

博士論文

サーボモータとマシニングセンタの送り軸の
慣性モーメント比に関する研究

内田裕之

本研究の概要

近年の工作機械に於いて、機械自身の高剛性化や高精度化の開発改良に、制御装置や加工工具などの急速な進歩が重畳し、その加工性能は目覚ましい進歩を遂げている。工作機械の代表例であるマシニングセンタに於いても、自動車部品市場向けに要求されるハイサイクル加工性能や精密金型市場向けに要求される高精度高品位加工性能は、年々着実に強化されている。中でも、特に高品位加工に関しては、従来の精密金型市場に加え、高機能携帯電話、所謂スマートフォンの登場が、この用途での工作機械の進化を加速させている。

工作機械の加工性能を決める制御装置側の要因としては、送り軸のサーボモータが重要な役割を占める。サーボモータの特性の中で、慣性モーメント以外はその特性値の良し悪しがほぼ一義的に決まる。即ち、最大トルクや連続定格トルクは大きければ大きい程良く、エンコーダの分解能や絶対精度は高ければ高い程良い。しかしながら、慣性モーメントだけは、そのサーボモータが搭載される送り軸の慣性モーメントとの比により、その工作機械の加工性能が大きく左右されるという特徴を持つため、より深い検証と考察が必要となる。

一般に、加工時間の短縮を最優先とするハイサイクル加工では、サーボモータの慣性モーメントは制御装置が安定に制御出来る範囲で小さい方が好ましく、加工精度や加工面品位を最優先とする高精度高品位加工では、慣性モーメントはコストやサイズが許容出来る範囲で大きい方が好ましい、との経験則が存在する。しかしながら、この経験則を理論から実加工までを含めて定量的に論じた研究は従来殆どなく、実際に同じ条件の下で実加工実験を行い慣性モーメント比の違いが加工結果に与える影響を論じた研究は、ほぼ存在しなかった。

そこで本研究では、慣性モーメント比の違いが実加工結果に与える影響というテーマを、以下の4つの観点から、多くの実加工実験を含む多角的な検証を実施した。

- (1)力学モデルによる理論検証と、実際に加工現場で稼働するマシニングセンタの調査
- (2)慣性モーメントの異なるサーボモータとマシニングセンタとを組合せた実加工実験
- (3)上記実加工実験の測定結果とマシニングセンタの送り軸の挙動の測定結果との比較
- (4)高品位加工に着目しての、実在するワークピースを用いた追加実験と全実験の総括

これらの研究を通して、サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関して、従来知られていた経験則をより具体的、定量的に裏付け、かつマシニングセンタの想定する加工対象に応じたサーボモータ選定の基本的な指標を提案した。また、近年市場の拡大が顕著な高品位加工分野に於いて、慣性モーメント比の違いが加工面に与える影響を、様々な実加工事例と共に明らかにした。最後に、一連の研究結果を総括すると共に、高品位加工の全体像の把握、官能検査に頼らない評価指標など、今後の課題を明確化した。

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	2
1.2 従来研究の概要	4
1.2.1 国内の従来研究	5
1.2.2 海外の従来研究	7
1.2.3 従来研究の考察	9
1.3 本研究の目的	11
1.4 本研究の手法	13
1.5 本論文の構成	17
第2章 サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比	21
2.1 緒言	22
2.2 マシニングセンタの送り軸の動特性に影響するサーボモータの主な性能指標	23
2.3 サーボモータと機構部の送り軸の慣性モーメント比に関する考察	25
2.3.1 サーボモータと機構部の送り軸との関係を表す力学モデル	25
2.3.2 機構部の送り軸の加減速性能に着目した場合	27
2.3.3 機構部の送り軸の制御性に着目した場合	29
2.3.4 機構部が着目する性能指標とサーボモータの慣性モーメントとの関係	31
2.4 加工現場で稼働するマシニングセンタに於ける慣性モーメント比の分析と考察	32
2.4.1 マシニングセンタの主な種類と慣性モーメント比との関係	32
2.4.2 マシニングセンタの主な加工対象と慣性モーメント比との関係	35

2.5	力学モデルによる考察と加工現場で稼働するマシニングセンタの分析による考察との比較	36
2.6	結言	38
第3章	慣性モーメント比の違いがマシニングセンタの加工性能に与える影響	39
3.1	緒言	40
3.2	サーボモータとマシニングセンタを用いた実加工実験による検証の準備	41
3.2.1	実加工実験に用いるサーボモータの主な仕様	42
3.2.2	実加工実験に用いるマシニングセンタの主な仕様	42
3.3	マシニングセンタを用いた加工の種類とサーボモータに要求される主な特性	45
3.3.1	マシニングセンタによるハイサイクル加工	45
3.3.2	マシニングセンタによる高精度高品位加工	47
3.4	サーボモータとマシニングセンタを用いた実加工実験の手法と結果	49
3.4.1	ハイサイクル加工の実加工実験の方法	49
3.4.2	ハイサイクル加工の実加工実験の結果	50
3.4.3	高精度高品位加工の実加工実験の方法	52
3.4.4	高精度高品位加工の実加工実験の結果	53
3.4.5	総慣性モーメントが制御性に与える影響の確認実験の方法とその結果	57
3.4.6	高精度高品位加工の2種類の実加工実験結果の比較と定量考察	59
3.5	サーボモータとマシニングセンタを用いた実加工実験の結果に対する考察	63
3.6	結言	64
第4章	慣性モーメント比の違いがマシニングセンタの送り軸の挙動に与える影響とその評価のための測定システム	65

4.1	緒言	66
4.2	マシニングセンタの送り軸の挙動測定による検証の手法	67
4.2.1	実加工実験に用いるサーボモータの主な仕様	68
4.2.2	送り軸の挙動測定に用いる測定システムと測定方法	68
4.3	マシニングセンタの送り軸の挙動測定の想定動作と想定条件	71
4.3.1	マシニングセンタによるハイサイクル加工	71
4.3.2	マシニングセンタによる高精度高品位加工	72
4.4	マシニングセンタの送り軸の挙動測定の結果	73
4.4.1	ハイサイクル加工に於ける測定結果	73
4.4.2	高精度高品位加工に於ける測定結果	75
4.4.3	実加工実験と測定システムによる測定結果の二次元表示による比較	78
4.4.4	実加工実験と測定システムによる測定結果の三次元表示による比較	80
4.5	マシニングセンタの送り軸の挙動測定の結果に対する考察	82
4.6	結言	84
第5章	慣性モーメント比がマシニングセンタの高品位加工に与える影響の検証とその総括	85
5.1	緒言	86
5.2	実在するワークピースを使用した高品位加工の実加工実験の手法	88
5.2.1	実在するワークピースを使用した高品位加工の実加工実験の概要	88
5.2.2	高品位加工の実加工実験に使用するワークピース群	88
5.2.3	各ワークピースの実加工実験に使用する治具と工具	90
5.2.4	各ワークピースの実加工実験の加工条件と評価方法	90
5.3	実在するワークピースを使用した高品位加工の実加工実験の結果	93
5.3.1	各ワークピースの高品位加工の実加工実験の結果	93

5.3.2	各ワークピース間に見られる実加工結果の相違点	94
5.4	実在するワークピースを使用した高品位加工の実加工実験の考察	99
5.4.1	本章のワークピース群と第3章, 第4章のワークピースとの関係の考察	99
5.4.2	本章のワークピース群と加工面品位との関係の考察	102
5.4.3	サーボモータの挙動を測定する測定システムの有用性の考察	103
5.5	高品位加工を実現するための諸考察	104
5.5.1	高精度加工と高品位加工の相違点	104
5.5.2	高品位加工に適したサーボモータ	105
5.5.3	高品位加工に影響を与える要素の全体像	105
5.5.4	高品位加工の加工結果の定量的評価指標	106
5.6	高品位加工に影響を与える要素の全体像の更なる考察	108
5.7	高品位加工の加工結果の定量的評価指標の更なる考察	113
5.8	結言	118
第6章	結論	119
6.1	本研究で得られた主な結論及び新たに考案した手法	120
6.1.1	本研究で得られた主な結論	120
6.1.2	本研究で新たに考案した手法	123
6.2	本研究で残された研究課題及び本研究を超えた研究課題	124
6.2.1	本研究で残された研究課題	124
6.2.2	本研究を超えた研究課題	125
参考文献		127
研究業績		135
業務経歴		139
謝辞		141

図と表

第1章

- 図 1.1 同期サーボモータの外観の例
- 図 1.2 永久磁石を用いたロータ構造の例
- 図 1.3 マシニングセンタの外観の例
- 図 1.4 マシニングセンタに搭載されたサーボモータの部位の例
- 図 1.5 実加工を行うワークピースの例（1）
- 図 1.6 実加工を行うワークピースの例（2）
- 図 1.7 サーボモータと送り軸の挙動を測定する測定システム
- 図 1.8 実加工実験を行うテストサイト
- 図 1.9 加工面性状を測定する測定装置の外観の例
- 図 1.10 本研究の全体の構成
- 表 1.1 サーボモータとマシニングセンタのキーワード検索結果（国内）
- 表 1.2 キーワード検索された7件の論文の論文名と概略内容（国内）
- 表 1.3 サーボモータとマシニングセンタのキーワード検索結果（海外）
- 表 1.4 キーワード検索された2件の論文の論文名と概略内容（海外）

第2章

- 図 2.1 同期サーボモータの外観の例（再掲）
- 図 2.2 永久磁石を用いたロータ構造の例（再掲）

- 図 2.3 マシニングセンタの外観の例（再掲）
- 図 2.4 マシニングセンタに搭載されたサーボモータの部位の例（再掲）
- 図 2.5 サーボモータと機構部の送り軸の 2 慣性系力学モデル
- 図 2.6 慣性モーメント比と加減速性能との関係
- 図 2.7 慣性モーメント比と制御性との関係
- 図 2.8 マシニングセンタの用途別の種類
- 図 2.9 マシニングセンタの主な加工対象
- 図 2.10 マシニングセンタの送り軸とサーボモータの慣性モーメント比
- 表 2.1 加減速性能，制御性と慣性モーメント比との関係
- 表 2.2 加工現場で稼働するマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント
- 表 2.3 マシニングセンタに搭載されたサーボモータの慣性モーメント
- 表 2.4 マシニングセンタの種類，主な加工対象，慣性モーメント比の関係

第 3 章

- 図 3.1 サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比
- 図 3.2 ハイサイクル加工のワークピースの例（クランクケース）
- 図 3.3 高精度高品位加工のワークピースの例（銅電極）
- 図 3.4 ハイサイクル加工実験に於ける送り軸 3 軸の慣性モーメント比
- 図 3.5 ハイサイクル加工実験に於ける送り軸 3 軸の慣性モーメントの合計値
- 図 3.6 高精度高品位加工実験に使用したワークピース
- 図 3.7 高精度高品位加工実験に使用した加工パス
- 図 3.8 高精度高品位加工実験に於ける送り軸 3 軸の慣性モーメント比
- 図 3.9 高精度高品位加工実験に於ける送り軸 3 軸の慣性モーメントの合計値
- 図 3.10 総慣性モーメントを一定とする比較実験用の積載物とその配置

表 3.1	サーボモータの主な仕様
表 3.2	サーボモータのステータとロータの断面の概略
表 3.3	マシニングセンタの主な仕様
表 3.4	ハイサイクル加工でサーボモータに要求される主な特性
表 3.5	高精度高品位加工でサーボモータに要求される主な特性
表 3.6	ハイサイクル加工実験に於ける送り軸 3 軸の慣性モーメント
表 3.7	ハイサイクル加工実験に於ける加工条件
表 3.8	ハイサイクル加工実験に於ける早送り位置決め時間と総加工時間
表 3.9	高精度高品位加工実験に於ける加工条件
表 3.10	高精度高品位加工実験に於ける送り軸 3 軸の慣性モーメント
表 3.11	加工面粗さと加工面品位（負荷側の慣性モーメントが一定）
表 3.12	加工面粗さと加工面品位（総慣性モーメントが一定：比較実験）
表 3.13	サーボモータと機構部の送り軸で構成される制御系の共振比（計算結果）
表 3.14	サーボモータと機構部の送り軸で構成される制御系の共振比（実測結果）

第 4 章

図 4.1	サーボモータと送り軸の挙動を測定する測定システム（再掲）
図 4.2	エンコーダ信号に基づく送り軸の挙動の表示方法（二次元）
図 4.3	ハイサイクル加工実験に於ける送り軸 3 軸の慣性モーメント比
図 4.4	高精度高品位加工実験に使用したワークピースと加工パス
図 4.5	高精度高品位加工実験に於ける送り軸 3 軸の慣性モーメント比
図 4.6	エンコーダ信号に基づく送り軸の挙動の表示方法（三次元）
表 4.1	ハイサイクル加工実験に於ける送り軸の位置と速度
表 4.2	ハイサイクル加工実験に於ける位置と速度の波形の拡大図

表 4.3	高精度高品位加工実験に於ける X, Z 各軸の動作パターン
表 4.4	高精度高品位加工実験に於ける X, Z 各軸の位置偏差
表 4.5	高精度高品位加工実験に於ける X, Z 両軸の位置偏差の合成値
表 4.6	高精度高品位加工実験に於ける X, Z 両軸の位置偏差の合成値
表 4.7	加工面粗さと加工面品位の測定結果の比較 (2D)
表 4.8	加工面粗さと加工面品位の測定結果の比較 (3D)

第 5 章

図 5.1	実在する高品位加工のワークピース (銅電極)
図 5.2	実在する高品位加工のワークピース (ペットボトル用金型)
図 5.3	実在する高品位加工のワークピース (高機能携帯電話のケース)
図 5.4	実在する高品位加工のワークピース (高級腕時計のベゼル)
図 5.5	高品位加工に影響を与える構成要素の全体像
図 5.6	三次元可視化画像測定装置とその測定評価の流れ
図 5.7	高品位加工に影響を与える構成要素の全体像 (再掲)
図 5.8	高品位加工に影響を与える構成要素の流れ
図 5.9	構成要素と加工結果との相関の事例 (CAM の設定)
図 5.10	構成要素と加工結果との相関の事例 (サーボ制御)
図 5.11	構成要素と加工結果との相関の事例 (主軸バランス)
図 5.12	構成要素と加工結果との相関の事例 (加工工具)
図 5.13	三次元可視化画像測定装置とその測定評価の流れ (再掲)
図 5.14	三次元表面性状を表現する評価指標の事例
表 5.1	高品位加工の評価時に着眼する加工箇所と評価ポイント
表 5.2	高品位加工実験に於ける送り軸 3 軸の総慣性モーメント ($J_b + J_m$)

表 5.3	高品位加工実験に於ける送り軸 3 軸の慣性モーメント比 (J_b/J_m)
表 5.4	高品位加工実験に於けるワークピース毎の加工条件
表 5.5	加工面粗さと加工面品位の測定結果 (銅電極)
表 5.6	加工面粗さと加工面品位の測定結果 (ペットボトル用金型)
表 5.7	加工面粗さと加工面品位の測定結果 (高機能携帯電話のケース)
表 5.8	加工面粗さと加工面品位の測定結果 (高級腕時計のベゼル)
表 5.9	テスト加工用ワークピースを使用した実加工実験の結果 (再掲)
表 5.10	各ワークピースと慣性モーメント比が与える影響との関係の比較
表 5.11	三次元表面性状を表現する評価指標の候補
表 5.12	テスト加工用ワークピースの加工表面の Str 値計算事例
表 5.13	銅電極の加工表面の Str 値計算事例
表 5.14	高級腕時計のベゼルの加工表面の Str 値計算事例

