要求の多品種化にともなって柔軟性に優れるマシニングセンタ (MC) が，多く導入されるようになってきている．工作機械は本来，加工対象とするワークや加工工程に合わせて開発されてきた¹⁾．これに対してMCは，いくつかの加工機能を集約して持つことで高い柔軟性を備え，かつワークの着脱回数を減らすことで，加工リードタイムの短縮や加工精度の向上を可能にした工作機械であり，特定の加工対象に合わせて開発されたものではない．しかし最近では厳しい生産環境の中でMCにおいても機械加工コストの一層の低減が求められるようになった．したがってMCには柔軟性と生産性という相反するものが要求されていることになる．そこで工作機械メーカーでは，高速化，高精度化，複合化，操作性の向上，システム化，信頼性の向上などを図ることによる生産性のより高いMCの開発が行われている．

本研究では，第3章のサイクルタイム分析や第4章と第5章の試作MCによる加工評価から，MCの生産性を向上させるには切削時間の短縮が最も効果的であり，このために高速加工の適用が有効であることがわかった．そこで，本章では，代表的な工業材料であるアルミニウム合金，ねずみ鋳鉄ならびに炭素鋼について，第4章と第5章で開発した高能率MCを主に用い，基本的な加工法であるフェイスミル加工，エンドミル加工，ドリル加工およびタップ加工を試み，高速高能率切削の到達点を明らかにするとともに，加工技術からみたMCの生産性向上について考察する^{43, 46)}．

6.2 アルミニウム合金の高速加工技術

アルミニウム合金は、航空、宇宙、通信分野などで多用される圧延材と自動車などの量産分野で多用される鋳造材とに大別される。いずれも被削性が良く、高速切削を比較的容易に行うことができる。加工の点から見ると、航空宇宙分野では非常に多くの品種を小ロットで生産するために、ブロック材から所望の形状を削り出す方法が採られており、加工のほとんどをエンドミルによる加工が占める。一方、自動車部品などの量産部品は、加工コストを低減するために鋳造によるニアネットシェイプ化が図られ、取り代の管理もされていることから、フェイスミルやエンドミルによる加工は比較的少なく、部品を締結するためのドリル加工、タップ加工が主体となる。したがって、高速加工を適用する上で、対象ワークによって重視される工程が異なる。

6.2.1 高速フェイスミル加工

アルミニウム合金のフェイスミル加工には、一般的にK種超硬合金のインサートが用いられ、仕上げ面精度が要求される場合ではPCD（焼結ダイヤモンド）を超硬合金の台金にろう付けされたブレードが使用される。フェイスミルが回転するとインサートには $W_I = m_I r_I w^2$ の遠心力が作用する。ここで W_I はインサートに生ずる遠心力であり、 m_I はインサートの質量、 r_I はインサートの回転半径、 w はインサートの回転角速度である。従来のフェイスミルは、刃振れ調整やインサートの交換作業を容易にするためにインサートをくさびの摩擦で保持する機構が多く採用されている。このために従来のフェイスミルでは回転数5,000 rpm程度まで、あるいは周速1,000 m/min程度までしかインサートを保持することができなかった。しかしながらクサビ形状の工夫により周速3,000 m/minで切削できるアルミニウム合金専用のカッタが市販されるようになった。第4章で行った試作MCの最大切削能力評価では、 $\phi 80$ mm、4刃のカッタを12,000 rpmで回転させて周速3,000 m/min、送り速度20 m/minで切削することで、最大8,000 cm³/minの切削除去量を得ることができた。し

かしながら自動車部品などでは、素材のニアネットシェイプ化が図られており、切削除去量よりむしろ送り速度の向上が求められている。

そこで切削除去量の少ないアルミニウム合金のフェイスミル加工能率を向上させるために、周速3,770 m/minで使用できるカッタを使用して、送り速度の向上を試みた。このカッタは、超合金インサートの中心をボルトで固定する方式が採用されており、従来のクサビによるインサートの保持機構に比べて3倍以上の高速加工を可能にしている。このカッタ用いたフェイスミル粗加工の実験条件を表6.1に示す。第4章で試作されたMCを用い、 $\phi 80$ mm、6刃のカッタを15,000 rpm回転させて送り速度22.5 m/minで加工することができた。このように切削除去量が小さい加工分野では、高速主軸を有するMCに刃数が多くかつ高速回転可能なカッタを用いた高送り加工が有効である。

次にフェイスミルによるアルミニウム合金(A5052)の仕上加工の高速化を図るため、周速8,000 m/minでもPCDブレードを保持できるように開発されたカッタを使用して加工実験を行った。従来使用されるPCDブレードでは、比

Table 6.1 Experimental conditions for facemilling (rough) of aluminum alloy

Workpiece	Material	A5052P
	Hardness	-
	Size	500×470×100 mm
Machine	Type	Horizontal
	Model	Mazak FH-5800
Tool	Holder	BIG-BBT40-FMC25.4-60
	Diameter of cutter	$\phi 80$ mm
	Number of inserts	6
	Cat. No.	SANDVIK RA245-080J25.4-13M
	Insert	Carbide
	Cat. No.	SANDVIK RA245-12T3E-XL (H13A)
	Tool length	95 mm
Cutting conditions	Spindle speed	15,000 rpm
	Cutting speed	3,770 m/min
	Feedrate	0.25 mm/tooth
		22,500 mm/min
	Depth of cut	1.8 mm
Width of cut	55 mm	
Coolant		Used

重が炭素鋼の約2倍である超合金製の台金にPCDがロー付けされており、それだけ大きな遠心力を受けるので、インサートを保持するボルトの強度が課題になる。そこで、高速カッタでは、超合金にではなくSCM材を熱処理して製作された台金にPCDブランクをロー付けしたインサートが採用されている。また高速回転で使用する工具のアンバランス量も無視できなくなるので、まずホルダ単体でバランス調整したのち、刃振れ調整後のカッタを組み付けて再度バランス取りされてアンバランス量が0.2 gcm以下に調整されたものを使用した。このカッタを図6.1に示し、これを使用した加工実験の条件を表6.2に示す。φ125 mmのカッタを回転数20,400 rpm、周速8,000 m/minの高速で回転させることで、従来比3~5倍の送り速度20 m/minでも良好な切削面粗さを得ることができた。図6.2に加工面の粗さ曲線を示すが、 $R_y = 0.96 \mu\text{m}$ であった。このことからフェイスミル仕上加工の能率向上には周速の向上が効果的であることが確認できた。



Figure 6.1 Facemill cutter for ultra high-speed cutting of aluminum alloy

Table 6.2 Experimental conditions for facemilling (finish) of aluminum alloy

Workpiece	Material	A5052P
	Hardness	-
	Size	500×470×100 mm
Machine	Type	Horizontal
	Model	Mazak FH-5800
Tool	Holder	BIG-BBT40-FMA38.1-60
	Diameter of cutter	$\phi 125$ mm
	Number of inserts	8
	Cat. No.	Sumitomo KD965045
	Insert	PCD
	Cat. No.	Sumitomo FABR (DA150)
	Tool length	110 mm
Cutting conditions	Spindle speed	20,400 rpm
	Cutting speed	8,000 m/min
	Feedrate	0.13 mm/tooth
		20,000 mm/min
	Depth of cut	0.1 mm
Width of cut	87 mm	
Coolant	Used	

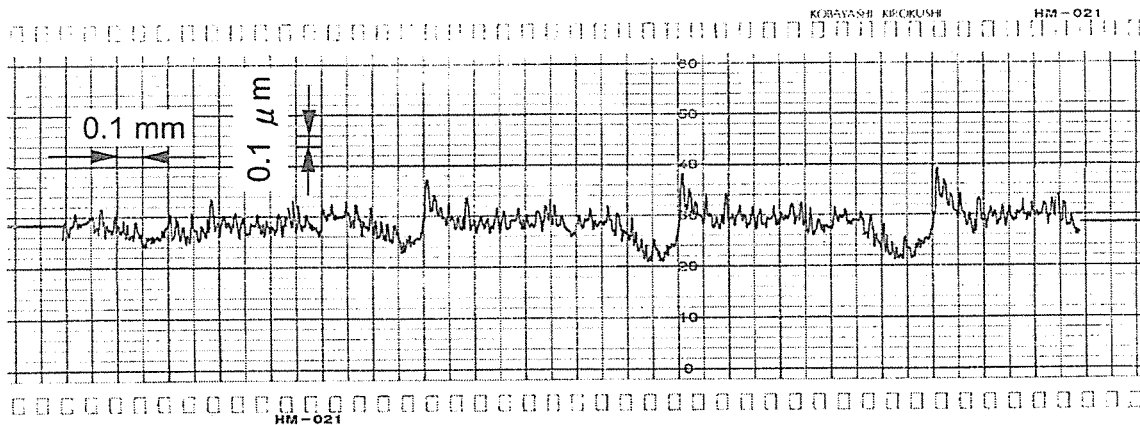


Figure 6.2 Surface roughness by facemilling (finish) of aluminum alloy

6.2.2 高速エンドミル加工

アルミニウム合金のエンドミル加工には、K種超硬合金のソリッドエンドミルもしくはインサートタイプのエンドミルが使用される。ソリッドエンドミルでは許容回転数が高速加工の制約になることはないが、アルミニウム合金は溶着し易いので、エンドミルは適当なチップポケットを持たねばならない。