第1章 序論

1.1 本研究の背景

1.2 従来研究の概要

1.2.1 国内の従来研究

1.2.2 海外の従来研究

1.2.3 従来研究の考察

1.3 本研究の目的

1.4 本研究の手法

1.5 本論文の構成

第1章 序論

1.1 本研究の背景

近年の工作機械に於いて、機械自身の高剛性化や高精度化の開発改良に、制御装置や加工工具などの急速な進歩が重畳し、その加工性能は目覚ましい進歩を遂げている。工作機械の加工性能に影響を及ぼす主要な構成要素として、機械剛性や主軸振動など機械自身の性能の他にも、加工プログラム、制御装置即ち CNC とサーボ、加工工具、加工条件即ち送り速度や主軸回転数のなどが挙げられるが、それらの構成要素の各々に於いて、学会では理論並びに実験の両面での研究が行われ、産業界では実際の商品機能の開発改良が進められている。

工作機械の代表例であるマシニングセンタに於いても、その最重要市場である自動車部品加工向けに要求されるハイサイクル加工性能或いは高精度金型加工向けに要求される高精度高品位加工性能は、年々着実に強化されている。この中で、後者の高品位加工に関しては、従来高精度金型市場だけが主要な市場であったが、近年これに加えて高機能携帯電話、所謂スマートフォンの登場と、その部品加工市場の急速な拡大が、この用途での工作機械、特に高精度高品位加工市場向けのマシニングセンタの進化を加速させている。

上述の通り、工作機械の加工性能に影響を及ぼす構成要素は複数存在するが、制御装置はやはりその中核をなす要素であり、制御装置の中でも送り軸のサーボモータは重要な役割を果たす。マシニングセンタに於いても、機構部の送り軸の高速高加速化、或いはその送りの滑らかさ、結果として加工形状の高精度化や加工面の高品位化のために、サーボモータ及びサーボ制御が重要である事は、過去の研究から明らかである。特に、近年市場が急速に拡大している高品位加工に於いては、サーボ系の挙動の解明が必須と考えられる。

そこで、加工性能に重要な役割を果たすサーボモータの特性に着目する。一般に慣性モーメント以外はその特性値の良し悪しがほぼ一義的に決まる。最大トルクや連続定格トルクは大きければ大きい程良く、エンコーダの分解能や絶対精度は高ければ高い程良い。しかし、慣性モーメントだけは例外である。即ち、サーボモータが搭載される機構部の送り軸の慣性モーメントとの慣性モーメント比により、工作機械やマシニングセンタの加工性能が大きく左右されるという特徴を持つため、この観点からの詳細な検証と考察が必要となる。

サーボモータの慣性モーメントに関しては、加工時間の短縮を最優先とするハイサイクル加工では、サーボモータの慣性モーメントは制御装置が安定に制御出来る範囲で小さい方が好ましく、加工精度や加工面品位を最優先とする高精度高品位加工では、慣性モーメントは大きい方が好ましいという経験則が存在する。しかしながら、この経験則を理論から実加工まで含めて定量的に論じた研究はこれまでに殆どなく、それに近い文献はあっても経験則を理論的に裏付けるまでには至っておらず、研究結果もあまり残されていなかった。

この経験則が定量的な研究結果として残されていないために、実際にサーボモータ或いは工作機械を設計する際の慣性モーメントに関する知識と考察が不足し、その結果、慣性モーメント比が適切な範囲に収まらず、良い加工面が得られなかった事例も過去に散見された。例えば、従来機種に対して定格トルクなどは同等で、慣性モーメントのみ半減させたサーボモータが開発されたが、単体での加減速能力は大きく向上したものの、それを搭載した工作機械の送り軸を安定して制御する事が出来なくなったという事例も過去に存在した。

また、上述の高精度高品位加工に関して、高精度金型加工に加えてスマートフォンの部品加工の急速な拡大が、この用途向け工作機械、特に高品位加工市場向けマシニングセンタの進化を加速させている。しかし、サーボモータとマシニングセンタの機構部の送り軸の慣性モーメント比がこの分野の加工結果に与える影響も未だ明らかではないため、この分野での更なる研究は必須である。また、その研究の過程で、従来目視による官能検査に頼っていた加工面品位に対する定量的評価指標、評価方法の提案も、一つの大きな課題となる。

1.2 従来研究の概要

サーボモータ単体の設計の最適化に関して論じた文献¹⁾²⁾、論文³⁾⁴⁾は過去に多数存在するが、サーボモータの特性とそれが搭載された工作機械の送り軸との適合性、という観点から論じられた文献⁵⁾、論文⁶⁾は少ない。特に、サーボモータの慣性モーメントは時に工作機械の加工性能に大きく影響する事が経験的に知られているが、両者の関係の定量的な研究はなされていない。例えば、論文⁷⁾、⁸⁾では、サーボモータの慣性モーメントがサーボ制御の動特性に与える影響を論じているが、工作機械の加工性能に与える影響には一切触れていない。逆に論文⁹⁾、¹⁰⁾では、工作機械の加工方法、加工条件が加工結果に与える影響を論じているが、サーボモータの慣性モーメントが与える影響には一切触れていない。

サーボモータとマシニングセンタに関する過去の文献、論文の内容を、幾つかの具体例を用いて更に精査してみる。論文⁷⁾、⁸⁾では、サーボモータの慣性モーメントがサーボ制御の動特性に与える影響を論じているが、論文⁷⁾では、サーボモータが制御する対象は工作機械ではなくロボットマニピュレータであり、また論文⁸⁾では、工作機械を制御対象としているものの加工性能や加工結果を議論の対象としてはいない。逆に論文⁹⁾、¹⁰⁾では、工作機械に装着された加工工具が加工面に与える影響を論じているが、論文⁹⁾では小型エンドミルが、論文¹⁰⁾ではPCD回転工具が、各々加工結果に与える影響を論じており、両論文共にサーボモータの慣性モーメントが加工結果に与える影響については一切触れていない。

以上、前節1.1節を本研究の背景として捉えて、本節1.2節ではサーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関する従来研究、即ち過去の論文、文献を調査し分析した。まず上述の通り、国内の論文を数件取り上げ、本研究で着目するサーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比が加工結果に与える影響に関する論文が、既に存在するか否かを確認し、この調査の範囲内では存在しないとの結果を得た。次に1.2.1節、1.2.2節で、本研究が従来実施されていない事を更に裏付ける目的で、国内、海外の学術情報データベースを使用してキーワード検索を行い、本研究に比較的近い論文を抽出して、その内容を確認した。その結果、この観点での研究は実施されていないとの結論を得た。最後に1.2.3節で、本研究即ちサーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比が加工結果に与える影響に関する研究が、従来実施されなかった理由を考察した。

1.2.1 国内の従来研究

既に述べた通り，サーボモータの特性，特に慣性モーメントが，工作機械の代表例であるマシニングセンタの加工性能に影響する事が経験的に知られているが，両者の関係を定量的に論じた文献，論文は少ない．例えば，サーボモータの慣性モーメントがサーボ系の動特性に与える影響を論じた論文は工作機械の加工性能に与える影響には触れておらず，逆に工作機械の加工方法，加工条件などが加工結果に与える影響を論じた論文はサーボモータの慣性モーメントが与える影響には触れていない．その理由はこの後の 1.2.3 節で考察するとして，実際にこの分野でどのような研究テーマが議論されているか，その具体的な傾向を知るために，まず国内の学術情報データベース CiNii を使用してキーワード検索を実施した．

学術情報データベース CiNii を使用して，サーボモータとマシニングセンタでキーワード検索を実施した検索結果を，表 1.1 に示す．サーボモータで約 1,100 件，マシニングセンタで約 1,500 件が検索されたものの，サーボモータとマシニングセンタの両者を含む検索結果となると激減して 7 件となる．そして，慣性モーメントをキーワードに加えた場合には，検索結果は僅か 4 件となるが，この 4 件は全て筆者らの研究である．これら 7 件の論文名とその概略内容を，表 1.2 に示す．表 1.2 より，筆者ら以外でサーボモータ及びマシニングセンタについて研究した数少ない論文でさえ，サーボモータの慣性モーメントがマシニングセンタの加工性能に与える影響には一切触れていない事が分かる．

国内のサーボモータ，サーボ制御，及び工作機械，マシニングセンタに関する文献^{11)~18)}，論文^{19)~35)}を更に精査すると，例えば文献 22)35)では，NC 工作機械の送り軸を対象として，サーボ制御の観点でその共振現象を検証しているが，サーボモータの慣性モーメントが加工結果に与える影響には言及していない．また論文 29)では，低慣性モーメントのサーボモータを用いた高速マシニングセンタの設計を主題として，論文 31)では，マシニングセンタの切削現象のモニタリングを主題としているが，いずれの論文に於いてもサーボモータの慣性モーメントが実加工結果に与える影響には言及していない．これらの調査結果から明らかな様に，サーボモータの特性とそれが搭載された工作機械の送り軸との適合性という観点から論じられた文献，論文は少なく，更にマシニングセンタなどの工作機械を使用して実際に実加工を実施し，加工結果に与える影響を論じた文献，論文は過去に見当たらない．

表 1.1 サーボモータとマシニングセンタのキーワード検索結果（国内）

Keyword	Count of Search results
サーボモータ	1,114
マシニングセンタ	1,512
サーボモータ and マシニングセンタ	7

表 1.2 キーワード検索された 7 件の論文の論文名と概略内容（国内）

Title	Overview
低慣性サーボモータとボールねじ駆動方式による超高速マシニングセンタの設計 ²⁹⁾ 水門, 機械設計, 41, 9 (1997)	低慣性サーボモータとボールねじによるリニアモータ相当（送り速度 60m/min）の高速マシニングセンタの設計
ロータリエンコーダを用いたサーボ傾斜角度計の開発 ³⁰⁾ 高橋ほか, 精密工学会学術講演会講演論文集 2007 年度精密工学会秋季大会	5 軸マシニングセンタの回転軸の傾斜角の検出にロータリエンコーダを用いた高精度測定装置の開発
マシニングセンタを用いた切削抵抗・切削現象のモニタリング ³¹⁾ 中川ほか, 精密工学会学術講演会講演論文集 2004 年度精密工学会秋季大会	マシニングセンタの切削抵抗・切削現象のモニタリング可能範囲についての検討
サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関する研究 ³²⁾ 内田裕之ほか, 精密工学会誌, 84, 4 (2018)	サーボモータとマシニングセンタの送り軸との慣性モーメント比に関する力学モデルによる検証と加工現場の調査
サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関する研究（第 2 報） ³³⁾ 内田裕之ほか, 精密工学会誌, 85, 6 (2019)	サーボモータの慣性モーメントの違いがマシニングセンタの加工性能に与える影響の研究
サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関する研究（第 3 報） ³⁴⁾ 内田裕之ほか, 精密工学会誌, 85, 11 (2019)	サーボモータの慣性モーメントの違いがマシニングセンタの送り軸とその駆動系に与える影響の研究
サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関する研究（第 4 報） ³⁵⁾ 内田裕之ほか, 精密工学会誌, 86, 10 (2020)	慣性モーメント比がマシニングセンタの高品位加工に与える影響の検証とその総括

1.2.2 海外の従来研究

次に、海外に関しても同様の検索を実施した。海外の学術情報データベース ScienceDirect を使用して、servomotor 或いは servo motor と machining center でキーワード検索を行った検索結果を、表 1.3 に示す。検索結果の傾向は国内と類似しており、servomotor 或いは servo motor で約 12,800 件、machining center で約 8,100 件が検索されたが、servomotor 或いは servo motor と machining center の両者を含む検索結果は 134 件となる。更にこの 134 件の中で、キーワードに moment を場合は 31 件に、或いは inertia を加えた場合には 43 件にまで減少し、本研究のキーワードとなる慣性モーメント即ち moment of inertia を加えると僅か 2 件にまで減少する。この 2 件の論文名とその概略内容を、表 1.4 に示す。

表 1.4 の上段の論文 36) では、論文の主旨はビルトイン位置センサを使用した送り軸のギアボックスの状態モニタであり、その目的はギアボックスの故障予知である。この論文の中で慣性モーメントは確かに登場するものの議論の中心ではなく、また実験装置として大型マシニングセンタが登場するものの機械加工や加工結果には触れていない。下段の論文 37) では、ボールネジの摩耗によるバックラッシュをセンサを用いずに推定する方法が解説されており、その推定方法の一環として、運動方程式の中でサーボモータの慣性モーメントが登場する。しかし、この論文の目的は工作機械の故障及び停止の予知であり、慣性モーメントは議論の中心ではなく、またこの論文に於いても機械加工や加工結果には触れていない。

他の海外の文献 38)、論文 39)~58) に於いても、サーボ制御、機械剛性、工具パスの生成などに関する内容が論じられているが、いずれもサーボ関連及び機械加工関連に大別され、慣性モーメントからマシニングセンタによる実加工結果までを論じる論文は見当たらない。更に、inertia ratio を論じた論文 59) では、その評価指標は送り軸の加速時の位置偏差、速度偏差であり、inertia mismatch を論じた論文 60) では、その制御対象はラックアンドピニオン機構やベルト結合機構であり、いずれも機械加工や加工時の軸送りの挙動に関しては触れていない。結局、工作機械と機械加工に影響を与える構成要素は多岐に亘り、その中でも特にサーボ制御と関連付けて研究するためにはその研究領域が広範囲に亘る事が、これまで研究対象となりづらかった理由と考えられる。この他にも、本研究領域がこれまで取り上げられなかった理由があると推測されるが、この理由に関しては次節即ち 1.2.3 節で考察する。

表 1.3 サーボモータとマシニングセンタのキーワード検索結果 (海外)

Keyword	Count of Search results
Servomotor or Servo motor	12,817
Machining center	8,123
(Servomotor or Servo motor) and Machining center	134
(Servomotor or Servo motor) and Machining center and Moment	31
(Servomotor or Servo motor) and Machining center and Inertia	43
(Servomotor or Servo motor) and Machining center and Moment of inertia	2

表 1.4 キーワード検索された 2 件の論文の論文名と概略内容 (海外)

Title	Overview
<p>Feed-axis gearbox condition monitoring using built-in position sensors and EEMD method³⁶⁾</p> <p>Yuqing Zhou, et al. : Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 27, 4(2011)785-793</p>	<p>工作機械の送り軸のギアボックスの状態を、高分解能高構度エンコーダ或いはリニアスケールを組み込んでモニタする事で、ギアボックスの故障を最小限に防ぐ方法を提案する。オープン CNC を採用してデータを取得すると共に、数学的メカニカルモデルを構築し、EEMD (Ensemble empirical mode decomposition) なる手法にまとめて、ギアボックスの故障を特定する。</p>
<p>Sensor-less estimation of positioning reversal value for ball screw feed drives³⁷⁾</p> <p>Ryuta Sato : Precision Engineering, 60 (2019) 116-120</p>	<p>サーボモータで駆動される送り軸は、長期間使用すると、ボールネジが摩耗してバックラッシュ量が拡大し、その結果送りの精度も悪化して機械が使用不可となる。そこで、サーボモータの位置とトルクのフィードバック信号を使用してこのバックラッシュ量を推定する方法を提案する。専用のセンサを使用しないセンサレス方式であるため、経済的であり実装も容易である。</p>