送り速度 (m/min) を大きくするには、回転数を高くする方法と、刃数を増やす方法があることは、前節で述べたとおりであるが、エンドミルの加工では刃のねじれによって、エンドミルが工具ホルダから引き抜かれる方向に切削負荷が作用するので、工具ホルダには高い把握力が要求される。このことから一般的に把握力の大きなミーリングホルダが使用される。しかしさらに高い把握力が要求される場合にはシュリンクフィット（焼きばめ）ホルダが使用されることがある。

超硬合金のソリッドエンドミルを用いて行った高速加工条件の一例を表6.3

Table 6.3 Experimental conditions for endmilling of aluminum alloy with solid type endmill

Workpiece	Material	A5052P
	Hardness	-
	Size	275×400×30 mm
Machine	Type	Double column vertical
	Model	Mazak FJV-20UHS
Tool	Holder	BIG-HSK63A-MEGA20G-95M
	Diameter of cutter	φ20 mm
	Number of flutes	4
	Cat. No.	OSG MG-EMS
	Tool material	Solid carbide
	Tool length	135 mm
Cutting conditions	Spindle speed	25,000 rpm
	Cutting speed	1,557 m/min
	Feedrate	0.3 mm/tooth
		30,000 mm/min
	Depth of cut	3.7 mm
Width of cut	15 mm	
Coolant		Used

に示す。表 6.3 では直径 $\phi 20$ mm, 刃数 4 刃の超合金ソリッドエンドミルを用いて行った高速加工条件を示す。粗加工では回転数 30,000 rpm, 切削送り速度 30 m/min から 60 m/min で加工することができた。また主軸出力 0.75 kW (1 HP) あたり $70 \text{ cm}^3/\text{min}$ の切削除去量 (Material Removal Rate: MRR) を得ることができた。

このことからエンドミル加工を主体とする航空機部品の加工には主軸の高速化によって MC の生産性が一層高められると期待することができる。しかしながら、航空機部品の加工分野のようにエンドミルによって被削材の 95 % を切削除去するような加工に対して、切削負荷に耐えられるだけの主軸剛性を維持しつつ主軸の最高回転数の向上を図るには、軸受の回転速度に依存する制限がある。したがって現実的には制限された主軸回転数のもとで高能率な粗加工を行うためには、大きな径のエンドミルによる加工も行う必要がある。そこで、図 6.3 示す超合金インサートが小さなボルト 2 本で固定されており、インサートはラジアル方向のすくい角がポジティブになるように成型されている $\phi 32$ mm のエンドミルによる高速加工を試みた。この工具による切削条件を表 6.4 に示すが、主軸を 20,000 rpm で回転させ、しかもソリッドエンド



Figure 6.3 Insert type endmill for high-speed cutting of aluminum alloy

Table 6.4 Experimental conditions for endmilling of aluminum alloy with insert type endmill

Workpiece	Material	A5052P
	Hardness	-
	Size	150×350×80 mm
Machine	Type	Horizontal
	Model	Mazak FH-580
Tool	Holder	BT40
	Diameter of cutter	φ32 mm
	Number of inserts	2
	Cat. No.	STELLRAM-032R075-4
	Insert	Carbide
	Cat. No.	ZEC×32×R2.5
	Tool length	110 mm
Cutting conditions	Spindle speed	20,000 rpm
	Cutting speed	2,000 m/min
	Feedrate	0.3 mm/tooth
		12,000 mm/min
	Depth of cut	8~20 mm
Width of cut	6~32 mm	
Coolant		Used

ミルよりも大きな切り込みで加工することができ、従来からある最高回転数 25,000 rpm の高速主軸でも高能率な粗加工を行うことができた。

6.2.3 高速ドリル加工

アルミニウム合金は溶着し易いので、オイルホール付きのドリルを使用し、かつMCの主軸にはドリルにクーラントを供給できるクーラントスルースピンドルが不可欠である。さらに高圧のクーラントの圧力は切りくず排出に効果的であることが知られている。そこでアルミニウム合金のドリル加工では、4.5 MPa の高圧クーラントスルースピンドルを使用しすることにした⁴¹⁾。第4章で試作されたMCを用いて、表6.5に示すように送り速度 20 m/min で圧延アルミニウム合金 (A5052) へのドリル加工を試みた。この際に使用した工具を図6.4に示す。従来アルミニウム合金の加工に使用されているドリルは、切りくずの排出性を考慮して刃のねじれ角が大きなものが使用される。しかし

Table 6.5 Experimental conditions for drilling of aluminum alloy

Workpiece	Material	A5052P
	Hardness	-
	Size	150×150×50 mm
Machine	Type	Double column vertical
	Model	Mazak FJV-20UHS
Tool	Holder	BIG-HSK63A-MEGA20N-75M
	Diameter of cutter	$\phi 8.5$ mm
	Number of flutes	2
	Cat. No.	KENNAMETAL B411A08500
	Tool material	Solid carbide
	Tool length	62 mm
Cutting conditions	Spindle speed	20,000 rpm
	Cutting speed	534 m/min
	Feedrate	1.0 mm/rev
		20,000 mm/min
	Depth of cut	33 mm
	Width of cut	-
Coolant	Used (4.5 MPa through spindle)	

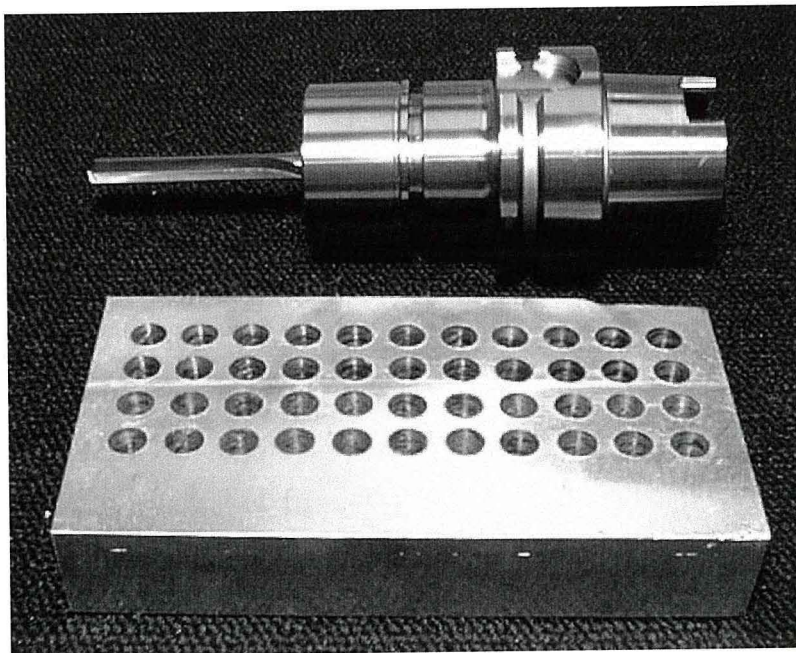


Figure 6.4 Drill for high-speed cutting of aluminum alloy

Table 6.6 Experimental conditions for drilling of cast aluminum alloy

Workpiece	Material	4CS
	Hardness	-
	Size	200×100×28 mm
Machine	Type	Double column vertical
	Model	Mazak FJV-20UHS
Tool	Holder	BIG-HSK63A-MEGA20N-75M
	Diameter of cutter	$\phi 8.5$ mm
	Number of flutes	2
	Cat. No.	KENNAMETAL B411A08500
	Tool material	Solid carbide
	Tool length	62 mm
Cutting conditions	Spindle speed	20,000 rpm
	Cutting speed	534 m/min
	Feedrate	1.5 mm/rev
		30,000 mm/min
	Depth of cut	33 mm
Width of cut	-	
Coolant	Used (4.5 MPa through spindle)	

ながら穴精度が求められる場合に使用される直刃のドリルでオイルホールつきの芯厚の厚いものを使用し，これに4.5 MPa程度の高圧クーラントを供給することで，20 m/minの送り速度で高速加工を行うことができ，しかも良好な穴精度を得ることが可能になる．同じ工具を用いて比較的切りくずが粉碎され易いアルミニウム鋳物に送り速度30 m/minの高速加工を試みた．このときの切削条件を表6.6に示す．ただしZ軸サーボアンプより速度フィードバックをモニタして実際の最大送り速度を測定したところ，穴深さの中心付近で26 m/minであった．したがって浅い穴を多数あける加工を行うような場合には，さらに高い送り駆動系の加速度が望まれる．

6.2.4 高速タップ加工

第4章，第5章で試作されたMCの主軸はいずれも高加減速化によって，主軸の位相とZ軸とを同期させながら4,000 rpmまで9回転で起動または停止することが可能になった．その機能を活用することで表6.7に示すように，アルミニウム合金を対象に一般的に使用されるハイスのタップを用いたM10の加

Table 6.7 Experimental conditions for synchronized tapping of aluminum alloy

Workpiece	Material	A5052
	Hardness	-
	Size	275×400×30 mm
Machine	Type	Double column vertical
	Model	Mazak FJV-20UHS and FF-510
Tool	Holder	BIG-HSK63A-MEGA13N-60M
	Diameter of tool	M10
	Number of flutes	2
	Cat. No.	OSG US-AL-SFT
	Tool material	High speed steel
	Tool length	110 mm
Cutting conditions	Spindle speed	3,600 rpm
	Cutting speed	110 m/min
	Feedrate	1.5 mm/rev
		5,400 mm/min
	Depth of cut	20 mm
Width of cut	-	
Coolant		Used

工においては、最大周速 110 m/min で同期タップ加工を行うことができた。

タップの加工工程は、下穴ドリルにハイスのドリルを使用する場合には、スポットドリルによるもみ付けと面取り、下穴ドリル、タップの順であり、下穴ドリルに超硬合金ドリルを使用する場合には、下穴ドリル、面取り、タップの順に加工される。このように通常のタップ加工では工具交換を必要とするので、主軸の加減速制御時間と工具交換時間が長くなる。そこで、ドリルにタップ機能を複合させることでATC回数を減少させて生産性の向上をねらった工具が市販されるようになった。このような工具を用いるときの工具軌跡を図6.5の(a)に示す。この工具による加工は、まずドリルと同様の工具軌跡で穴開けと穴入り口の面取りを同時に行った後、穴底から上方に向かってヘリカル補間を行うことでめねじを創成される。この加工を表6.8に示す切削条件で行った。

これに対して、エンドミルにタップ機能を複合させた工具も市販されている。この工具は、図6.5の(b)に示すように次のような動作でタップを下穴加工無しで行うことができる。まず穴の入り口をスパイラル補間し、エンドミ

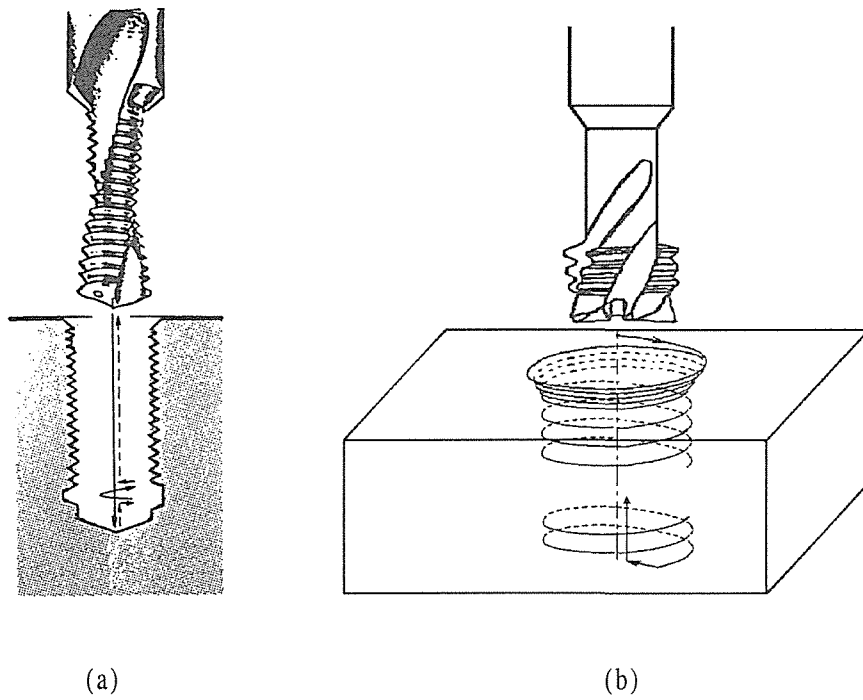


Figure 6.5 Tool path of integral tapping

Table 6.8 Experimental conditions for integral tapping Figure 6.5 (a) of aluminum alloy

Workpiece	Material	A5052	
	Hardness	-	
	Size	130×130×35 mm	
Machine	Type	Double column vertical	
	Model	Mazak FJV-20UHS and FF-510	
Tool	Holder	BIG-HSK63A-MEGA20N-75M	
	Diameter of cutter	M6	M10
	Number of flutes	2	2
	Cat. No.	EMUGE GF432206.	EMUGE GF432206.
	Tool material	Coated carbide	Coated carbide
	Tool length	-	-
Cutting conditions	Spindle speed	19,098 rpm	11,234 rpm
	Cutting speed	300 m/min	300 m/min
	Feedrate	0.2 / 0.1 mm/rev	0.36 / 0.1 mm/rev
		3,819 / 1,909 mm/min	3,913 / 1,123 mm/min
	Depth of cut	14.6 mm	26 mm
Width of cut	-	-	
Coolant	Used (4.5 MPa through spindle)		

ル先端のチャムファ部で面取りを行い、次にヘリカル補間によって穴開けとねじの創成を同時に行う。穴底に達したら、穴中心に工具を移動させてR点復帰する。これは工具メーカーの推奨パスと異なり、時間の短縮かつ高品位化を図ることができる。またドリルを用いる従来工法に比べて、座面の盛り上がりを生じなくてすむ。そこで、この工具を用いて表6.9に示す切削条件による加工を試みた。

上述の2種類の工具によると従来のドリル、タップなどを用いて10個のM6を連続して加工した場合と10個のM10を加工した場合の加工時間を図6.6に示す。図6.5(a)のタップ加工は従来加工の工具交換時間を含むサイクルタイムに比べて、約1/4のサイクルタイムで加工することが可能であり、また図6.5(b)で示した加工方法では従来のものに比べて約1/2のサイクルタイムで加工することが可能である。

ただし図6.5の(a)の加工方法では、タップ穴の有効ねじ深さは、工具形状の面取り部の位置で決められているので、深さが異なると別の工具を使用しな

Table 6.9 Experimental conditions of for integral tapping Figure 6.5 (b) of aluminum alloy

Workpiece	Material	A5052	
	Hardness	-	
	Size	130×130×35 mm	
Machine	Type	Double column vertical	
	Model	Mazak FJV-20UHS and FF-510	
Tool	Holder	BIG-HSK63A-MEGA20N-75M	
	Diameter of cutter	M6	M10
	Number of flutes	4	4
	Cat. No.	REIME 4.5×16×1	REIME 7.8×26×1.5
	Tool material	Coated carbide	
	Tool length	-	-
Cutting conditions	Spindle speed	21,220 rpm	12,000 rpm
	Cutting speed	300 m/min	300 m/min
	Feedrate	0.17 mm/rev	0.35 mm/rev
		3,607 mm/min	4,200 mm/min
	Depth of cut	12 mm	20 mm
Width of cut	-	-	
Coolant	Used (4.5 MPa through spindle)		

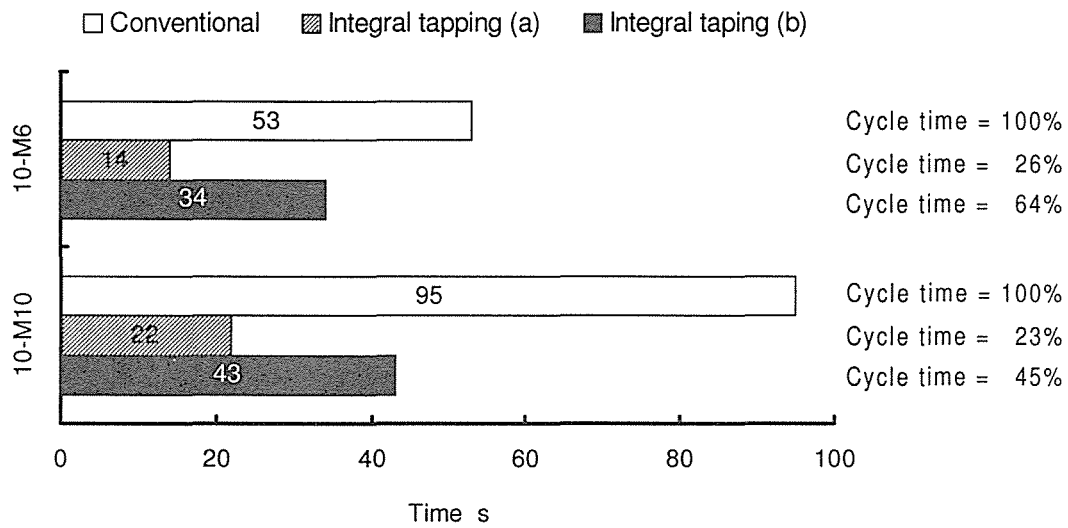


Figure 6.6 Cycle time comparison of integral tapping of aluminum alloy

ければならぬ。またねじ部をヘリカル補間で加工する際に、工具の刃長全体が穴側面に当たるのでビビリ易い。したがって、 L/D の2倍以下の穴深さに使用が制限される。これに対して従来の加工方法は上述の加工方法と比べて加工時間は長いものの、同じ工具で任意の深さの加工を行えることが利点である。

また図6.5 (b)の加工法では、機械の送り駆動系に0.7 G程度の加速度が作用している。したがって、この加工をさらに高速に行えるようにするには、主軸の回転数の向上もさることながら、送り駆動系の最大加速度の向上と補間精度（追従誤差またはドループ量の低減）が必要である。

6.3 鋳鉄の高速加工技術

自動車部品や工作機械など産業機械部品によく使用される、ねずみ鋳鉄の高速加工を試みた。これらは、炭素鋼に比べて被削性が良く、しかも切りくずが粉碎されるので処理が容易である。