1.2.3 従来研究の考察

一般に、サーボモータの研究に於いては、単位体積当たりのトルクや出力の向上、銅損や鉄損の低減などが研究課題として着目される。一方、サーボ制御の研究に於いては、新たなアルゴリズムの導入による指令応答性や外乱抑圧性の向上などが、やはり研究課題となる。いずれの場合も、その駆動対象、制御対象の動特性への影響までは考慮されているが、そのサーボ系が搭載された工作機械で加工対象を実加工した場合の、加工性能や加工面に与える影響までは考慮されていない。これは、サーボ系の研究者にとって工作機械による実加工は研究対象からやや距離のある分野であり、また機械系の要素が加工結果に与える影響も多くサーボ系との因果関係を研究しづらい分野でもあるため、と考えられる。

同様に、工作機械の研究に於いては、機械の高剛性化、加工プログラムの最適化、最適な工具の選択、送り速度や主軸回転数など加工条件の最適化などが、研究課題として取り上げられる。いずれの場合も、サーボモータやサーボ制御などのサーボ系は使用する工作機械の仕様、特性という位置付けであり、これらを変更した場合の影響までは議論されていない。これは、工作機械の研究者にとってもサーボ系は研究対象からやや距離のある分野であり、それよりも加工結果への影響を直接評価出来る加工プログラム、加工工具、加工条件などを論じる方が直近の課題としてより重要であるため、と考えられる。それが慣性モーメントの与える影響ともなれば、工作機械の研究者には更に研究しづらい分野となる。

サーボモータと工作機械の双方に於いて、所謂高品位加工に関する研究が近年に至るまでさほど脚光を浴びていなかった点も、両分野にまたがる研究が少ない一要因と考えられる。サーボモータを用いた制御理論の制御対象は、近年ロボットやアクチュエータなどであり、従ってその中心は位置制御（PTP 制御）であった。工作機械の加工面品位の向上に直結する軌跡制御（CP 制御）の研究は、アーク溶接やレーザ溶接など、一部の分野に限られて来た。一方、工作機械の研究では、その中心は機械構造や工具選択の最適化であり、主たる目的は切削性能や加工効率の向上である。こちらも、加工面品位をサーボモータ或いはサーボ制御の変更により改善するという観点での研究の必然性は、従来さほど高くなかった。

サーボ系、特にサーボモータと工作機械の両分野にまたがった研究を推進しづらい、もう一つの現実的な理由は、工作機械と複数種類のサーボモータを準備し、そのサーボモータを逐一載せ替えて実験を行う事が、現実問題としての手間の大きさや費用の面で容易ではない点にあると考えられる。例えば、本研究の主題である慣性モーメント比の与える影響を研究するためには、トルクや回転速度など他の特性がほぼ同一で慣性モーメントのみ異なる複数種類のサーボモータを複数台製作して準備する事が、研究遂行上の一つの障壁となる。

更に、工作機械の実機を入手し立ち上げて、先に制作した複数種類のサーボモータを逐一載せ替える事が、現実には機械的、電氣的な各種調整を要する難作業となる。かつ、各々の条件でワークピースを実加工し評価するためには、適切な加工技術と測定技術が必須となる。即ち、本研究の主題となる慣性モーメント比に関する諸実験を、一貫性、整合性を持たせて実施するには、サーボモータと工作機械、両者を組み換える技術、工作機械を使用した加工技術、その加工結果の測定技術など、極めて広い範囲に亘る知見が必要となる。

国内、海外共に、サーボモータからマシニングセンタとその実加工結果までを関連付ける論文が見当たらない理由は、以上の通り、一つは学術的に異分野の研究となる、即ちサーボ系の研究者には工作機械の実加工が、マシニングセンタの研究者にはサーボ関連の研究が、従来の研究分野と異なり取り組みづらい点である。もう一つは、実際に検証実験を実施するための準備や作業が時間と費用を要する難作業となる点である。言い換えれば、この互いに異なる両分野を関連付けた研究が実施されれば、十分な新規性、有用性がある事になる。

1.3 本研究の目的

工作機械の加工性能を決める制御装置側の要因としては、送り軸のサーボモータが重要な役割を占める。サーボモータの特性の中で、慣性モーメント以外はその特性値の良し悪しがほぼ一義的に決まる。即ち、最大トルクや連続定格トルクは大きければ大きい程良く、エンコーダの分解能や絶対精度は高ければ高い程良い。しかしながら、慣性モーメントだけは、そのサーボモータが搭載される送り軸の慣性モーメントとの比により、その工作機械の加工性能が大きく左右されるという特徴を持つため、より深い議論が必要となる。

一般に、加工時間の短縮を最優先とするハイサイクル加工では、サーボモータの慣性モーメントは制御装置が安定に制御出来る範囲で小さい方が好ましく、加工精度や加工面品位を最優先とする高精度高品位加工では、慣性モーメントは大きい方が好ましい、との経験則が存在する。ただ、この経験則を理論から実加工まで含めて定量的に論じた研究はこれまでに殆どなく、更に実際に同じ条件で実加工実験を行い、その結果を測定して考察し、慣性モーメント比の違いが加工結果に与える影響を論じた研究は、これまでに存在しなかった。

マシニングセンタに於いては、機構部を構成する要素は送り軸系、主軸系、回転テーブルなど多岐に亘り、その静的特性と共に動的特性に関しても、数多くの研究がなされている。筆者らが着目した送り軸とその駆動系に於いても、熱変位や動摩擦の位置決め精度への影響などに関しては、当然の事ながら既に様々な報告がなされている。その中で、機構部の重要構成要素の一つであるサーボモータの慣性モーメントまで含めた論文が極めて少ない主たる理由は、1.2.3節で述べた通り、その難易度の高さにあると考えられる。即ち、サーボ関係の研究者にとって工作機械の実加工、マシニングセンタの研究者にとってサーボ制御は、共にやや縁遠く、実際に検証実験を行うための準備も大掛かりになるためである。

しかし一方で、サーボモータの慣性モーメントが工作機械の加工性能に大きく影響するという事実は、マシニングセンタの研究者、開発者の間では経験的に知られている。例えば、自動車部品加工用のライン加工機では、加工サイクルタイム短縮のために慣性モーメントの比較的小さなサーボモータが搭載されており、一方高精度金型加工機では、加工精度や加工面品位の向上のために、慣性モーメントの比較的大きなサーボモータが搭載されているが、特に後者に於いて、慣性モーメントの比較的大きなサーボモータが意図的に搭載されている点が特徴的である。即ち、サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関する経験則が、実際の加工現場では既に定着している事が分かる。

慣性モーメントに関する経験則が実際の加工現場で既に定着しているという事は、実際のサーボモータとマシニングセンタの設計の現場に於いても、この経験則が定着している事を

意味する。しかし、設計ノウハウを外部に流出させないなどの理由から、この経験則は従来具体的、定量的に論じられていなかった。そこで本研究では、1.2.3節で述べた難易度の高い研究に、敢えて取り組む。具体的には、慣性モーメントの異なるサーボモータの準備から、それらのマシニングセンタへの載せ替えと実加工実験、その加工結果の評価方法の提案などである。本研究を通して、サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関して一般的に知られていた経験則を、より具体的、定量的に裏付ける。

また、工作機械に求められる加工性能は時代と共に急速に高度化しているが、その中でも特にマシニングセンタによる高品位加工に関しては、従来の高精度金型市場に加えて、スマートフォンやスマートウォッチの登場がその傾向を加速させている。この市場要求に応えるためにも、上述の慣性モーメント比の議論を、経験則ではなく実験データを根拠に具体的、定量的に分析し、一連の研究結果として整理する。更に、高品位加工を実現する構成要素の全体像の把握、及びこれまで官能検査のみで評価されていた加工面品位の定量的評価方法の提案を今後の課題として明確化する。加工面品位に影響を与える構成要素の全体像の把握とその面品位の定量的評価方法の提案は、この分野の更なる発展に寄与すると考える。

以上の論点を整理した上で、本研究の主たる目的を以下の2点と定める。

- (1) サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関して、従来知られていた経験則を、マシニングセンタを用いた実加工実験を通して、具体的、定量的に裏付ける。そして、マシニングセンタの設計に際して、想定する使用用途や加工対象などを十分考慮した上で送り軸用のサーボモータを選定するための、サーボモータと送り軸の慣性モーメント比に関する基本的な選定指標を提案する。
- (2) 近年市場が急速に拡大している高品位加工の評価方法に関して、これまで主流であった官能検査に代わる、一つの定量的評価方法を新たに提案する。具体的には、三次元表面粗さ・形状測定機を使用した撮像、及び送り軸の挙動を測定する専用の測定システムによる測定を活用した評価方法を提案する。これらの提案により、これまで官能検査のみであった高精度金型の面品位などの評価方法に対しても、一つの指針を提供する。

1.4 本研究の手法

本研究では、1.3 節で示した目的を達成するために、トルクや回転速度など他の特性がほぼ同等で慣性モーメントのみが異なる 3 種類のサーボモータ、小型だが実加工実験の実施には十分な機能性能を持つマシニングセンタ、実加工実験用のワークピースと治工具、及び加工結果を評価するための測定機器を準備する。この準備は、現実問題としては、実加工実験を行うための専用のテストサイトを設ける事から始まるかなり大掛かりなものとなる。また、各々の条件下でワークピースを実加工して加工結果を評価するには、加工技術と測定技術を持つ複数の技術者の参画も必須となる。即ち、本研究の目的の達成にはマシニングセンタにサーボモータを載せ替える技術、マシニングセンタによる加工技術、加工したワークピースの測定技術など、広範囲に亘る綿密な準備が必要となる。これら一連の工作機械を使用した実加工による具体的、定量的な検証こそが、本研究の大きな特長の一つである。

また、本研究の前半部に於いて、簡単な力学モデルによる理論検証と共に、実際に市場の加工現場で稼働するマシニングセンタ及びそれに搭載されたサーボモータの慣性モーメントなどの実機調査を行う点も、一つの特長である。テストサイトでの実加工実験の前に、まず市場で稼働するマシニングセンタとサーボモータの実態を調査し、全体の傾向を把握する。また、本研究の後半に登場する高品位加工の評価に於いて、従来の表面粗さ計による測定に加えて、専用に準備した測定システムを活用した機構部の送り軸の挙動の測定、三次元表面粗さ・形状測定機を用いた表面性状の三次元可視化画像による評価など、より定量的な測定評価のために複数の方法論を導入する点もまた一つの特長である。これらの特長は、サーボモータとマシニングセンタという 2 つの大きな分野に跨る研究を、一貫性、整合性、客観性を持たせて実施するためには必須であり、必然的に導入されたものである。

ここで、本研究で実施する実加工実験のために準備する機器、装置、設備などを具体的に紹介する。まず図 1.1, 図 1.2 に、同期サーボモータの外観と、永久磁石を内蔵したロータの例を示す。また図 1.3, 図 1.4 に、マシニングセンタの外観の例と、それに搭載されたサーボモータの部位の例を示す。図 1.5, 図 1.6 には、実加工を実施するワークピースの例を示し、図 1.7 には、実加工実験でサーボモータと送り軸の挙動を測定する測定システムを示す。更に図 1.8, 図 1.9 には、本研究で実施する実加工実験を行うテストサイトと、加工面性状を測定する三次元表面粗さ・形状測定機の外観の例を示す。これらの図からも、本研究で実施する一連の検証が、様々な機器、装置、設備を駆使するものである事が分かる。

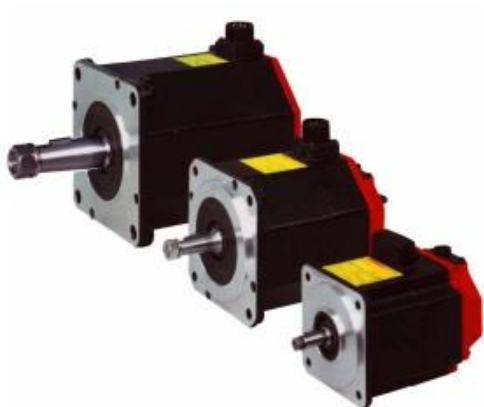


図 1.1 同期サーボモータの外観の例



図 1.2 永久磁石を用いたロータ構造の例



図 1.3 マシニングセンタの外観の例

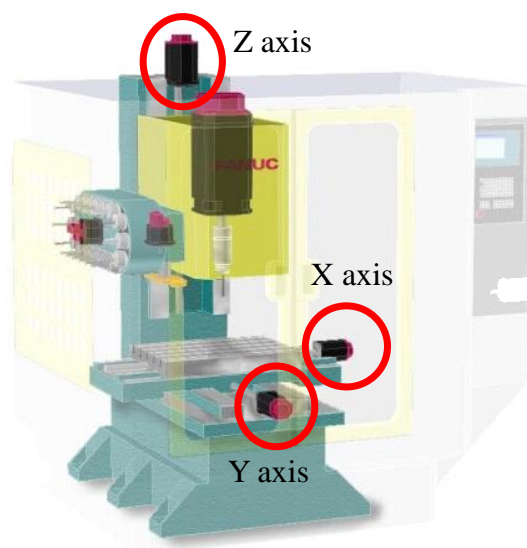


図 1.4 マシニングセンタに搭載されたサーボモータの部位の例

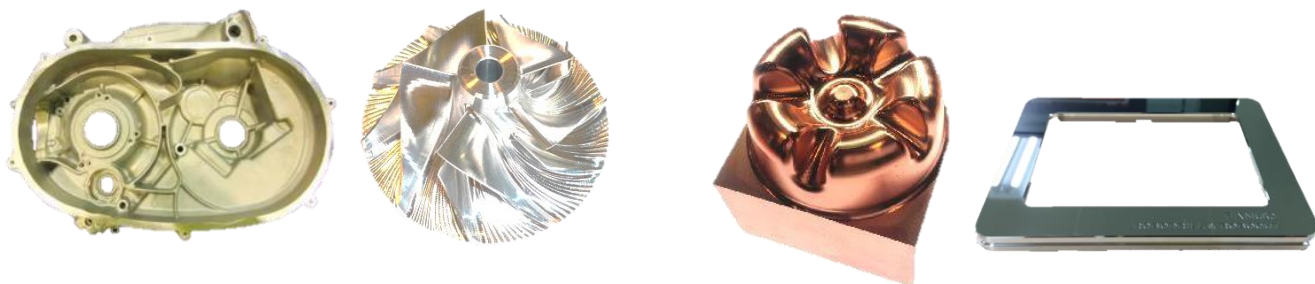
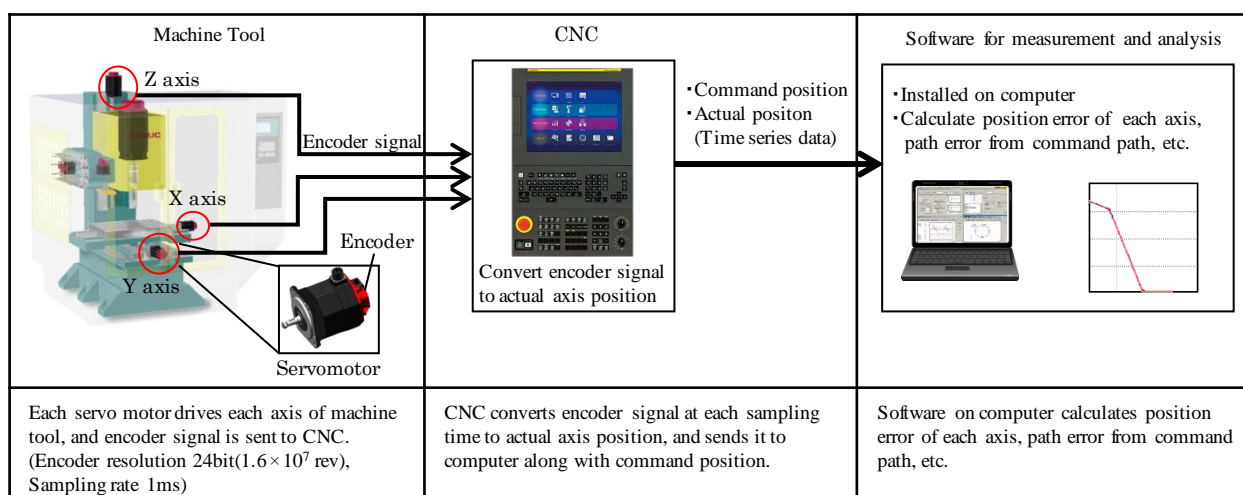