6.3.1 高速フライス加工

ねずみ鋳鉄の高速加工には、CBNが適しており、周速1,500 m/minで加工すれば最も長い工具寿命が得られることがわかっている^{18, 19)}。しかしここでは、工具寿命を優先せず、どの程度までの高速加工が可能であるかについて知るためにさらに高い切削速度の加工を試みた。

ねずみ鋳鉄の高速フェイスミル粗加工を第4章の試作MCにより、表6.10に示すようにSi₃AlON (Si₃N₄とAl₂O₃を合成したセラミックス素材)のインサートを用いて主軸回転数5,000 rpm、周速1,200 m/min、送り速度5 m/minで加工した。第4章で試作されたMCの主軸モータの出力特性は、主軸モータの熱容量の制限から基底回転数が10,000 m/minである。このことからこの半分の回転数では主軸モータの出力も10,000 rpmでの最大出力54 kWの半分の26 kWとなる。この出力に対して500 cm³/minの切削除去量を達成することができた。したがって、主軸モータの小型化によって低速域での出力を物理的に得られないような場合でも、高速切削を適用することで、ある程度の加工能率向

Table 6.10 Experimental conditions for facemilling (rough) of cast iron

Workpiece	Material	FC250
	Hardness	HB200
	Size	250×180×80 mm
Machine	Type	Double column vertical
	Model	Mazak FJV-20IMS
Tool	Holder	KENNAMETAL-HPVSM10025
	Diameter of cutter	φ76.2 mm
	Number of inserts	5
	Cat. No.	KENNAMETAL KENLOCK-II
	Insert	Ceramics (SiAlON)
	Cat. No.	KY3500
	Tool length	-
Cutting conditions	Spindle speed	5,000 rpm
	Cutting speed	1,200 m/min
	Feedrate	0.2 mm/tooth
		5,000 mm/min
	Depth of cut	2 mm
	Width of cut	50 mm
Coolant	Not used	

Table 6.11 Experimental conditions for facemilling (finish) of cast iron

Workpiece	Material	FC250
	Hardness	HB200
	Size	200×150×70 mm
Machine	Type	Horizontal
	Model	Mazak FH-5800
Tool	Holder	BIG-BT40-FMA31.75
	Diameter of cutter	ϕ 100 mm
	Number of inserts	8
	Cat. No.	Sumitomo ϕ 100 × 60
	Insert	CBN
	Cat. No.	Sumitomo SHMX32948
	Tool length	110 mm
Cutting conditions	Spindle speed	19,100 rpm
	Cutting speed	6,000 m/min
	Feedrate	0.8 mm/tooth
		20,000 mm/min
	Depth of cut	0.1 mm
	Width of cut	75 mm
Coolant	Not used	



Figure 6.7 Facemill cutter for ultra high-speed cutting of cast iron

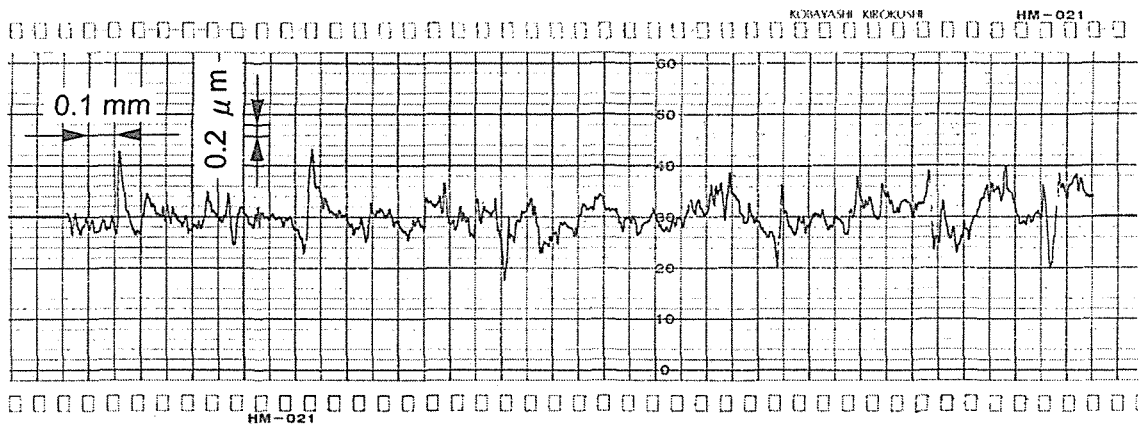


Figure 6.8 Surface roughness by facemilling (finish) of cast iron

上を図ることが可能になる。

次にCBNインサートを装着して遠心力対策が施された図6.7に示すカッタを用いて、表6.11に示すように周速6,000 m/min, 送り速度20 m/minで仕上加工を行った。その結果、図6.8に示すように表面粗さ $R_y = 2.1 \mu\text{m}$ を得ることができた。

このようにねずみ鋳鉄のフェイスミル加工では、セラミックスやCBNなど新素材の工具を使用した高速加工を行うことで加工能率の向上を図ることが可能になる。そのためには、MC主軸の高速化が図られるだけでなく、加工条件に合った主軸モータの基底回転数が選定されなければならない。

6.3.2 高速エンドミル加工

従来、鋳鉄のエンドミル加工はあまり行われなない。これは素材形状が製品形状に近いために、隅肉削り（ショルダミーリング）は必要とされるものの、アルミニウム合金や炭素鋼のようにエンドミルによって形状を創成する必要があまりないからである。

6.3.3 高速ドリル加工

TiAlN系の耐熱性に優れたコーティングが施された超硬合金ドリルを用い、切りくずの排出と刃先の冷却を行うために4.5 MPaのクーラントスルスピンドルを使用した。このドリルを用い、表6.12に示すように主軸回転数20,000 rpm, 周速530 m/min, 送り速度6 m/minの加工条件で、300穴を連続加工することができた⁴²⁾。

ドリル加工には一般的に面取り加工が付随する。特に貫通穴加工では、裏面の面取りを行う必要があるが、従来ではこのための特殊工具が使用されるか、もしくはオペレータによって手作業で面取りされている。そこでブレーキディスクやハブの貫通穴加工など量産加工分野に向けて面取り機能を複合させたドリルが開発されている。この工具による加工方法を図6.9に示す。また鋳物の加工では、セラミックス(Si_3N_4)工具が工具寿命の点で有利であるので、面取り機能を複合したセラミックドリルを使用し、表6.13に示す加工条件でFC250の加工を行った。その結果、従来比約2倍の生産性を有していることがわかった。

Table 6.12 Experimental conditions for drilling of cast iron

Workpiece	Material	FC250
	Hardness	HB200
	Size	230×150×70 mm
Machine	Type	Double column vertical
	Model	Mazak FJV-25UHS
Tool	Holder	BIG-HSK63A-MEGA20N-75M
	Diameter of cutter	φ8.5 mm
	Number of flutes	2
	Cat. No.	KENNAMETAL B411A000033D
	Tool material	TiAlN coated carbide
	Tool length	140 mm
Cutting conditions	Spindle speed	20,000 rpm
	Cutting speed	534 m/min
	Feedrate	0.3 mm/rev
		6,000 mm/min
	Depth of cut	28 mm
	Width of cut	8.5 mm
Coolant	Used (4.5 MPa through spindle)	

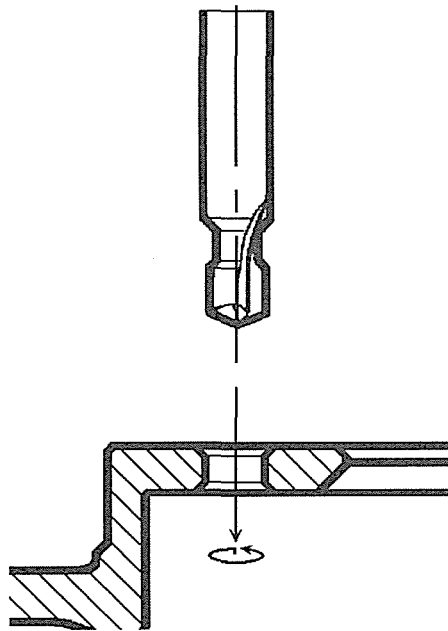


Figure 6.9 Tool path of integral drilling

Table 6.13 Experimental conditions for integral drilling of cast iron

Workpiece	Material	FC250
	Hardness	HB200
	Size	240×140×12.5 mm
Machine	Type	Double column vertical
	Model	Mazak FJV-20UHS
Tool	Holder	MST-CTH20-90
	Diameter of cutter	ϕ 12.8 mm
	Number of flutes	2
	Cat. No.	SPK 38.56.14.128.01.2
	Tool material	Ceramics (Si ₃ N ₄)
	Tool length	45 mm
Cutting conditions	Spindle speed	11,190 rpm
	Cutting speed	450 m/min
	Feedrate	0.18 mm/rev
		2,014 mm/min
	Depth of cut	12.5 mm
	Width of cut	12.8 mm
Coolant	Not used	

Table 6.14 Experimental conditions for spot facing of cast iron

Workpiece	Material	FC250
	Hardness	HB200
	Size	200×50×50 mm
Machine	Type	Double column vertical
	Model	Mazak FJV-20UHS
Tool	Holder	BIG-HSK63A-MEGA20N-75M
	Diameter of cutter	$\phi 8$ mm
	Number of flutes	4
	Cat. No.	Sumitomo SSMZ30055
	Tool material	Coated carbide
	Tool length	-
Cutting conditions	Spindle speed	12,000 rpm
	Cutting speed	300 m/min
	Feedrate	0.1 / 0.06 mm/tooth
		4800 / 300 mm/min
	Depth of cut	25 mm
Width of cut	7.0 / 1.0	
Coolant	Used (4.5 MPa through spindle)	