図 1.5 実加工を行うワークピースの例 (1) 図 1.6 実加工を行うワークピースの例の (2)



Note) Servo Tuning Tool FANUC SERVO GUIDE (FANUC CORPORATION)

図 1.7 サーボモータと送り軸の挙動を測定する測定システム



図 1.8 実加工実験を行うテストサイト



図 1.9 加工面性状を測定する測定装置の外観の例

1.5 本論文の構成

本論文の第 1 章から第 6 章までの主な内容とその流れを、以下に示す。最初に理論検証と実際の加工現場での実機調査を行い、次に本研究の中心となる実加工実験と加工結果の測定評価、及びその際のサーボモータの挙動の測定を行う。そして後半では、高品位加工に着目した実加工実験を追加すると共に、面品位に関する新たな評価方法を提案する。

具体的には、以下の 4 つの課題に関して各章を設けて議論し、その議論を通じて慣性モーメント比の違いが加工結果に与える影響を様々な観点から多角的に研究する。

- (1)力学モデルによる理論検証と、実際に加工現場で稼働するマシニングセンタの調査
- (2)慣性モーメントの異なるサーボモータとマシニングセンタとを組合せた実加工実験
- (3)上記実加工実験の測定結果とマシニングセンタの送り軸の挙動の測定結果との比較
- (4)高品位加工に着目しての、実在するワークピースを用いた追加実験と全実験の総括

また、この 4 つの課題に関して議論を展開する全 4 章の前後に、序論と結論を論じる章を設ける。以下に、全 6 章からなる本研究の構成の骨子とその流れを示す。

第 1 章 序論

1.1 節から 1.5 節の全 5 節にて、本研究の背景、従来研究の概要、本研究の目的、本研究の手法、本論文の構成を論じる。1.2 節では、サーボモータとその制御、工作機械と加工技術に関する文献と論文の中で、本研究の課題である両分野にまたがる研究をテーマとする論文を、国内、海外の学術情報データベースを使用して抽出し、本研究との差異を確認する。1.2.3 節では、本研究の課題が従来行われなかった理由を考察し、本研究の新規性を示す。そして 1.3 節で、本研究の目的、1.4 節で本研究の手法、1.5 節で本論文の構成を論じる。

第 2 章 サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比

まず 2.1 節で本章の概要を示し、次に 2.2 節でマシニングセンタの動特性に影響するサーボモータの主な性能指標を示す。続く 2.3 節では、サーボモータとマシニングセンタの機構部の送り軸との慣性モーメント比に関して簡単な力学モデルによる考察を行う。一方 2.4 節では、実際に加工現場で稼働する合計 12 機種のマシニングセンタを対象として、そのサーボモータと機構部の送り軸の慣性モーメント比を調査しその結果を考察する。即ち、2.3 節では理論的な考察を行い、2.4 節では実機の調査結果に基づいた考察を行い、2.5 節で両者の結果を比較して検証する。最後に 2.6 節で、本章の内容を総括する。本章で、慣性モーメント比に関する既存の経験則を、まず理論的な考察と実機調査の考察で裏付ける。

第3章 慣性モーメント比の違いがマシニングセンタの加工性能に与える影響

まず 3.1 節で本章の概要を示し、次に 3.2 節で本研究の議論の中心となる、サーボモータとマシニングセンタを用いた実加工実験による検証のための準備を整える。具体的には、慣性モーメントのみが異なり他の特性がほぼ同一の 3 つのグループのサーボモータと、実加工が可能な小型立形マシニングセンタが、実験装置の中心である。また 3.3 節では、実加工実験に先立ち、マシニングセンタを用いた加工の種類と、各々に於いてサーボモータに要求される主な仕様を示す。加工内容としては、部品加工市場で必要とされるハイサイクル加工、金型加工市場で必要とされる高精度高品位加工の 2 つを取り上げる。そして 3.4 節で実加工実験の手法と結果を示し、3.5 節で結果を考察し、最後に 3.6 節で本章を総括する。本章で、慣性モーメント比に関する既存の経験則を、慣性モーメントのみ異なり他の仕様が同等のサーボモータとマシニングセンタを組合せた実加工実験により、初めて具体的に実証する。

第4章 慣性モーメント比の違いがマシニングセンタの送り軸の挙動に与える影響とその評価のための測定システム

まず 4.1 節で本章の概要を示し、次に 4.2 節で第 3 章の実加工実験に於いて送り軸のサーボモータの挙動を測定し検証する手法を示す。具体的には、第 3 章と同じ実験装置と加工プログラムで、実切削を伴わない所謂空運転を行い、その際の機構部の送り軸の挙動を、サーボモータのエンコーダから得られるフィードバック信号を用いて定量的に測定し、その結果を分析する。実加工実験は、工作機械の最終的な加工性能を把握出来る点に長所がある一方で、サーボモータの挙動測定は、送り軸の挙動のみの評価が可能である点に長所がある。実際の現場では、この 2 つを併用して工作機械の加工性能を効率良く評価する事が多い。4.3 節から 4.5 節の流れは第 3 章の 3.3 節から 3.5 節とほぼ同様で、4.5 節で実験結果を考察し、最後に 4.6 節で本章を総括する。第 3 章で実証する慣性モーメント比に関する既存の経験則を、本章では別の手法で裏付けると共に、送り軸の挙動に着目する新たな測定方法を提案する。

第5章 慣性モーメント比がマシニングセンタの高品位加工に与える影響の検証とその総括

まず 5.1 節で、本章の概略を示し、次に 5.2 節で、焦点を高品位加工に絞り、高精度金型や高級時計など、複数の実在する部品、或いはそれを模したワークピースで実加工実験を実施する。5.3 節で、一連の実加工実験の結果を整理し、5.4 節で、その結果に対する考察を行い、一連の実加工実験を通して、第 3 章、第 4 章で使用するテスト加工用ワークピースを高品位加工の評価に使用する事の妥当性を裏付ける。5.5 節で、高品位加工の実現について考察し、更に 5.6 節で高品位加工の全体像、5.7 節で定量的評価指標に関する今後の課題を取り上げて、最後に 5.8 節で本章を総括する。本章では、慣性モーメント比が高品位加工に与える影響を、複数の現実に近い加工部品の実加工実験を通して更に明確に裏付ける。

ここで、上述の高精度高品位加工について補足説明を加える。第4章までは高精度加工と高品位加工とを一つのグループとしているが、両者は厳密には同一ではない。前者では寸法精度や形状精度に着目し、後者は見た目の滑らかさや質感に着目する。しかし、要求される機能要件は互いに類似し、かつ両者共にもう一方の代表的事例であるハイサイクル加工とは対極をなすので、第4章までは高精度高品位加工という表現で同一グループとして扱う事とする。また、両者の相違に関しては、第5章5.5.1節で改めて詳しく論じる。

第6章 結論

6.1節で、本研究の中心となる第2章から第5章までの内容を要約し総括する。6.1.1節に示す本研究の結論の焦点は、慣性モーメント比に関する既存の経験則の、具体的、定量的な実証にある。また6.1.2節では、第2章から第5章までの議論の過程で新たに考案する計算、調査、実験、評価に関する手法を列挙する。これらの新たな提案の中で、特に複数のサーボモータグループとマシニングセンタを準備する一連の実加工実験とその測定評価の手法は、この分野での今後の研究への指針となると考える。6.2節では、本研究で得られた結論を更に発展させるため追加研究が期待される項目を列挙する。6.2.1節では、本研究で残された研究課題、6.2.2節では本研究を超えた研究課題を、各々示す。高品位加工に影響を与える要素の全体像の把握と官能検査に代わる高品位加工の定量的な評価指標の提案は、いずれも相当な難題であると予想されるが、この分野での今後の重要な研究課題となると考える。

以上が、全6章からなる本論文の構成の骨子とその基本的な論旨の流れである。最後に、本研究の構成、第2章から第5章までの関係を図1.10に示し、本章の総括とする。

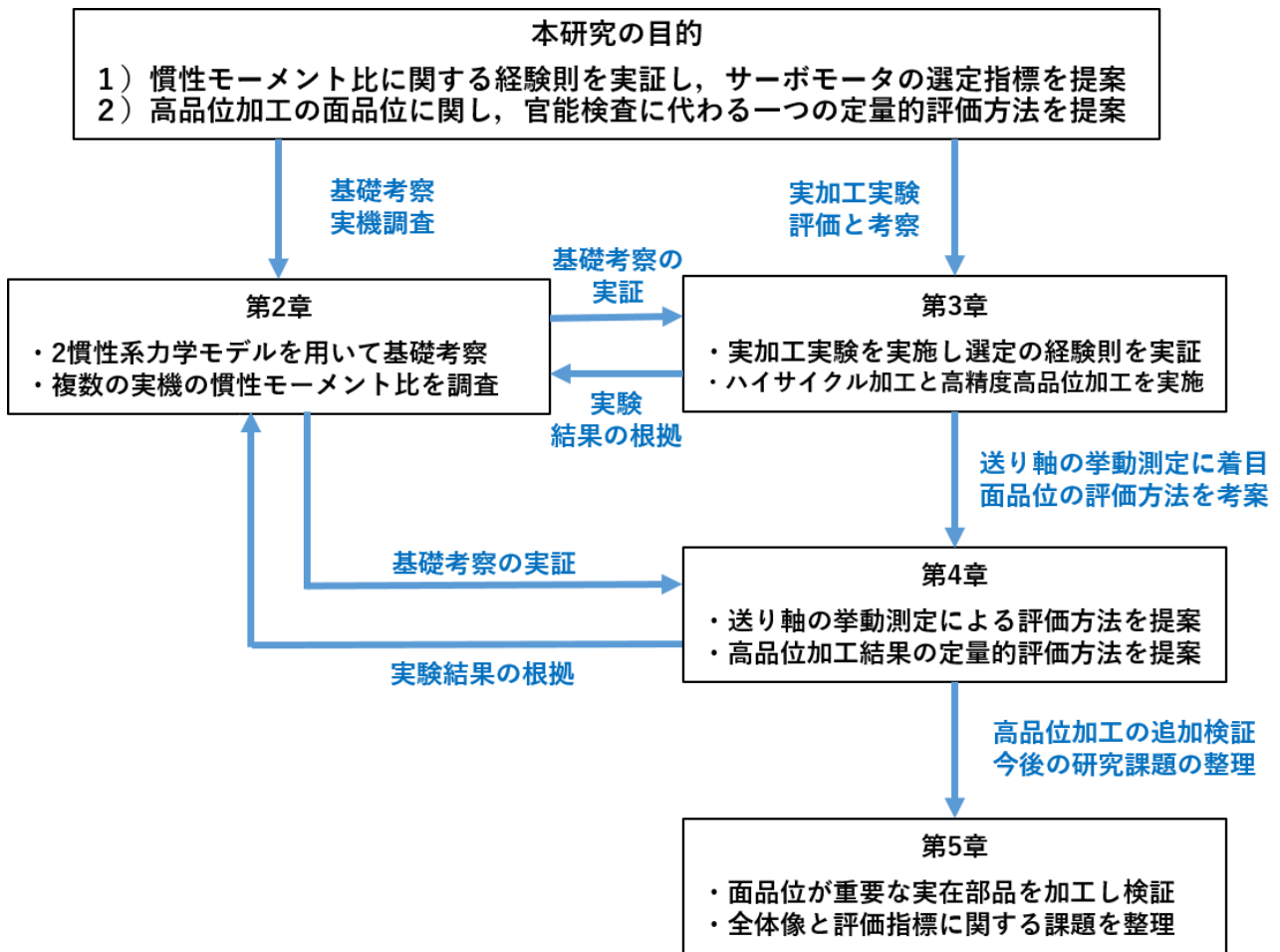


図 1.10 本研究の全体の構成

第2章 サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比

2.1 緒言

2.2 マシニングセンタの送り軸の動特性に影響するサーボモータの主な性能指標

2.3 サーボモータと機構部の送り軸の慣性モーメント比に関する考察

2.3.1 サーボモータと機構部の送り軸との関係を表す力学モデル

2.3.2 機構部の送り軸の加減速性能に着目した場合

2.3.3 機構部の送り軸の制御性に着目した場合

2.3.4 機構部が着目する性能指標とサーボモータの慣性モーメントとの関係

2.4 加工現場で稼働するマシニングセンタに於ける慣性モーメント比の分析と考察

2.4.1 マシニングセンタの主な種類と慣性モーメント比との関係

2.4.2 マシニングセンタの主な加工対象と慣性モーメント比との関係

2.5 力学モデルによる考察と加工現場で稼働するマシニングセンタの分析による考察との比較

2.6 結言

第2章 サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比

2.1 緒言

第1章にて示した通り、サーボモータ単体の設計の最適化に関して論じた文献、論文は過去に多数存在するが、サーボモータの特性とそれが搭載される工作機械の送り軸との適合性、という観点から論じられた文献、論文は少ない。更に、サーボモータ単体の特性が、実際に工作機械の加工にどのような影響を与えるか、という点にまで踏み込んだ研究はなされていない。しかし、実際には、サーボモータは工作機械の送り軸に搭載されて性能を発揮する事が求められる。またその特性が工作機械の加工性能に大きく影響する事も、第1章で述べた通りである。

サーボモータ単体の主な性能指標として、連続定格トルク、瞬時最大トルク、連続回転速度、最高回転速度、慣性モーメント、コギングトルクなどが挙げられる。但し、サーボモータが各種工作機械の送り軸への適不適を考慮されずに選定され搭載されると、サーボモータ単体の性能が十分発揮されない場合がある。特に、その慣性モーメントは、工作機械の機構部の送り軸の慣性モーメントとの適合性により、送り軸の動特性に大きな影響を与え、結果として工作機械の加工性能も左右する。従って、慣性モーメントの適合性が良好となる、即ち慣性モーメント比が適正となる様なサーボモータを選定し搭載する事が、そのサーボモータの性能を最大限に活かして、工作機械が本来持つ加工性能を十分に発揮させるための必要条件となる。