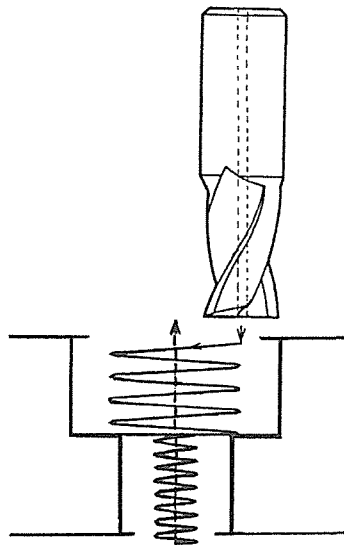


Figure 6.10 Tool path of spot facing

産業機械部品には座グリ加工が多く含まれている。従来はエンドミルを軸方向に送って加工されているが、エンドミルでこのような加工をする場合の送り速度は、径方向に切削する場合のものに比べて通常1/3程度に低くなる。そこで工具中心にオイルホールを有するエンドミルを製作し、表6.14に示す切削条件で図6.10に示すヘリカル補間による工具軌跡による座グリ加工を試みた。その結果、従来比約2倍の生産性で加工することができた。

このようにMCが有する補間機能を活用することで高能率な加工が行えることがわかる。

6.3.4 高速タップ加工

同期タップについては、超硬合金でオイルホール付きのタップを用いることでアルミニウム合金と同様に表6.15に示すようにM10のタップ穴を最高回転数3,600 rpm、最大周速110 m/minで加工することができた。6.2.4で示した図6.5 (a)のタップ加工方法は、ねじ創成時に刃長全体が穴側面に接触するためア

Table 6.15 Experimental conditions for synchronized tapping of cast iron

Workpiece	Material	FC250
	Hardness	-
	Size	70×240×100 mm
Machine	Type	Double column vertical
	Model	Mazak FJV-20UHS
Tool	Holder	BIG-HSK63A-MEGA16N-60M
	Diameter of cutter	M10
	Number of flutes	-
	Cat. No.	NACHI EXCELL-SP
	Tool material	Solid carbide
	Tool length	-
Cutting conditions	Spindle speed	3,600 rpm
	Cutting speed	110 m/min
	Feedrate	1.5 mm/rev
		5,400 mm/min
	Depth of cut	21 mm
Width of cut	-	
Coolant	Used (4.5 MPa through spindle)	

Table 6.16 Experimental conditions for integral tapping Figure 6.5 (b) of cast iron

Workpiece	Material	FC250	
	Hardness	HB200	
	Size	250×180×80	
Machine	Type	Double column vertical	
	Model	Mazak FJV-20UHS	
Tool	Holder	BIG-HSK63A-MEGA20N-75M	
	Diameter of cutter	M6	M10
	Number of flutes	4	4
	Cat. No.	REIME 4.5×16×1	REIME 7.8×26×1.5
	Tool material	Coated carbide	
	Tool length	-	-
Cutting conditions	Spindle speed	21,220 rpm	12,000 rpm
	Cutting speed	300 m/min	300 m/min
	Feedrate	0.17 mm/rev	0.32 mm/rev
		3,604 mm/min	3,840 mm/min
	Depth of cut	12 mm	20 mm
Width of cut	-	-	
Coolant	Used (4.5 MPa through spindle)		

ルミニウム合金に比べて被削性が劣る鋳鉄の加工を行うとビビリ易いので適さない。しかしながら図6.5 (b)のような加工方法は切りくず処理を容易にし、加工負荷の変動が少ないので被削性の悪い素材の加工にも適している。この加工方法でねずみ鋳鉄の加工を表6.16に示すように周速300 m/minで試みたところ、M6の1つのタップ穴を加工するのに4 s程度であった。図6.11にはM6とM10のタップ穴を加工する場合のサイクルタイムと穴数との関係を、通常のタップを用いて一般的な加工条件、および高速加工条件で加工した場合と、図6.5 (b)の方法で加工した場合とを比較して示す。この図より図6.5 (b)の加工方法は一般的な加工条件による従来加工に比べてサイクルタイムが約1/2になっているのがわかる。従来の加工方法でも高速加工を適用することでサイクルタイムの短縮を図ることができるが、図6.11より一度に加工するタップ穴の個数が10個まででは、やはり図6.5 (b)の加工方法がサイクルタイムの点で有利であることがわかる。

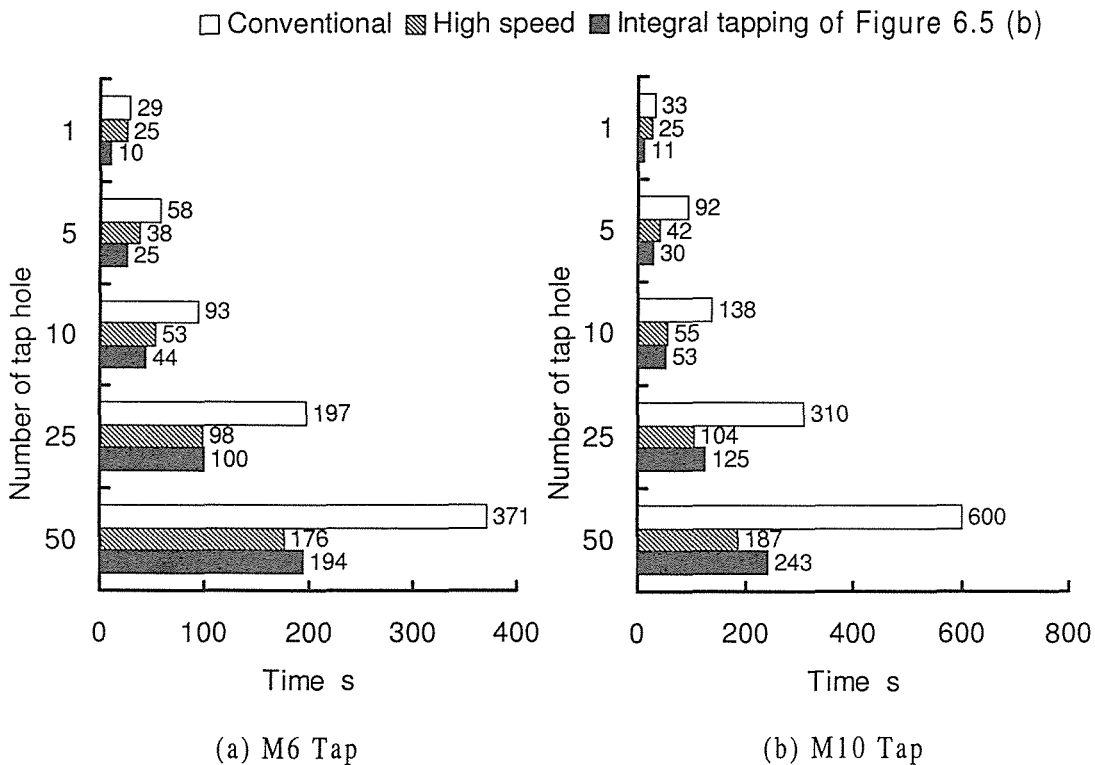


Figure 6.11 Cycle time comparison of integral tapping of cast iron

6.3.5 高速ボーリング加工

鋳物部品では、ボーリング加工が行われることが多いので、これについても高速加工を試みた。穴径や円筒度が要求される部位の加工に適用されるボーリング加工は、1刃の工具で加工するために加工能率が低い。そこでねずみ鋳鉄の加工にはCBNインサートを使用することで切削速度を向上させることが期待できる。しかしながら一般的なボーリングバーは1刃ゆえにアンバランス量が大きく、いくら高速切削が可能なインサートを装着しても高速回転させれば精度良く加工することが困難になる。そこで刃先位置の調整にともなって機械的にカウンタバランス位置を調節して工具のアンバランス量を一定以下に保つことができる工具が開発されている。これを図6.12に示す。こ



Figure 6.12 Boring bar for high-speed cutting of cast iron

の工具に CBN インサートを装着し、表 6.17 に示すように周速 1,500 m/min で $\phi 80$ mm、深さ 72 mm のボーリング加工を行ったところ、1つの穴加工に要する時間は 6 s と非常に短時間で加工することができた。

6.4 炭素鋼の高速加工技術

最後に代表的な工業材料である炭素鋼の高速加工の試みについて述べる。

6.4.1 高速フライス加工

従来、炭素鋼の加工には P 種の超合金工具が使用される。さらにコーティングされたものを使用すれば 350 m/min 程度の加工が行える。この例を表 6.18 に示す。このカッタに TiAlN コーティングされたサーメットインサートを用いて加工したところ周速 600 m/min で 20 分間の連続加工を行っても良好な面を得ることができた。しかしながら周速 700 m/min から 1,000 m/min では、数十秒から数分で加工面に曇りを生じた。次に丸駒インサートによる高速加工を試みた。この工具は、インコネルなどジェットエンジンなどに使用される耐熱合金

Table 6.17 Experimental conditions for boring of cast iron

Workpiece	Material	FC250
	Hardness	HB200
	Size	180×125×70 mm
Machine	Type	Double column vertical
	Model	Mazak FJV-20UHS
Tool	Holder	WOHLHAUPER-HSKA63 245013
	Diameter of cutter	φ84 mm
	Number of inserts	1
	Model No.	WOHLHAUPER 264066
	Insert	CBN
	Cat. No.	Sumitomo TCMW110204
	Tool length	170 mm
	Cutting conditions	Spindle speed
Cutting speed		1500 m/min
Feedrate		0.1 mm/rev
		568 mm/min
Depth of cut		65 mm
Width of cut		0.1 mm
Coolant	Not used	

Table 6.18 Experimental conditions for facemilling (rough) of carbon steel

Workpiece	Material	S45C
	Hardness	HB180
	Size	200×150×50 mm
Machine	Type	Horizontal
	Model	Mazak FH-480
Tool	Holder	BIG-FMA31.75-45
	Diameter of cutter	φ100 mm
	Number of inserts	8
	Cat. No.	Sumitomo UF0F 4100R
	Insert	Coated carbide
	Cat. No.	Sumitomo SFKN12T3AZTN
	Tool length	100 mm
	Cutting conditions	Spindle speed
Cutting speed		350 m/min
Feedrate		0.3 mm/tooth
		2,673 mm/min
Depth of cut		3.30 mm
Width of cut		75 mm
Coolant	Used	

Table 6.19 Experimental conditions for facemilling (finish) of carbon steel

Workpiece	Material	S45C
	Hardness	HB180
	Size	70×240×100 mm
Machine	Type	Horizontal
	Model	Mazak FH-6800
Tool	Holder	MST-FMA38.1-45
	Diameter of cutter	φ125 mm
	Number of inserts	6
	Cat. No.	Sumitomo special SEC-MILL
	Insert	Coated carbide
	Cat. No.	Special RNG43
	Tool length	120 mm
Cutting conditions	Spindle speed	2,546 rpm
	Cutting speed	1,000 m/min
	Feedrate	0.4 mm/tooth
		6,110 mm/min
	Depth of cut	0.1 mm
	Width of cut	90 mm
Coolant	Not used	

の高速加工を行うために開発されたものであるが⁴⁷⁾、炭素鋼の高速加工に適用してみた。表6.19に切削条件を、図6.13にカッタを示す。周速1,000 m/min、送り速度6.1 m/minで加工したところ、図6.14に示すような表面粗さが得られ、 $R_y = 4.5 \mu\text{m}$ であった。

6.4.2 高速エンドミル加工

従来の炭素鋼のエンドミル加工は周速100 m/min前後で切込量を大きくして行われる。これに対してTiAlN系のコーティングが施された超硬合金エンドミル(φ20 mm)を用いて軸方向の切り込量を20 mm、径方向の切込量を1 mmとして周速700 m/minで加工を行ったところ良好な切削面を連続して得ることができた。



Figure 6.13 Facemill cutter for high-speed cutting of carbon steel

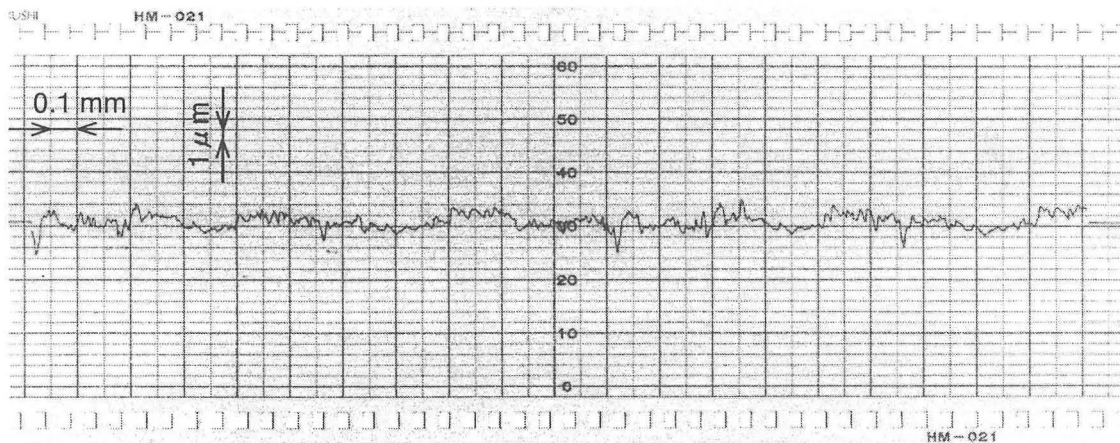


Figure 6.14 Surface roughness by facemilling (finish) of carbon steel

Table 6.20 Experimental conditions for drilling of carbon steel

Workpiece	Material	S45C
	Hardness	HB180
	Size	200×150×50 mm
Machine	Type	Horizontal
	Model	Mazak FH-480
Tool	Holder	MST-CTH20-60
	Diameter of cutter	φ8.5 mm
	Number of flutes	2
	Cat. No.	Toshiba DSC 085S
	Tool material	Coated carbide
	Tool length	50 mm
Cutting conditions	Spindle speed	11,230 rpm
	Cutting speed	300 m/min
	Feedrate	0.2 mm/rev
		2,246 mm/min
	Depth of cut	28 mm
Width of cut	-	
Coolant	Used (through spindle)	

6.4.3 高速ドリル加工

従来のドリル加工は周速80 m/min程度で行われるが、表6.20に示すようにクーラントスルースピンドル機能を適用し、超硬合金ドリルで周速300 m/min、送り速度4 m/minの加工条件で加工した。工具折損することなく連続して600穴の加工を行うことができた。また、ヘリカル補間による座グリ加工を鋳物の場合と同様に表6.21で示す加工条件で加工したところ、従来比約2倍の生産性向上の図れることがわかった。

6.4.4 高速タップ加工

同期タップは、表6.22に示すようにこれまでのところ工具寿命の制約から50 m/min程度が限界である。一方、図6.5 (b)に示した加工方法では表6.23に示すようにねずみ鋳鉄の場合と同じ周速300 m/minで加工することができた。したがってアルミニウム合金などと比べて工具寿命の点で切削速度を高めることが困難な被削材についても、このような加工方法が生産性の向上に有効

Table 6.21 Experimental conditions for spot facing of carbon steel

Workpiece	Material	S45C
	Hardness	HB180
	Size	200×150×50 mm
Machine	Type	Double column vertical
	Model	Mazak FJV-20UHS
Tool	Holder	BIG-MEGA20N
	Diameter of cutter	φ8 mm
	Number of flutes	4
	Cat. No.	Sumitomo SSMZ30055
	Tool material	Coated carbide
	Tool length	-
Cutting conditions	Spindle speed	12,000 rpm
	Cutting speed	300 m/min
	Feedrate	0.2 mm/rev
		2400 mm/min
	Depth of cut	25 mm
Width of cut	7.0 / 1.0 mm	
Coolant	Used (4.5 Mpa through spindle)	

Table 6.22 Experimental conditions for synchronized tapping of carbon steel

Workpiece	Material	S45C
	Hardness	HB180
	Size	200×150×50 mm
Machine	Type	Horizontal
	Model	Mazak FH-480
Tool	Holder	BIG-NBS13-90
	Diameter of cutter	M10
	Number of flutes	-
	Cat. No.	ESO EV0221 M10
	Tool material	Coated high speed steel
	Tool length	80 mm
Cutting conditions	Spindle speed	1,519 rpm
	Cutting speed	50 m/min
	Feedrate	1.5 mm/rev
		2,278 mm/min
	Depth of cut	21 mm
Width of cut	-	
Coolant	Used	

Table 6.23 Experimental conditions for integral tapping of carbon steel

Workpiece	Material	S45C
	Hardness	HB180
	Size	200×150×50 mm
Machine	Type	Double column vertical
	Model	Mazak FJV-20UHS
Tool	Holder	BIG-MEGA20N-75
	Diameter of cutter	φ6.2 mm
	Number of flutes	4
	Cat. No.	REIME 6.2 × 21 × 1.25
	Tool material	Coated carbide
	Tool length	-
Cutting conditions	Spindle speed	15,409 rpm
	Cutting speed	300 m/min
	Feedrate	0.055 mm/tooth
		3,390 mm/min
	Depth of cut	20.25 mm
Width of cut	-	
Coolant	Used (4.5 Mpa through spindle)	

であるといえる。

6.5 結言

本研究で開発したMCを主に用いてアルミニウム合金ならびにねずみ鋳鉄の高速加工を試み、加工の高能率化の可能性を調べた、その結果を次にまとめる。

- (1) アルミニウム合金やねずみ鋳鉄のフェイスミル加工では高速MCを用い、PCDあるいはCBNインサートを装着したフェイスミルカッタを使用して、切削速度はそれぞれ8,000 m/min, 6,000 m/minで切削送り速度20 m/minの加工を行うことができた。
- (2) アルミニウム合金のエンドミル加工では、高速MCの機械性能を活かして回転数30,000 rpm, 切削送り速度30 m/minから60 m/minの加工を行うことができた。
- (3) アルミニウム合金やアルミニウム鋳物のドリル加工では、高速MCの機械