そこで本章では、サーボモータと工作機械の代表例であるマシニングセンタの送り軸との関係を取り上げる。まず、サーボモータの慣性モーメントに着目し、その値と機構部の送り軸の慣性モーメントとの比率、即ち慣性モーメント比について、簡単な力学モデルを用いて考察を行う。次に、実際に加工現場で稼働する様々な種類のマシニングセンタに着目し、それらに搭載されたサーボモータと機構部の送り軸との慣性モーメントを調査し分析して、慣性モーメント比という観点から、マシニングセンタの送り軸とサーボモータとの関係を考察する。そして最後に、力学モデルを用いて考察した結果と実際に加工現場で稼働するマシニングセンタを調査して考察した結果を比較し検証する事で、まず両者の基本的な相関関係を明らかにする。

2.2 マシニングセンタの送り軸の動特性に影響するサーボモータの主な性能指標

工作機械の送り軸には、最近では永久磁石を内蔵する同期サーボモータが採用される事が殆どである。これは、近年の永久磁石の性能向上に伴い、永久磁石を内蔵する同期モータの方が他の動作原理のモータと比較して、サーボモータの重要な性能である加減速性能や制御性を高く設定出来るためである。モータの動作原理は本研究の内容に直接関係しないが、工作機械の機構部の送り軸の駆動には同期サーボモータが用いられる事が多い。図 2.1, 図 2.2 に、文献 61)~66)に記載されている同期サーボモータの外観と永久磁石を用いたロータ構造の例を示す。

一方マシニングセンタは、フライス加工、エンドミル加工、ドリル加工、タップ加工など多種多様な加工を連続して行う事が出来る、代表的な工作機械である。図 2.3, 図 2.4 に、各種のマシニングセンタ^{67)~74)}の中で、文献 67)に示された基本的な軸構成を持つ機種の外観と、各軸に搭載されたサーボモータの部位の例を示す。図 2.4 の送り軸は、一般的な X, Y, Z の直交 3 軸の構成である。文献 38)で示される通り、直交 3 軸で並進運動する送り機構により工具と加工対象との相対位置を変化させて加工対象を加工する構成が、マシニングセンタの標準的な構成である。

サーボモータの主な性能指標として、連続定格トルク、瞬時最大トルク、連続回転速度、最高回転速度、慣性モーメント、コギングトルク、寸法形状、重量などが挙げられる。また、サーボモータが工作機械に搭載された際の重要な性能指標として、加減速性能と制御性が挙げられる。ここで特筆すべき点は、上述のサーボモータの主な特性の中で、慣性モーメントを除いてサーボモータの性能指標の良し悪しがほぼ一義的に決まる点である。即ち、トルクは大きければ大きい程、速度は速ければ速い程良く、トレードオフの要素はほぼない。

しかし、慣性モーメントだけは、サーボモータが搭載された工作機械の機構部の送り軸の慣性モーメントとの適合性が重要であり、小さい方が良く、或いは大きい方が良く一義的には決められない。端的に言えば、工作機械の機構部の加減速性能を上げるにはサーボモータの慣性モーメントは小さい方が良く、逆に制御性を上げるにはサーボモータの慣性モーメントは大きい方が良く、文献 61)62)などに於いても言及されている。そこで、本章では、サーボモータの慣性モーメントが与える影響に関する議論を、従来の議論より定量的、具体的に検証する。

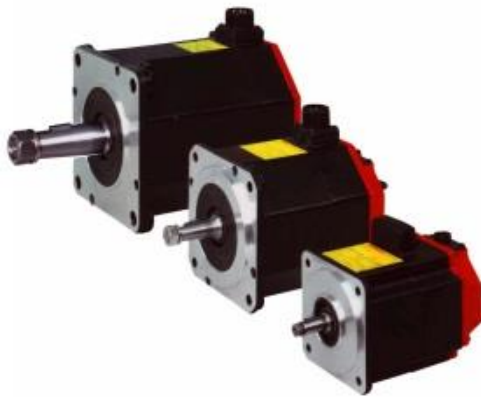


図 2.1 同期サーボモータの外観の例
(再掲)



図 2.2 永久磁石を用いたロータ構造の例
(再掲)



図 2.3 マシニングセンタの外観の例
(再掲)

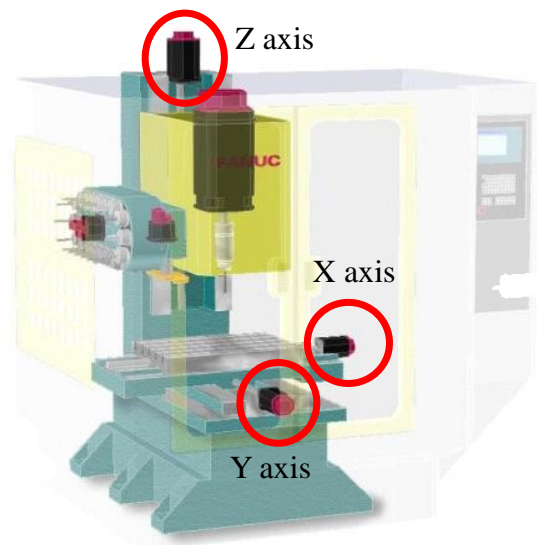


図 2.4 マシニングセンタに搭載された
サーボモータの部位の例
(再掲)

2.3 サーボモータと機構部の送り軸の慣性モーメント比に関する考察

2.2 節で述べた通り，サーボモータ単体の主な性能指標の中で，慣性モーメントだけはサーボモータが搭載される工作機械の機構部の送り軸の慣性モーメントとの適合性こそが重要であり，小さい方が良く或いは大きい方が良く一義的に決められない．即ち，慣性モーメントはサーボモータの選定に際しての，一つの重要な焦点となる．そこで本節では，サーボモータの慣性モーメントと機構部の送り軸の慣性モーメントとの比率，即ち慣性モーメント比が機構部の動特性に与える影響について，簡単な2慣性系力学モデルを用いて考察を行う．

ここで，本研究に於いて工作機械の送り駆動系を2慣性系と見なす事は，以下の理由で妥当であると考えられる．工作機械の送り軸は，一般にばね要素を持つボールネジを介してサーボモータで制御するため，制御的には2慣性系と見なして議論する例が多い¹⁹⁾²⁰⁾．但し，ボールネジなどのばね要素を殆ど持たない駆動系，例えば比較的単純な構造のアクチュエータの場合には1慣性系と見なす場合もある．一方，ボールネジと加工テーブルとの間にも更にばね要素を持つ制御軸，例えば超大型加工機の駆動系などの場合には3慣性系と見なす方が適切な場合もある．しかし，工作機械の送り軸系の基本的な動特性を議論する場合には，従来の研究と同様にまず2慣性系と見なす事が適切であると考えて，第2章即ち本章では2慣性系として様々な考察を進める．

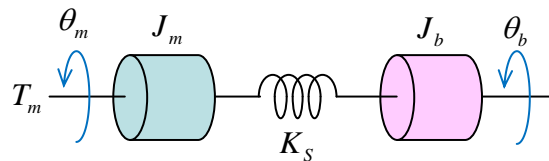
2.3.1 サーボモータと機構部の送り軸との関係を表す力学モデル

慣性モーメントについて議論する場合，サーボモータの慣性モーメント J_m と機構部の送り軸の慣性モーメント J_b とをねじり剛性 K_s を持つ機構要素で結合した力学モデル，即ち2慣性系力学モデルとして検証を行う場合が多い．図2.5に，サーボモータの慣性モーメントと機構部の送り軸の慣性モーメントを用いた2慣性力学モデルを，そして式(2.1)に，その伝達関数の例を示す．工作機械に於いて， J_m と J_b とを結合する機構的要素を，ばね性を有するボールネジとすると，図2.5及び式(2.1)で示す2慣性系力学モデルで， J_m と J_b との関係を論じる事が可能である．

図2.5で，サーボモータの慣性モーメント J_m と機構部の送り軸の慣性モーメント J_b の和，即ち $J_m + J_b$ が，この回転系の慣性モーメントの総和となる．サーボモータが発揮出来る加減速性能は最大トルク T_m を慣性モーメントの総和 $J_m + J_b$ で割った値なので， J_b が小さい程， J_m が回転系全体に与える影響力が大きくなり，逆の場合はその結果も逆となる．即ち， J_b が小さい機構部の送り軸は， J_m が小さい低慣性サーボモータで駆動する事で加減速性能が十分に発揮され，送り軸として高い加減速動作が可能となる．逆に J_b が大きい場合，この回転系では J_b が支配的となり， J_m が小さい低慣性サーボモータで駆動する事による加減速性能向上の効果は小さくなる．

一方，サーボ制御系の制御性を高め，サーボモータを滑らかに駆動したい場合には，慣性モーメントの総和 $J_m + J_b$ ではなく J_m と J_b との比率に着目する．図2.5で J_m と J_b との間にねじり剛性

K_s を規定しているが、ボールネジなどの動力伝達要素を持つ機構部では、この考え方は一般的である。サーボモータから見て、ねじり要素の相手側に存在する J_b はサーボモータに対して外乱を与える要素となるため、 J_m と J_b の比率、即ち J_b/J_m が、回転系の制御性を決める一つの指標となる。端的に言えば、 J_b/J_m が小さい程、この回転系の制御性が高まり、サーボモータがねじり要素の相手側にある J_b から受ける外乱が抑制され、送り軸の送りがより滑らかになる。



J_m : サーボモータの慣性モーメント, J_b : 送り軸の慣性モーメント
 T_m : サーボモータのトルク, K_s : ねじり剛性
 θ_m : サーボモータの回転角度, θ_b : 送り軸の回転角度

図 2.5 サーボモータと機構部の送り軸の 2 慣性系力学モデル

$$\frac{\theta_m}{T_m} = \frac{J_b \cdot s^2 + K_s}{s^2(J_m \cdot J_b \cdot s^2 + K_s(J_m + J_b))} \quad (2.1)$$

ここで、慣性モーメント比の計算方法を、式(2.2)～(2.5)に示す。下記の計算は文献 61)62)に記載された方法に基づいており、そのため使用する記号も文献 61)62)に準じている。

$$\text{慣性モーメント比} = \frac{J_b}{J_m} \quad (2.2)$$

$$J_b = J_c + J_w \quad (2.3)$$

$$J_c = \frac{\pi \gamma D^4 L}{32} \quad (2.4)$$

$$J_w = W \left(\frac{P}{2\pi} \right)^2 \quad (2.5)$$

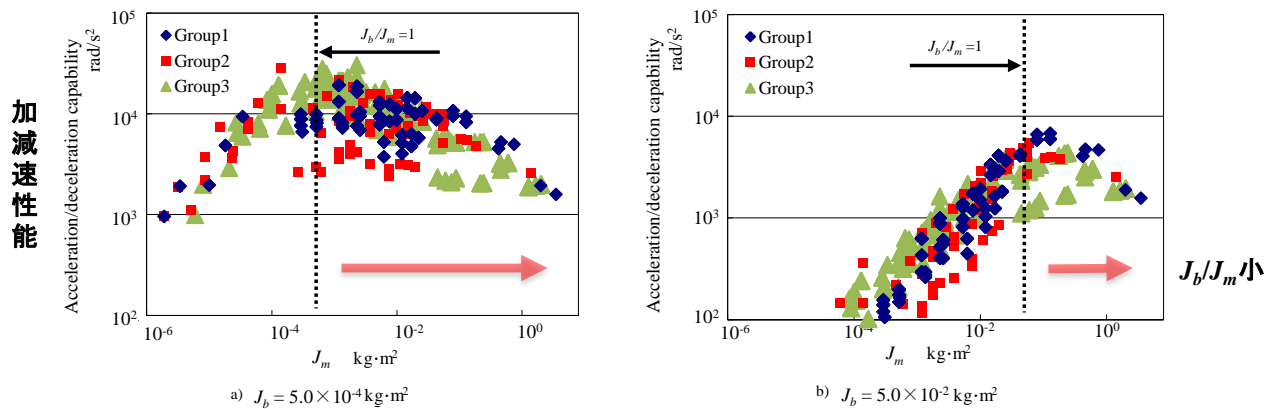
J_m : サーボモータの慣性モーメント, J_b : 送り軸の慣性モーメント
 J_c : 円筒体の慣性モーメント, J_w : 移動物重量の慣性モーメント
 γ : 単位体積当たりの質量, D : 円筒体の直径, L : 円筒体の長さ
 W : 移動物重量 (ワークピース, テーブルなど), P : ボールネジリード

2.3.2 機構部の送り軸の加減速性能に着目した場合

慣性モーメント J_m と J_b との関係の検証に関して、本節ではまず加減速性能に着目する。既に工作機械の機構部の送り軸に多数搭載されて加工現場で稼働しているサーボモータメーカ3社のサーボモータ仕様説明書^{61)~66)}より、工作機械の送り軸の駆動に適した瞬時最大トルク $0.5\text{N}\cdot\text{m}\sim 5000\text{N}\cdot\text{m}$ の範囲の機種を抽出する。サーボモータにより機構部の送り軸が加減速される場合の加減速性能の指標として、本研究では各機構部の送り軸の最大加速度を用いる事とする。 T_m を各サーボモータの最大トルク、 T_f を各機構部の送り軸の摩擦トルクとした場合、最大加速度は $(T_m - T_f)/(J_m + J_b)$ となる。ここで、 T_f の値は本節の議論に直接関係しないので、本節では T_f は考慮しない事とする。即ち、本節では最大加速度を $T_m/(J_m + J_b)$ で表現する事とする。

機構部の送り軸の慣性モーメント J_b が、小型の工作機械を想定した $5.0 \times 10^{-4}\text{kg}\cdot\text{m}^2$ の場合の、メーカ3社のサーボモータの最大加速度 $T_m/(J_m + J_b)$ を、図2.6のa)に示す。また、 J_b が大型の工作機械を想定した $5.0 \times 10^{-2}\text{kg}\cdot\text{m}^2$ の場合、即ち J_b がa)に比べて100倍大きい場合の、メーカ3社のサーボモータの最大加速度 $T_m/(J_m + J_b)$ を、図2.6のb)に示す。図2.6のa)b)より、メーカ3社のサーボモータの間で全体的な傾向は同じであり、また図2.6のa)b)を比較すると、 J_m と最大加速度即ち加減速性能との関係を示す曲線の傾向も同じである事が分かる。 $J_b > J_m$ の領域では J_m が増加すると加減速性能も高まるが、 $J_b < J_m$ の領域では差がなくなる。 $J_b \ll J_m$ の領域では J_m が支配的となるため、大型のサーボモータを搭載しても加減速性能は高くない。ここで、図2.6のa)b)でプロットされた計算値がばらつく理由は、一般にサーボモータの設計に於いて、瞬時最大トルクと慣性モーメントの関係を一定に保つ配慮は特になされないためである。