性能を活用してそれぞれ20 m/min, 30 m/minの切削送り速度で加工することができた。

- (4) 面取り加工を伴うドリル加工やタップ加工では、複合工具と最新のNCが有する高速高精度な補間機能を活用した加工を試み、サイクルタイムを一般的な加工方法、加工条件によるものに比べておよそ1/2にすることができた。
- (5) 炭素鋼のフェイスミル加工では、切削速度1,000 m/minの加工を行うことができたが、送り速度は高々5 m/min程度であった。またドリル加工では切削速度300 m/minで加工することができたが、切削送り速度は2 m/min程度であった。

以上のようにアルミニウム合金やねずみ鋳鉄の加工では、高速MCが有する主軸や送り駆動系の高速仕様を活かした加工を行うことができた。しかしながら炭素鋼の加工においては、高速MCの性能に比べて現在の工具性能では不十分であり、今後の工具技術の発展が期待される。

第7章 結論

自動車，航空機，産業機械などの多くの機械加工分野でマシニングセンタ (MC) の生産性向上が強く期待されている．そこで，本研究では高能率MCの開発を目的として，まずMCの設計支援を行うサイクルタイムシミュレータを開発した．次にこのシミュレータを用いて立形MCと横形MCを試作し，その性能，生産性を評価した．本章では以上の各章で得られた結果を次にまとめる．

第2章においては，実際のNC装置や最新のMCの動作特性（加減速特性や同時操作機能，など）を可能な限り再現し，機械仕様と加工対象部品のNCプログラムからサイクルタイムを予測する設計支援シミュレータの開発について述べた．数種の標準的な加工工程や切削条件の下で，開発されたシミュレータと実加工におけるサイクルタイムとを比較した結果，シミュレータによるサイクルタイムの予測誤差は3~4 %程度であることを確認した．

第3章においては，MCの機械仕様の高速化によるサイクルタイムの短縮効果を明らかにするために，航空機部品，自動車部品，工作機械部品について，機械仕様と切削条件を変化させながら第2章で開発したシミュレータを用いてサイクルタイム分析を行った．その結果から，サイクルタイムの短縮には，高速切削の適用による切削送り速度の向上が最も効果的であり，このためには主軸の高速化と高出力化が必要であることを明らかにした．また送り駆動系の高速化は，同時に加減速度も向上される場合にはじめてサイクルタイムの短縮に寄与することを示した．加工対象ごとに細かく見ると，航空機部品の高速加工のように切削送り速度が10 m/minを越えるような切削条件では，送り駆動系の高加減速化によって位置決め時間だけでなく切削時間も大きく短

縮される。一方、自動車部品のようにドリル加工やタップ加工などの点加工を主体とするものの加工では、高速加工が適用されると切削時間よりも位置決め時間や工具交換時間など非切削時間の合計がサイクルタイムに占める割合が大きくなるので、送り駆動系の高速高加減速化やATC装置の高速化が必須である。

第4章では、第3章のシミュレーション結果に基づき高速切削の適用による生産性の向上をめざして行った、主軸の最高回転数 30,000 rpm, 最大出力 54 kW, 送り駆動系の最大送り速度 60 m/min, 加速度 10 m/s² の立形MCの設計, 試作について述べた。この立形MCは航空機部品のように高速切削を適用してアルミニウム合金のブロック材から所望の形状部品を削り出す加工分野に的を絞ったものである。試作されたMCによる実加工の結果から、試作MCはサイクルタイムを従来機に比べて1/3に短縮することが可能であり、高い生産性を有するとともにコスト的にも妥当なものであることを確認した。さらに試作MCがほぼシミュレーションにより予測された性能を持つことより、第2章で開発したシミュレータが高速高能率MCの開発における試作にかわる設計支援ツールであることを確認した。

同様に第5章では第3章のシミュレーション結果に基づいた横形MCの試作について述べた。このMCは自動車部品の加工に代表されるような多数のドリル穴、タップ穴などをもつ部品を高速切削を適用することで切削時間を短縮し、さらに位置決めやATC時間などの非切削時間の短縮することねらって設計されたものである。主軸は実用性を考慮して最高回転数 15,000 rpm としたが、0 rpm から最高回転数までの起動停止時間は1.2~1.4 s と短い。その他このMCは最大送り速度 60 m/min, 加速度 10 m/s² の送り駆動系とATC時間 1.3 s の高速ATC装置を有している。実加工の結果、試作MCは従来機に比べてサイクルタイムを1/2に短縮することが可能であり、コスト的にも妥当なものであることが確認された。さらにこの試作MCもシミュレーションにより予測された性能を持つことにより、第2章で開発したシミュレータが高速高能率MCの開発において、設計支援ツールとして有効であることを確認した。

第6章では第4章と第5章で試作された高能率マシニングセンタを用いて行った、代表的な工業材料であるアルミニウム合金，ねずみ鋳鉄ならびに炭素鋼の高速加工の試みを述べた．その結果，アルミニウム合金については切削速度8,000 m/min, ねずみ鋳鉄については6,000 m/min, 炭素鋼については1,000 m/minで加工することが可能であることが確認された．またドリルやタップ加工については，高速切削の適用とMCが有する各種の補間機能の活用によって，サイクルタイムの短縮が図れることを示した．これらの結果から従来の切削条件で加工した場合に比べて5~20倍の高速加工が可能であることが確認された．

以上のように，本研究によって高能率MCの設計支援ツールとしてのサイクルタイムシミュレータの開発と，このシミュレータを用いた高速高能率MCの試作に成功するとともに，今後の高速高能率MCの開発指針を得ることができた．

謝 辞

本論文を終わるにあたり、本研究を遂行し、本論文として取り纏めることができたのは、鳥取大学工学部知能情報工学科 水本洋教授 の懇切なる御指導、御教示と叱咤激励によるものであり、深甚の謝意を表します。

また、鳥取大学工学部機械工学科 小田哲教授ならびに鳥取大学大学院工学研究科情報生産工学専攻 小幡文雄教授には、本研究に対して貴重な御意見を賜りましたことに深く感謝の意を表します。

鳥取大学工学部知能情報工学科 有井士郎助教授には本研究を遂行するのに際し、終始有益な御助言を戴きました。厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行する契機を与えてくださいました、川越治郎 鳥取大学名誉教授に哀心より御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、ヤマザキマザック株式会社代表取締役社長 山崎照幸氏には未熟な機械設計経験しかなかった筆者の研究提案を御採択賜ったことに深く感謝します。また、第一副社長 山崎義彦氏，第二副社長 山崎恒彦氏，専務取締役 山崎智久氏，専務取締役 青木修氏，専務取締役 福村直慧氏，常務取締役 長江昭充氏，開発設計事業部副事業部長 水門正良氏，取締役 兼松弘行氏の各位より終始深いご理解とご鞭撻を賜りました。ここに謹んで謝意を表します。特に福村直慧氏，長江昭充氏ならびに水門正良氏には，多くの御助言を賜ったばかりでなく，本論文取り纏めに際して多大なる御配慮を賜りました。心より御礼申し上げます。

本研究の実施にあたり，本研究の動機を与えて下さった神戸大学工学部情報知能工学科システム系 藤井進教授ならびにマツダ株式会社技術副本部長 龍田康登氏，実機的设计において貴重な御助言を賜りました京都大学大学院工学

研究科 垣野義昭教授に深謝の意を表します。

高速主軸ユニットの製作を賜った光洋精工株式会社常務取締役 森田圭二氏をはじめ諸氏，高速切削工具の製作ならびに高速切削に関わるとご助言を賜った住友電気工業株式会社ダイヤ製品事業部長 鴻野雄一郎氏，工具開発部長 中井哲男氏をはじめ粉末合金事業部工具開発部の諸氏，低慣性高出力モータの製作ならびに試作機の評価に御協力を賜った三菱電機株式会社名古屋製作所の諸氏に厚く御礼申し上げます。

またヤマザキマザック株式会社開発設計事業部の各位をはじめ多くの関係各位からも終始暖かく御助言と御協力を賜りました，特にサイクルタイムシミュレータの開発では稲鶴勇氏，高速立形マシニングセンタの開発では小島雅之氏，松宮文昭氏，乗松途夫氏，岡田聡氏，高速横形マシニングセンタの開発では北山稔氏，山本昇氏に多くの御助言とご協力を賜りました。加工技術研究センタグループリーダー 村木俊之氏をはじめ，試作機の解析，評価では山岡義典氏，鈴木賢司氏に，高速加工評価では林治親氏に多くのご協力を賜りました。ここに謹んで御礼申し上げます。