一般に、 J_m が小さなサーボモータは最大トルクも小さく、 J_m が大きいと最大トルクも大きい。従って、 $J_b > J_m$ の領域では、 J_m の増加に伴って加減速性能が単調に増加する事は自明である。しかし、 $J_b < J_m$ から $J_b \ll J_m$ の領域では、サーボモータの最大トルクの多くの割合が自身の慣性モーメントの加減速に消費される。更に、過度に J_m の大きなサーボモータを搭載すると、加減速性能への寄与が小さいだけでなく、現実問題としてサーボモータと駆動アンプが不必要に大型化してコストが増大してしまう。以上、本節の考察を総括すると、図2.6のa)b)の各々に於いて、 $J_b/J_m = 1$ となる領域の付近が慣性モーメントの適合性の目安となる。この目安は、経験則として論じられている内容とほぼ同一ではあるが、本節で展開した理論検証によりその経験則が裏付けられた。更に、サーボモータの慣性モーメントと最大トルクの一般的な関係を考慮に加える事により、制御理論では登場しないサーボモータ選定上の現実的な制約も盛り込む事が出来た。



a) $J_b = 5.0 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

b) $J_b = 5.0 \times 10^{-2} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

Group1 (n=60) $J_m : 1.9 \times 10^{-7} \sim 3.48 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $T_m : 0.5 \sim 5500 \text{ N}\cdot\text{m}$
 Group2 (n=68) $J_m : 1.9 \times 10^{-7} \sim 1.40 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $T_m : 0.5 \sim 3600 \text{ N}\cdot\text{m}$
 Group3 (n=85) $J_m : 6.0 \times 10^{-6} \sim 2.02 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $T_m : 0.5 \sim 4000 \text{ N}\cdot\text{m}$

図 2.6 慣性モーメント比と加減速性能との関係

2.3.3 機構部の送り軸の制御性に着目した場合

慣性モーメント J_m と J_b との関係に関して、本節では制御性に着目する。2.3.2 節と同じ方法で、工作機械の機構部の送り軸に搭載されているサーボモータメーカー 3 社のサーボモータ仕様説明書より、メーカー 3 社のサーボモータの慣性モーメントとシャフト形状を抽出し、サーボモータシャフトの寸法情報を元にねじり剛性を計算する。ねじり剛性の計算方法は、回転体の一般的な力学的計算方法に準じる、次に、メーカー 3 社のサーボモータの中から、慣性モーメントが約 100 倍と互いにはっきりと異なる 2 種類のサーボモータを抽出する。即ち、抽出したサーボモータは合計 6 種類となる。そして、図 2.5 に示す 2 慣性系力学モデルを用いて、これら合計 6 種類のサーボモータに於いて、 J_b を連続的に小から大へと変化させた場合の共振点と反共振点を求める。

J_m が $1.2 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 前後の場合の共振点と反共振点の関係を、図 2.7 の a) に、そして J_m が $1.3 \times 10^{-1} \sim 1.8 \times 10^{-1} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ の場合の共振点と反共振点の関係を、図 2.7 の b) に示す。図 2.7 の a) b) いずれに於いても、慣性モーメントの比率 J_b/J_m が 1 付近となる点を境として、左側の領域では共振点と反共振点が重なり、右側の領域では共振点と反共振点が乖離している事が読み取れる。図 2.5 の 2 慣性系力学モデルに関連して、工作機械の機構部の送り軸の様にねじり剛性が比較的高い場合には共振点と反共振点が重なる領域では回転系の共振は発生せず、両者が乖離する領域では回転系の共振が発生する事が、論文 19)~22) などにより知られている。そこで本研究では、共振点と反共振点の乖離が開始する点を、制御安定性を示す一つの基準として用いる。

図 2.7 の a) b) に於いて、 $J_b < J_m$ の領域で共振点と反共振点は重なるため共振は発生しないが、慣性モーメント比 J_b/J_m が 1 付近となる点を境として、 $J_b > J_m$ となる領域で両者が乖離し共振が発生する。しかし、制御性を過剰に重視して過度に $J_b \ll J_m$ とする、即ち不必要に大型のサーボモータで駆動すると、駆動アンプも大型化してコストの増大につながってしまう点は、2.3.2 節と同様である。以上の検証を整理すると、図 2.7 の a) b) に於いても図 2.6 の a) b) と同様に、サーボモータ選定上の現実的な制約も含めて、 $J_b/J_m = 1$ となる付近が慣性モーメントの適合性の目安である事になる。なお、論文 19)~22) によれば、共振点、反共振点と制御性との関係に関しては、共振周波数と反共振周波数との比率、即ち共振比という指標を用いて論じる事が一般的であり、共振比は $(1 + J_b/J_m)$ の平方根である事が知られている。共振比については、実加工実験を実施しその結果を定量的に評価する第 3 章 3.4.4 節~3.4.6 節で、更に詳しく検証する事とする。

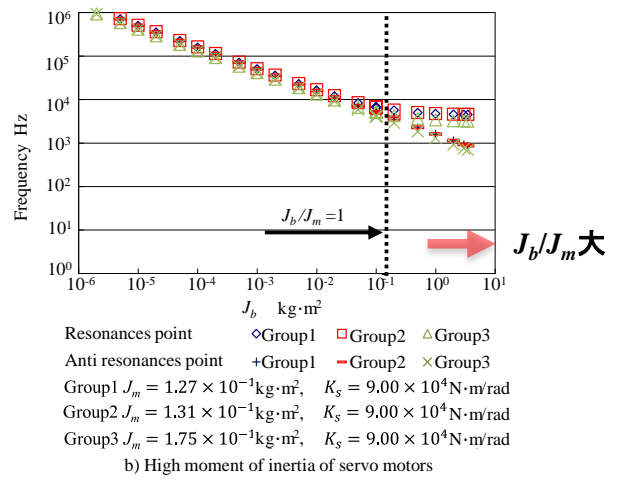
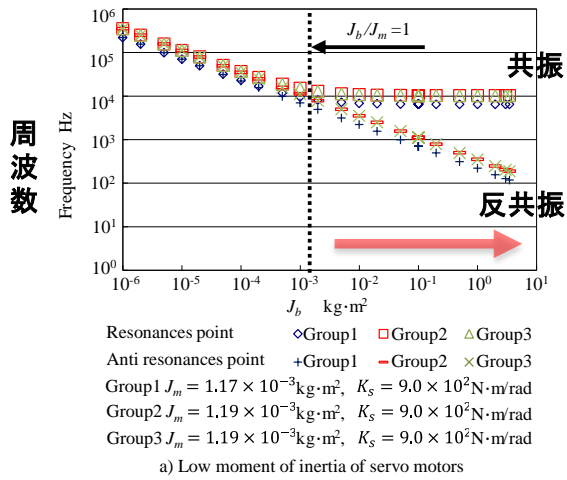


図 2.7 慣性モーメント比と制御性との関係

2.3.4 機構部が着目する性能指標とサーボモータの慣性モーメントとの関係

2.3.2 節の考察より、機構部の送り軸の加減速性能に着目する場合には、機構部の送り軸の慣性モーメント J_b と同等、或いはより小さな慣性モーメント J_m を持つサーボモータでの駆動が適切となる。ここで、過度に $J_b \gg J_m$ とならない様に留意する必要があるが、一般には送り軸を駆動するために必要な瞬時最大トルク、連続定格トルクを出力するサーボモータを搭載すれば、必然的に過度に $J_b \gg J_m$ とはならない。従って、まずは他の必要要件を満たすサーボモータを候補に挙げ、その中から慣性モーメント J_m が小さなサーボモータを搭載すれば良い。

一方、2.3.3 節の考察より、機構部の送り軸の制御性に着目する場合には、慣性モーメントではなく慣性モーメント比 J_b/J_m が重要となる。一般に、 J_b/J_m は先述の通り 1 未満が理想であるが、近年の制御技術の向上により、現実問題としては 0.5~5 程度が制御性の維持の目安とされている。そして、 J_b/J_m がこの範囲となる条件で他の必要要件を満たすサーボモータを搭載すれば良い。但し、その工作機械がどの程度の高精度加工、高品位加工を目指すかに応じて、最適な慣性モーメント比 J_b/J_m が若干異なる点には注意が必要である。機構部の送り軸の性能指標の中で加減速性能と制御性に着目し、両者と各々の場合に適した慣性モーメント比との関係を、表 2.1 に示す。高い制御性を必要とする加工の場合には、 J_b/J_m はやはり 1 未満が有利である。

表 2.1 加減速性能、制御性と慣性モーメント比との関係

Focus point	Necessary requirements	Requirements and moment of inertia ratio
Acc./Dec. performance	Rated torque, Maximum torque, Rated speed, Maximum speed, Smoothness of feed driven by CNC,	First, servo motors satisfying other requirements are selected, then among them a servo motor with a small moment of inertia J_m is selected.
Control responsiveness	Volume, Weight, Flange size, Length, Rotor inertia moment, Ease of attachment to machine, Environmental resistance, Impact resistance	A servo motor satisfying other requirements is selected on condition that J_b/J_m ranges from 0.5 and 5. The optimum J_b/J_m varies depending on the targeting degree of high precision and fine surface machining in that machining center.

2.4 加工現場で稼働するマシニングセンタに於ける慣性モーメント比の分析と考察

2.4 節では、加工現場で稼働するマシニングセンタの送り軸とそのサーボモータとの慣性モーメント比に着目し、マシニングセンタの種類と慣性モーメント比との間の相関関係を分析し考察する。まず、実際に加工現場で稼働する汎用のマシニングセンタの、用途別の種類を図 2.8 に、それらの主な加工対象（ワークピース）を図 2.9 に示す。図 2.8 の a)~d)は、順に汎用機、加工ライン機、高精度加工機、金型加工機である。図 2.9 の a')~d')の例として、簡単な機構部品、自動車及び二輪車部品、IT 関連及び医療関連部品、金型及び金型部品などが挙げられる。

2.4.1 マシニングセンタの主な種類と慣性モーメント比との関係

図 2.8 に示した 4 種類のマシニングセンタから具体例な事例を抽出し、その送り軸 3 軸の慣性モーメントと送り軸 3 軸に使用されるサーボモータの慣性モーメントを、各々表 2.2, 表 2.3 に示す。工作機械の設計に於いて、送り軸の慣性モーメントの計算方法としては、ボールネジなど機構部の回転系の慣性モーメントに、テーブルやワークピースなど重量物が直線方向に移動する慣性を回転系に換算した値を加えて算出する方法が一般的である。表 2.2, 表 2.3 は、実際に市場で稼働するマシニングセンタに着目し、その送り軸 3 軸の主な数値を整理分類した結果である。なお、本節の調査の実施にあたっては、マシニングセンタの種類とその送り軸とサーボモータの慣性モーメント比の関係が顕著に表れる様に、特徴的なマシニングセンタを抽出している。

表 2.2, 表 2.3 より、マシニングセンタの基本 3 軸の送り軸とそれらを駆動するサーボモータの慣性モーメント比を求め、その分布を図 2.10, 表 2.4 に示す。図 2.10 より、慣性モーメント比は概ね一般的推奨値である 0.5~5 の範囲内に収まっている事が分かる。更に、4 種類に分類されたマシニングセンタの慣性モーメント比に関して、各々以下の特徴がある事も分かる。

- ・ 図 2.10 : A~H の汎用機及び加工ライン機で、慣性モーメント比は総じて比較的大きな値で、概ね 1.5~5 の範囲内にある。これは、汎用機及び自動車、二輪車の部品加工向けライン機が、短い加工サイクルタイムの実現を目指しているためと考えられる。
- ・ 図 2.10 : I~L の高精度加工機及び金型加工機で、慣性モーメント比は逆に比較的小きな値で、概ね 0.5~1.5 の範囲内にある。これは、IT 関連、医療関連の部品加工向け高精度加工機及び金型加工機が、高い加工精度と面品位を目指しているためと考えられる。

なお、図 2.10 より、水平軸に比べて垂直軸で慣性モーメント比が総じて小さい事が分かるが、これは垂直軸では重力の保持のため水平軸より若干大きなサーボモータが選定され、それに伴いその慣性モーメントも水平軸用より若干大きくなるためである。小型マシニングセンタを除き、一般に垂直軸には水平軸に比べて 1 モデル大きなサーボモータが選定される場合が多い。

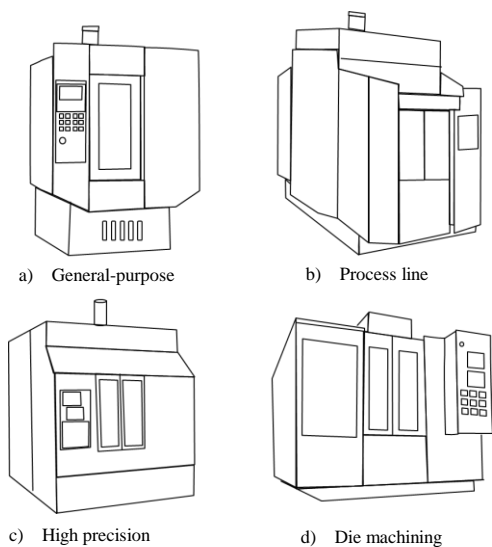


図 2.8 マシニングセンタの用途別の種類

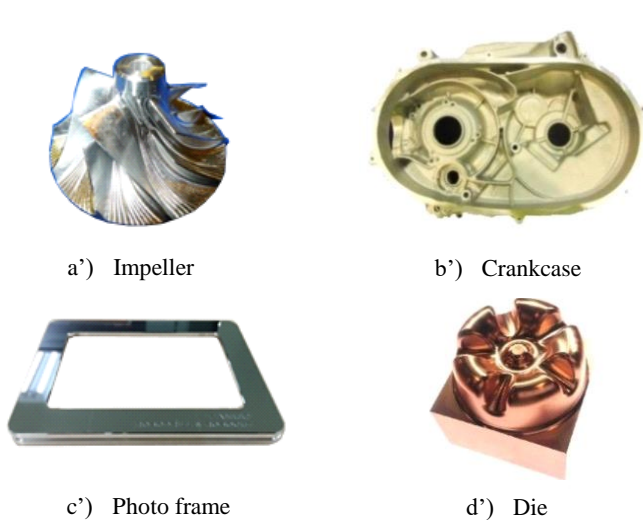


図 2.9 マシニングセンタの主な加工対象

表 2.2 加工現場で稼働するマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント

Machine (Purpose)	Motor maker	Horizon. 1	Horizon. 2	Vertical
A (General-purpose)	Group1	25.7	20.5	9.6
B (General-purpose)	Group1	1060	779	297
C (General-purpose)	Group2	76.3	61.0	46.1
D (General-purpose)	Group2	260	200	130.0
E (General-purpose)	Group3	16.3	13.6	11.8
F (General-purpose)	Group3	69.1	25.4	17.4
G (Process line)	Group1	136	60.8	69.5
H (Process line)	Group1	29.7	47.7	22.3
I (Fine surface)	Group1	203	158	114.0
J (Fine surface)	Group1	331	214	94.7
K (Die machining)	Group1	47.0	33.6	17.8
L (Die machining)	Group1	123	65.7	60.8

表 2.3 マシニングセンタに搭載されたサーボモータの慣性モーメント

Machine (Purpose)	Motor maker	Horizon. 1	Horizon. 2	Vertical
A (General-purpose)	Group1	11.7	11.7	12.4
B (General-purpose)	Group1	220	220	145
C (General-purpose)	Group2	38.3	38.3	75.0
D (General-purpose)	Group2	112	112	122
E (General-purpose)	Group3	7.70	7.70	7.70
F (General-purpose)	Group3	26.0	14.7	17.7
G (Process line)	Group1	52.7	52.7	81.9
H (Process line)	Group1	11.7	22.8	23.5
I (Fine surface)	Group1	170	220	220
J (Fine surface)	Group1	220	220	170
K (Die machining)	Group1	176	170	170
L (Die machining)	Group1	120	120	176

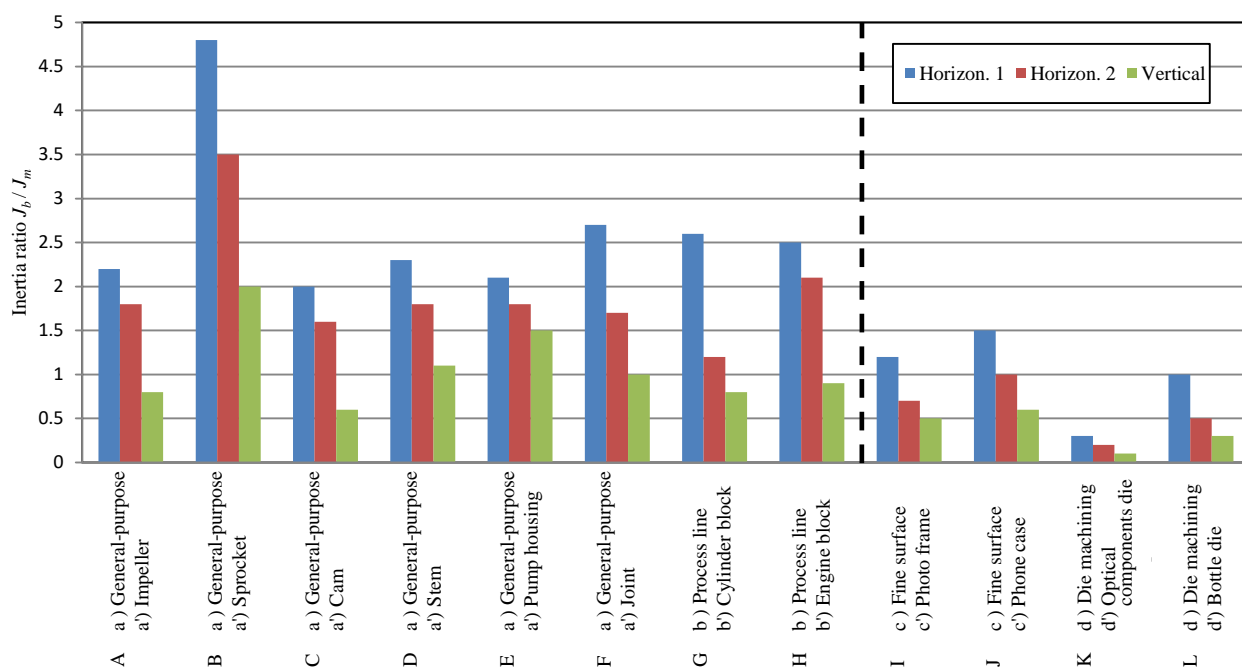


図 2.10 マシニングセンタの送り軸とサーボモータの慣性モーメント比

表 2.4 マシニングセンタの種類，主な加工対象，慣性モーメント比の関係

Machine	Motor maker	Purpose	Workpiece	Horizontal 1	Horizontal 2	Vertical
A	Group1	a) General-purpose	a) Impeller	2.2	1.8	0.8
B	Group1	a) General-purpose	a) Sprocket	4.8	3.5	2.0
C	Group2	a) General-purpose	a) Cam	2.0	1.6	0.6
D	Group2	a) General-purpose	a) Stem	2.3	1.8	1.1
E	Group3	a) General-purpose	a) Pump housing	2.1	1.8	1.5
F	Group3	a) General-purpose	a) Joint	2.7	1.7	1.0
G	Group1	b) Process line	b) Cylinder block	2.6	1.2	0.8
H	Group1	b) Process line	b) Engine block	2.5	2.1	0.9
I	Group1	c) Fine surface	c) Photo frame	1.2	0.7	0.5
J	Group1	c) Fine surface	c) Phone case	1.5	1.0	0.6
K	Group1	d) Die machining	d) Optical components die	0.3	0.2	0.1
L	Group1	d) Die machining	d) Bottle die	1.0	0.5	0.3

2.4.2 マシニングセンタの主な加工対象と慣性モーメント比との関係

図 2.10 は、図 2.9 の 4 グループ 8 個の加工対象と、それらを加工するマシニングセンタの基本 3 軸の送り軸とサーボモータとの慣性モーメント比の関係もまた示している。加工対象の欄には、一般に市場で要求される主な加工の内容を各々付記する。図 2.9 より、4 グループに分類された主な加工対象と慣性モーメント比に関して、各々以下の関連付けが出来る事が分かる。

- ・図 2.10 : A~H の汎用機及び加工ライン機の加工対象は、ドリル、タップ、面取り、バリ取りなどの加工が多いため、加工精度や面品位は問われないが、より短い加工時間が要求される。従って、慣性モーメント比は総じて大きな値で、概ね 1.5~5 の範囲内にある。
- ・図 2.10 : I~L の高精度加工機及び金型加工機の加工対象では、形状加工、コンタリング加工が中心であり、加工時間は一般に比較的長くなるが、より高い加工精度と面品位が要求される。従って、慣性モーメント比は総じて小さな値で、概ね 0.5~1.5 の範囲内にある。

全体を総括した表 2.4 では、マシニングセンタの種類、その主な加工対象、慣性モーメント比の関係を示している。マシニングセンタの設計時には、想定する加工対象により搭載するサーボモータが決まり、実際の加工現場に於いては、想定する主な加工対象により採用するマシニングセンタが決まる。表 2.4 は、それら三者のおよその相関関係を示す事になる。

2.5 力学モデルによる考察と加工現場で稼働するマシニングセンタの分析による考察との比較

2.3.1 節から 2.3.4 節では、慣性モーメント比が機構部の動特性に与える影響について、簡単な力学モデルを用いてその傾向を考察した。続いて 2.4.1 節と 2.4.2 節では、実際に加工現場で稼働するマシニングセンタの種類と主な加工対象と慣性モーメント比を具体的に調査して、それらの相関関係を分析した。両者の結果を整理し比較すると、以下の様になる。

(1) 2.3.1 節から 2.3.4 節の 2 慣性系力学モデルによる考察

- ・ 機構部の送り軸の加減速性能に着目する場合、他の必要要件を満たすサーボモータを選定する候補に挙げ、その中から慣性モーメントが出来るだけ小さなサーボモータを搭載すると、そのサーボモータの加減速性能をより十分に発揮出来る。
- ・ 機構部の送り軸の制御性に着目する場合も同様に、他の必要要件を満たすサーボモータを選定する候補に挙げ、その中から慣性モーメントが出来るだけ大きなサーボモータを搭載すると、そのサーボモータの制御性をより安定して維持出来る。
- ・ 一般に、慣性モーメント比は 0.5~5 の範囲が制御性維持のための目安であるが、実際には、そのマシニングセンタがどの程度の高精度加工、或いは高品位加工を目指すかにより、最適な慣性モーメント比が若干異なる点に注意する必要がある。

(2) 2.4.1 節及び 2.4.2 節の加工現場で稼働するマシニングセンタに関する考察

- ・ 汎用機及び加工ライン機では、慣性モーメント比は総じて比較的大きな値で、概ね 1.5~5 の範囲である。これは、自動車、二輪車の部品加工向けの汎用機及びライン機が、常により短い加工サイクルタイムの実現を目指しているためである。実際にそれらの加工対象を調べると、ドリル、タップ、面取り、バリ取りなどの加工が支配的である。これらの加工内容では、加工精度や面品位はさほど問われない一方で、一般には短い加工時間が強く要求される。従って、搭載されるサーボモータには、必然的に高い加減速性能が求められる。
- ・ 高精度加工機及び金型加工機では、慣性モーメント比は総じて比較的小きな値で、概ね 0.5~1.5 の範囲である。これは、IT 関連、医療関連の部品加工向けの高精度加工機、金型加工機が高い加工精度と面品位を目指しているためである。実際にそれらの加工機の加工対象を見ると、形状加工、コンタリング加工が中心であり、多くの場合仕上げ加工も含む。これらの加工内容では、加工時間は多少長くなっても、一般には高い加工精度や良質の面品位が要求される事が多い。従って、搭載されるサーボモータには、必然的に高い制御性が求められる。

- ・ここで、汎用機及び加工ライン機で、慣性モーメント比が総じて比較的大きな値になる理由を再度考察する。2.3.4 節で述べた通り、慣性モーメント以外の必要要件を満たすサーボモータの種類が複数存在する場合は、加減速能力を向上させるため、その中で慣性モーメントが最も低いモデルが選定される事になり、必然的に慣性モーメント比は大きな値となる。この他に、汎用機及びライン機では、コスト或いはスペースの観点から、より小型のサーボモータが選定される傾向も近年顕著である。つまり、出力トルクその他がその工作機械の必要とする仕様を満たすぎりぎりのサーボモータが選定される結果、想定した以上に慣性モーメント比が大きくなるケースも多い。例えば、図 2.10 及び表 2.4 の工作機械 B は特に大型の門型加工機であり、既存のサーボモータの中から大トルクのモデルを選定してはいるが、他の汎用機、ライン機と比較しても大きな慣性モーメント比であり、特に X 軸では 5 に近い値となっている。
- ・逆に、高精度加工機、金型加工機の中で、特に付加価値の高い高精度金型加工機では、コスト或いはスペースの観点では不利となっても慣性モーメントが十分大きなサーボモータを使用する事で、慣性モーメント比を小さく抑えようとしている事実が見て取れる。例えば、図 2.10 及び表 2.4 の工作機械 K は特に高精度の金型加工機であり、X 軸、Y 軸、Z 軸の全軸に於いて慣性モーメント比は 0.5 未満となっている。この場合、必然的に加工時間は長くなるが、このマシニングセンタの用途としては適切なサーボモータの選定となっている。

(3)(1)の考察と(2)の分析結果との比較

- ・(1)の考察と(2)の分析結果とを比較した結果、両者は概ね一致しているが、これにより実際に加工現場で稼働している様々な種類のマシニングセンタの送り軸と搭載されたサーボモータとの慣性モーメント比が、推奨されている値の範囲にほぼ収まっている事が分かる。
- ・分析したマシニングセンタの軸の一部には、慣性モーメント比の推奨範囲を若干逸脱する例が見られるが、これはサーボモータの選定に際して他にも勘案すべき必要要件があり、常に慣性モーメント比を最優先としてサーボモータを選択する事が出来ないためと考えられる。

マシニングセンタに搭載するサーボモータの選定にあたって、機構部の送り軸の加減速性能を重視する場合には慣性モーメントの小さなサーボモータが、制御性を重視する場合には慣性モーメントの大きなサーボモータが望ましいとの通説はこれまでも存在したが、以上に示した異なる 2 通りの考察を通して、まずその通説の妥当性が基本的に裏付けられた。

2.6 結言

本章では、まず、サーボモータの慣性モーメントと機構部の送り軸の慣性モーメントの比率、即ち慣性モーメント比について、簡単な力学モデルを用いて基本的考察を行った。次に、実際に加工現場で稼働するマシニングセンタの送り軸と搭載されたサーボモータの慣性モーメント比を調査して、マシニングセンタの種類、主な加工対象、慣性モーメント比の間の関係を分析した。そして最後に、力学モデルによる考察の結果と、実際に加工現場で稼働するマシニングセンタの分析の結果を比較する事で、両者のおよその相関関係を明らかにした。

簡単な力学モデルによる考察では、機構部の送り軸の加減速性能を重視する場合には慣性モーメントの小さなサーボモータの選定と搭載が、一方、制御性を重視する場合には慣性モーメントの大きなサーボモータの選定と搭載が望ましいとの結果を得た。そしてこの考察の結果は、実際に加工現場で稼働する様々なマシニングセンタの種類、加工対象、慣性モーメント比の間の関係の分析結果とほぼ一致した。即ち、力学モデルによる考察の結果が裏付けられると同時に、実際のマシニングセンタ用サーボモータの選定も概ね妥当であるとの結論を得た。

また、本章のそれらの議論の過程で、一般的な工作機械の送り軸の基本的な動特性を2慣性系力学モデルで表現する事の妥当性、及び実際の加工現場に於ける工作機械の慣性モーメント比の調査分析の有用性を実証する事が出来た。本章2.3節で述べた様に、送り軸或いは駆動系によっては1慣性系或いは3慣性系で表現すべき場合もある。しかし、本研究に関しては、後半の加工現場で稼働するマシニングセンタの調査結果が前半の2慣性系力学モデルの適用による考察結果と一致した事から、2慣性系を選択した事の妥当性が裏付けられた。

本章の後半では、実際に加工現場で稼働する様々なマシニングセンタ及びその主な加工対象を調査し、その結果を整理し分析する事に主眼を置いた。次章以降では、この議論を一步進めて、慣性モーメント比の違いが加工結果に与える影響について、実際にマシニングセンタを使用して様々な実加工実験を通して検証を進める。具体的には、まず実加工実験を実施した際の慣性モーメント比と加工時間と加工精度、加工面品位との相関を明らかにし、次にその際の送り軸の挙動との相関を明らかにして、慣性モーメント比が与える影響をより定量的に把握する。

第3章 慣性モーメント比の違いがマシニングセンタの加工性能に与える影響

3.1 緒言

3.2 サーボモータとマシニングセンタを用いた実加工実験による検証の準備

3.2.1 実加工実験に用いるサーボモータの主な仕様

3.2.2 実加工実験に用いるマシニングセンタの主な仕様

3.3 マシニングセンタを用いた加工の種類とサーボモータに要求される主な特性

3.3.1 マシニングセンタによるハイサイクル加工

3.3.2 マシニングセンタによる高精度高品位加工

3.4 サーボモータとマシニングセンタを用いた実加工実験の手法と結果

3.4.1 ハイサイクル加工の実加工実験の方法

3.4.2 ハイサイクル加工の実加工実験の結果

3.4.3 高精度高品位加工の実加工実験の方法

3.4.4 高精度高品位加工の実加工実験の結果

3.4.5 総慣性モーメントが制御性に与える影響の確認実験の方法とその結果

3.4.6 高精度高品位加工の2種類の実加工実験結果の比較と定量考察

3.5 サーボモータとマシニングセンタを用いた実加工実験の結果に対する考察

3.6 結言

第3章 慣性モーメント比の違いがマシニングセンタの加工性能に与える影響

3.1 緒言

第2章では、まずサーボモータの慣性モーメントとサーボモータが駆動する機構部の送り軸の慣性モーメントとをねじり剛性を持つ機構要素で結合した簡単な力学モデルを用いて、サーボモータとマシニングセンタの送り軸との慣性モーメント比の関数について、定量的な考察を行った。次に、実際に加工現場で稼働する様々な種類のマシニングセンタを調査し、そこに搭載されたサーボモータと機構部の送り軸との慣性モーメント比を分析して、先述の力学モデルによる理論上の考察を実際の加工現場の実機データで裏付けた。