最後になりましたが，本論文を完成するにあたり，鳥取大学工学部知能情報工学科 藪田義人助手をはじめ知能制御B研究室各位には多くのご協力を賜りました。心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) L. T. C. Rolt, 磯田 浩 訳：工作機械の歴史－職人の技からオートメーションへー，平凡社 (1989).
- 2) 長江昭充：大規模FMSの開発，東京大学博士論文，(1986).
- 3) 龍田康登，高田芳治，藤井進，森田浩：自動車部品加工における”Agile Manufacturing System”，日本機械学会第76期全国大会講演論文集（V），No.98-3, (1998) 29～30.
- 4) 藤井進，森田浩，松本博忠，高田芳治，龍田康登：FMSにおけるジョブ及び工具配分問題に対するオークション方式の適用，Proceedings of Fifth Intelligent FA Symposium, ISCIE, (1995) 25～28.
- 5) 藤井進，森田浩，松本博忠，高田芳治，龍田康登：FMSにおけるジョブと工具の機械割当に関する研究，日本機械学会論文集（C編），64, 623 (1998-7) 2639～2646.
- 6) Susumu Fujii, Hiroshi Morita, Hirotada Matsumoto, Yoshiharu Takata and Yasuto Tatsuta: A BASIC STUDY ON A FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEM FOR HIGH VOLUME MANUFACTURING, Proceedings of Pacific Conference on Manufacturing '96, I, (1996) 338～343.
- 7) Susumu Fujii, Hiroshi Morita, Yasuto Tatsuta and Yoshiharu Takata: A BASIC STUDY ON HIGH VOLUME FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEM FOR AGILE MANUFACTURING, Advances in Production Management Sys-

- tems (Norio Okino, Hiroyuki Tamura and Susumu Fujii Editors) IFIP, (1996) 39 ~ 44.
- 8) Susumu Fujii, Hiroshi Morita, Yasuto Tatsuta and Yoshiharu Takata: A Basic Study on High Volume Flexible Manufacturing System for Agile Manufacturing Advances in Production Management Systems (Norio Okino, Hiroyuki Tamura and Susumu Fujii Editors) IFIP, Chapman and Hall, London, (1998) 67 ~ 78.
 - 9) Susumu Fujii, Hiroshi Morita, Hiroyuki Iio, Yasuto Tatsuta and Yoshiharu Takata: STRUCTURAL ANALYSIS OF HIGH VOLUME FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEM FOR AGILE MANUFACTURING, Proceedings of the International Symposium on Manufacturing Systems. (1997) 34 ~ 39.
 - 10) 藤井 進, 森田 浩, 飯尾啓之, 龍田康登, 高田芳治 : 大容量FMS の構成に関する基礎研究, 1997 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1997) 537.
 - 11) 藤井 進, 森田 浩, 今田将博, 龍田康登, 高田芳治 : HV-FMS の経済性評価に関する研究, 1997 年度日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, (1997) 238 ~ 239.
 - 12) Susumu Fujii, Hiroshi Morita, Masahiro Imada, Hiroyuki Iio, Yasuto Tatsuta and Yoshiharu Takata: Economical Analysis of High Volume Flexible Manufacturing System for Agile Manufacturing, Proceedings of the International Conference of "Strategic Management of Manufacturing Value Chain", Kluwer Academic Publishers, (1998) 159 ~ 166.
 - 13) F. Klocke and G. Essenblaetter: "Dry Cutting", Annals of the CIRP, 46, 2 (1997) 1-8
 - 14) 芳賀 實 : 高速・高能率加工, 第3回日石機械加工シンポジウム, (1993) 33-48.

- 15) G. Spur: "Vom Wandel der industriellen Welt durch Werkzeugmaschinen", Carl Hanser Verlag München Wien, (1991)
- 16) 狩野勝吉: データで見る切削加工の最先端技術, 工業調査会, (1992) 47.
- 17) 鳴瀧則彦: 切削工具概論, 精密工学会誌, **61**, 6 (1995) 751-753.
- 18) 鴻野雄一郎: 超高压焼結体工具, 精密工学会誌, **61**, 6 (1995) 754-758.
- 19) 村上大介, 水谷正則, 池ヶ谷明彦, 鴻野雄一郎, 垣野義昭, 高田芳治: 鋳鉄とアルミ合金の高速切削に関する研究, 1996年度精密工学会秋季学術講演会講演論文集 (1996) 101-102.
- 20) 高橋一郎, 吉田拓未, 安斎正博, 中側威雄, 松岡甫篁: 正面フライス加工の効率化, 1995年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1995) 109-110.
- 21) H. Schulz and T. Moriwaki: "High Speed Cutting", Annals of the CIRP, **41**,2 (1992) 637-643
- 22) 日本機械学会: 工作機械の最先端技術, 工業調査会, (1988) 97-121
- 23) 中村晋哉, 垣野義昭, 浦野好市, 米山博樹: アンダレース潤滑スピンドルの高速回転特性の解析と評価, 精密工学会誌, **60**, 10 (1994) 1485-1489.
- 24) 例えば, Robert F. Huber: This Man Wants to Change the Way You Machine Parts, Production, **105**, 10 (1993) 42-44.
- 25) Yoshiaki Kakino and Atsushi Matsubara: High Speed and High Acceleration Feed Drive System for NC Machine Tools, International Journal of the Japan Society for Precision Engineering, **30**, 4 (1996) 295-298.
- 26) 竹下虎男, 風間 務, 加知光康: CNCサーボシステムの性能向上に関する研究 (NCサーボ追従性改善の一方法), 日本機械学会論文集 (C編), **63**, 615 (1997-11) 174-179.

- 27) 白瀬敬一，平尾政利，安井武司，河端裕，藤村善雄：NC旋盤の生産性向上に関する研究(第1報)，精密工学会誌，**60**, 2 (1994) 235-239.
- 28) 閻喜仁，白瀬敬一，河端裕，平尾政利，安井武司：マシニングセンタの生産性向上に関する研究(第1報)，精密工学会誌，**63**, 7 (1997) 1044-1048.
- 29) 高田芳治，山岡義典，鈴木賢司，水本 洋：マシニングセンタの高能率化のための作業分析，1996年度精密工学会秋季学術講演会論文集，(1996) 111-112.
- 30) 高田芳治，山岡義典，鈴木賢司，水本 洋，有井士郎：サイクルタイム分析に基づく高能率マシニングセンタの開発，精密工学会誌，**65**, 6 (1999) 878-882.
- 31) ヤマザキマザック株式会社：マザトロール M plus プログラミング説明書 (EIA/ISO)，(1994).
- 32) 三菱電機株式会社：三菱 AC スピンドルドライブ ビルトインシリーズ 標準仕様書，BFN-14118-04-A，(1994).
- 33) 三菱電機株式会社：三菱数値制御装置 MELDAS AC サーボ・主軸 MDS-A シリーズ 仕様説明書，BNP-B3759*，(1994).
- 34) 三菱電機株式会社：三菱数値制御装置 MELDAS AC サーボ・主軸 MDS-A シリーズ 保守説明書，BNP-B2046*，(1994).
- 35) 垣野義昭，松原 厚，黎 子椰，上田大介，中川秀夫，竹下虎男，丸山寿一：NC工作機械における送り駆動系のトータルチューニングに関する研究(第1報)，精密工学会誌，**60**, 8 (1994) 1097-1101.
- 36) 垣野義昭，松原 厚，黎 子椰，上田大介，中側秀夫，竹下虎男，丸山寿一：NC工作機械における送り駆動系のトータルチューニングに関する研究(第2報)，精密工学会誌，**61**, 2 (1995) 268-272.

- 37) 垣野義昭, 松原 厚, 上田大介, 中側秀夫, 竹下虎男, 丸山寿一: NC 工作機械における送り駆動系のトータルチューニングに関する研究 (第3報), 精密工学会誌, **62**, 3 (1996) 423-427.
- 38) 茨木創一: NC 工作機械送り駆動系のトータルチューニングに関する研究, 京都大学修士論文, (1996).
- 39) 中川秀夫: トータルチューニングによる NC 工作機械の性能向上に関する研究, 京都大学博士論文, (1996) 124-132.
- 40) 黎 子椰: NC 工作機械送り駆動系の特性の向上に関する研究, 京都大学博士論文, (1992).
- 41) 荻野隆史, 垣野義昭, 松原 厚, 鴻野雄一郎, 野口和男, 村上大介, 高田芳治: 高速マシニングセンタを用いた高能率ドリル加工に関する研究, 1996 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1996) 323-324.
- 42) Yoshiaki Kakino, Atsushi Matsubara, Yuichiro Kohno, Kazuo Noguchi, Daisuke Murakami and Yoshiharu Takata: High Speed, High Productive Machining of Automobile Parts by Machining Center with High Speed and High Acceleration Rate, Proceedings of the Third Inter-national Conference on Progress of Cutting and Grinding, (1996) 192-197.
- 43) 高田芳治, 山岡義典, 鈴木賢司, 水本 洋: 高速マシニングセンタの開発と高能率加工の実験的研究, 先端加工学会誌, **18**, 1 (1999).
- 44) 高田芳治: ハイリードボールねじ利用高速高加減速マシニングセンタ, 精密工学会・日本工作機械工業界主催 第251回講習会 最新工作機械技術セミナー'98 テキスト, (1998) 50-53.
- 45) 高田芳治, 山岡義典, 鈴木賢司, 垣野義昭, 松原厚, 水本 洋: ハイリードボールねじを用いた高速マシニングセンタ FF, FJV シリーズの開発,

日本機械学会 第1回 生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (1999) 227-228.

46) 村木俊之, 林 治親, 高田芳治, 山岡義典, 鈴木賢司: 高速・高加減速マシニングセンタによる高速・高能率切削, 日本機械学会 第1回 生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (1999) 229-230.

47) 榎本眞三, 加藤和彦, 細川義政, 柳下光弘, 野田光昭, 大熊 雅: ファイン・スクレーパ型フライスカッタの開発, 1998年度精密工学会秋季大会 学術講演会講演論文集, (1998) 285.

END