力学モデルによる理論上の考察では、機構部の送り軸の加減速性能を重視する場合には、慣性モーメントの小さなサーボモータの選定と搭載が望ましく、制御性、特に外乱抑圧性を重視する場合には、慣性モーメントの大きなサーボモータの選定と搭載が望ましい、という結果を得た。また、実際に加工現場で稼働しているマシニングセンタを分析では、加工サイクルタイムを重視する機種では、慣性モーメントが比較的小さいサーボモータを選定され、高い加工精度と面品位を重視する機種では、慣性モーメントが比較的大きいサーボモータが選定されている、との結果を得た。この結果は、力学モデルによる定量的な考察を裏付けており、マシニングセンタ用サーボモータの選定も概ね妥当であるとの結論を得た。

第3章即ち本章では第2章の議論を更に進めて、サーボモータの慣性モーメントの違いがマシニングセンタの加工性能に与える影響を、実際にマシニングセンタを用いた実加工実験を実施して検証する。まず、慣性モーメントの異なる3グループのサーボモータを準備し、これらを同じく本実験用として準備した小型立形マシニングセンタに順次載せ替えて実加工実験を行い、加工時間と加工精度、面品位を比較する。そして、この実加工実験の結果が、第2章で得た結論、即ち慣性モーメントの小さいサーボモータは加工サイクルタイムを重視する機種に適し、慣性モーメントの大きいサーボモータは加工精度と加工面品位を重視する機種に適するとの結論と、整合性を持つか否かを併せて検証する。

3.2 サーボモータとマシニングセンタを用いた実加工実験による検証の準備

本題の議論に入る前に、工作機械の設計とその各送り軸を駆動するサーボモータの選定手順を簡単に説明する。工作機械の設計では、加工対象となるワークピースの大きさやその加工内容に応じて、各軸のストローク長や推力が計算され、その時点で送り軸の慣性モーメントも決まる。その次にサーボモータの選定を行うが、この時点では必要な最大トルクや連続トルク、最高回転速度に着目する事が殆どで、この時点でサーボモータ慣性モーメントを考慮する事は稀である。しかし実際には、サーボモータのトルクや回転速度の仕様がほぼ同等であっても、使用する磁石の特性や設計思想の違いなどにより、サーボモータの慣性モーメントは必ずしも同等でない事が多く、かつこの慣性モーメントの違いが実加工結果に明確な影響を与える場合がある。

そこで本研究では、サーボモータの慣性モーメントに着目し、その実加工結果に与える影響を、実加工実験を通して検証する。まず慣性モーメントの異なる3グループのサーボモータを準備し、これらを順次設計済みの小型立形マシニングセンタに載せ替えて実加工実験を実施し、加工時間と加工精度、加工面品位を測定し比較する。従来、サーボモータの慣性モーメントと実加工結果との関係について、様々な経験則こそ存在したものの、慣性モーメントの異なるサーボモータを載せ替えて実際の工作機械で実加工実験を行い、その加工結果、特に加工面品位について論じた研究は存在しなかった。本章即ち第3章は、この点に着目して実加工実験を実施して比較検証を行い、慣性モーメントの与える影響を具体的に論じた点に大きな特長がある。

以上を前提として本題に戻ると、一般に、慣性モーメントの比較的小さいサーボモータは加工時間即ちサイクルタイムを重視する汎用機、加工ライン機などに適しており、慣性モーメントの比較的大きいサーボモータは高精度加工機、金型加工機などに適している、という経験則が既に知られているが、それが実際の加工現場でマシニングセンタに搭載され稼働するサーボモータの選定に反映されている事を第2章で示した。第3章では、慣性モーメントの異なる3グループのサーボモータ及び設計済みの小型立形マシニングセンタを準備し、それらを用いて一連の実加工実験を実施する。そして、その実加工実験の結果、特に加工面品位を出来るだけ定量的に測定し比較検証する事で、第2章の妥当性をより具体的に定量的に検証する。

3.2.1 実加工実験に用いるサーボモータの主な仕様

実加工実験用に準備したサーボモータの主な仕様を、表 3.1 に示す。サーボモータ#1, #2, #3 は、仕様説明書⁶¹⁾⁶²⁾にある一般販売品より選択しており、トルクや回転速度の仕様はほぼ同等だが、サーボモータの慣性モーメントのみ比率で 1 : 1.56 : 3.42 と明確に異なる。即ち、サーボモータの違いと実加工結果とが比較しやすい条件となっている。なお、サーボモータ#1, #2 ではネオジム磁石の採用により低慣性化を実現しており、特にサーボモータ#1 は、ロータ径を小さく設定した低慣性型のサーボモータである。一方サーボモータ#3 は、フェライト磁石を採用した中慣性型である。ここで、サーボモータ#1, #2, #3 のコギングトルクはほぼ同等で、いずれも工作機械の送り軸に採用可能な範囲に小さく抑えられている。




サーボモータ#1, #2, #3 のステータ及びロータの断面の概略を、表 3.2 に示す。これらのロータのうち、サーボモータ#1, #2 はネオジム磁石をロータコア内部に組み込んだ所謂 IPM 構造であり、サーボモータ#3 はフェライト磁石をシャフト中心から放射状に配置した構造である。一般に、低慣性型のモータ設計には、磁力、即ちエネルギー積の高いネオジム磁石の採用が必須だが、コストの点ではフェライト磁石が有利であるため、サーボモータに限らず車載用モータなどに於いても、両者は適材適所で使い分けられている。また、共にネオジム磁石を採用したサーボモータ#1, #2 で、#1 のロータは#2 より外径が若干小さいが、これはネオジム磁石を採用した上で、更に慣性モーメントを小さく抑えるためである。

3.2.2 実加工実験に用いるマシニングセンタの主な仕様

マシニングセンタは、フライス加工、エンドミル加工、ドリル加工、タップ加工など多種多様な加工を行える代表的な工作機械である。本章では第 2 章で示した小型立形マシニングセンタを使用するが、その主な仕様を取扱説明書⁶⁷⁾から抜粋して表 3.3 に示し、その下段に送り軸 3 軸の共振周波数を付記する。これらの共振周波数は 3 軸共にほぼ同じ値であるが、マシニングセンタによっては大きく異なる場合もある^{69)~74)}。各軸の共振は、サーボ制御から見れば典型的な外乱になるが、その抑圧の程度については 3.4.4 節で詳しく分析する。

図 2.3, 図 2.4 の小型立形マシニングセンタに於いて、表 3.1 と表 3.3 の慣性モーメント値から計算される、サーボモータ#1, #2, #3 の各々に対応する送り軸 3 軸の慣性モーメント比を、図 3.1 に示す。図 3.1 より、慣性モーメント比は全て 0.2~2 の範囲内に収まっている事が分かるが、第 2 章、特に 2.4 節で述べた通り、この慣性モーメント比の範囲は加工時間と加工精度、加工面品位を比較するには好適な条件である。特に、高精度高品位加工の実加工実験に対しては、加工結果の比較検証に適した範囲であると考えられる。

表 3.1 サーボモータの主な仕様

Motor group	-	#1	#2	#3
Motor model	-	αiLR10/4000	αiS8/4000	αiF8/4000
Outward appearance	-			
Flange size	mm × mm	130 × 130		
Maximum torque	N·m	35	32	32
Maximum speed	min ⁻¹	4000	4000	3000
Continuous torque at low speed	N·m	10	8	8
Rated speed	min ⁻¹	3000	4000	3000
Moment of rotor inertia	× 10 ⁻³ kg·m ²	0.68	1.17	2.57
Moment of rotor inertia with motor brake	× 10 ⁻³ kg·m ²	0.75	1.24	2.64
Encoder resolution	-	24bit (1.6×10 ⁷ /rev)		
Mass	kg	13.1	7.4	12.3
Mass with motor brake	kg	15.3	9.6	14.5

Supplier: FANUC CORPORATION

表 3.2 サーボモータのステータとロータの断面の概略

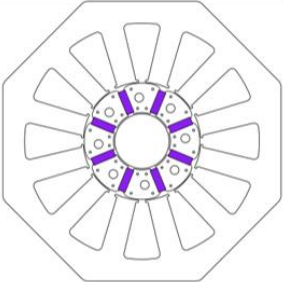
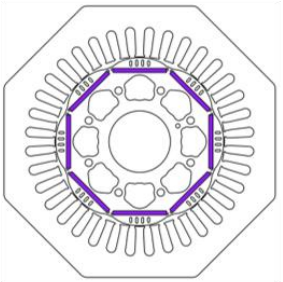
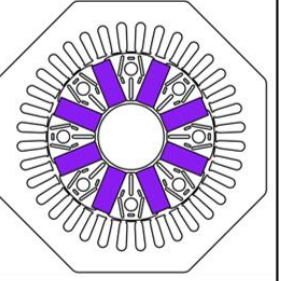
Motor group	#1	#2	#3
Motor structure (Cross section)			
Magnet type	Neodymium	Neodymium	Ferrite

表 3.3 マシニングセンタの主な仕様

Model	FANUC ROBODRILL α -D21MiB5	
Capacity	X-Y-Z-axis-travel	500mm-400mm-330mm
Table	Working space (X×Y-axis)	650mm×400mm
	Capacity of workpiece mass	300kg
Spindle	Speed range	100 min ⁻¹ to 10000 min ⁻¹
Feed rate	Rapid traverse rate	54m/min (X,Y,Z)
	Feed rate	1mm/min to 30000mm/min
Turret	Type of tooling	JIS B 6339-2011 BT30, MAS 403-1982 P30T-1 (45°)
	Tool change time (Cut to Cut)	1.4s
Machine size	Machine height	2236mm±10mm
	Mass of machine	Approx. 2200kg

	X-axis	Y-axis	Z-axis
lead of Ball screw	12mm	12mm	12mm
Acceleration	16m/s ² (1.6G)	12m/s ² (1.2G)	16m/s ² (1.6G)
Mass of moving parts (Note)	80kg	170kg	200kg
Axis moment of inertia	0.42×10 ⁻³ kg·m ²	0.79×10 ⁻³ kg·m ²	0.94×10 ⁻³ kg·m ²
Resonant frequency of the machine	Approx. 30Hz	Approx. 30Hz	Approx. 30Hz

Note) Mass of moving parts does not include jigs and workpieces

Supplier: FANUC CORPORATION

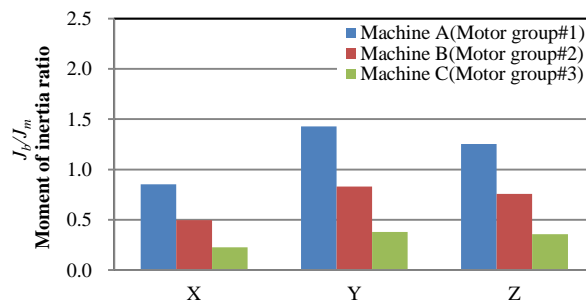


図 3.1 サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比

3.3 マシニングセンタを用いた加工の種類とサーボモータに要求される主な特性

マシニングセンタを用いた加工は、加工精度と加工面品位は一定範囲内であれば許容し、より短い時間で加工完了を目指す、即ち加工タクトのハイサイクル化を目指すハイサイクル加工と、加工時間は一定範囲内であれば許容し、より高い加工精度、より優れた加工面品位を目指す高精度高品位加工に大別される。実際には、それらの全てが要求される高速高精度高品位加工なども存在するが、本節では、実際の加工現場の大半を占めるハイサイクル加工と高精度高品位加工の2つの異なるタイプの加工に焦点を当てて、実加工実験を通して考察する。なお、マシニングセンタやライン加工機を用いた量産部品加工に関しては、より短い加工時間、短いサイクルタイムを目指す種類の加工に対して、実際には様々な名称、呼称が存在するが、本論文に於いては本章以降でこれをハイサイクル加工と呼ぶ事とする。

3.3.1 マシニングセンタによるハイサイクル加工

ハイサイクル加工の代表例として、自動車、二輪車関連のアルミニウム部品の加工が挙げられる。ハイサイクル加工では、ワークピース1個当たりに要する加工時間の短縮が重要である。従って、この用途のマシニングセンタには、一般に①高速、②高加減速、③高頻度の動作特性が求められる。一方、要求される加工精度は一般的にさほど高くはなく、典型的な自動車、二輪車の部品加工ラインでは $20\mu\text{m}\sim 0.1\text{mm}$ 程度であり、かつ、自動車の駆動系の内部に組み込まれる部品であるため、一般に面品位はさほど重視されない。

上述のマシニングセンタの動作特性①②③を、サーボモータの特性に置き換えてみると、①高い最高回転速度、②高い加減速性能、即ち大きな最大トルクと小さな慣性モーメント、③高頻度の動作を実現するための大きな連続定格トルクが求められる。一方で、要求される加工精度は一般にそれ程高くなく、面品位も一般にそれ程重視されないため、サーボモータにも送りの滑らかさはそれ程求められない。端的に言えば、より短時間でより多くの部品を生産する高生産性を目指した加工が、このハイサイクル加工である。

ハイサイクル加工の代表的な加工事例である自動車用のクランクケースを図3.2に、そしてこの加工を行う場合にサーボモータに要求される主な特性を表3.4に示す。



図 3.2 ハイサイクル加工のワークピースの例（クランクケース）

表 3.4 ハイサイクル加工でサーボモータに要求される主な特性

High cycle machining	
Specifications required for machining center	Specifications required for servo motor
①High speed	High maximum speed
②High acceleration and high deceleration	Large maximum torque Small moment of rotor inertia
③High duty	Large continuous rated torque

3.3.2 マシニングセンタによる高精度高品位加工

高精度高品位加工の代表例として、時計や医療関連の微細部品加工及び高精度金型加工が挙げられる。また、近年では、高機能携帯電話即ちスマートフォンや、スマートフォンとの通信が可能な、所謂ウェアラブル機器の諸部品に於いても、高精度高品位加工が求められる場合が増えている。高精度高品位加工では加工結果の形状精度や面品位が重視されるため、高精度高品位加工を行うマシニングセンタには、一般に④プログラム上で指定した加工点と加工経路からの偏差を極小化する、即ち高い位置決め精度と軌跡精度を実現する軸送り、⑤外乱を抑えた滑らかな軸送りなどの特性が求められる。一方、加工に要する時間は短い方が望ましいが、一般にその必要度、優先順位は加工精度や加工面品位の次となる。

上述のマシニングセンタの動作特性④⑤を、サーボモータの特性に置き換える際は、既に議論した様に、サーボモータの慣性モーメントとマシニングセンタの機構部の送り軸の慣性モーメントとの比率、即ち慣性モーメント比を考慮する必要がある。優れた位置決め精度と軌跡精度の実現には、④サーボモータに搭載されたエンコーダの分解能と絶対精度が高い、指令への応答性が高くプログラム指令からの偏差が小さい、⑤サーボモータが発生するコギングトルクが小さく、そのコギングトルクを含む外乱に対する抑圧性が高い、などの特性が求められる。④は指令応答性、⑤は外乱抑圧性と呼ばれ、本研究では④⑤を併せて制御性と定義する。高精度高品位加工に於いては、この制御性が極めて重要な役割を果たす。

そして、この制御性と実加工結果との関係が本章の議論の中心となる。具体的に言えば、サーボモータとサーボ制御の特性の中で、制御性以外はサーボモータ単体でその良し悪しがほぼ決まるが、制御性だけは、サーボモータの慣性モーメントとそれが搭載される機構部の送り軸の慣性モーメントとの比、即ち慣性モーメント比が重要な評価指標となる。つまり、サーボモータ単体では良し悪しは決められず、マシニングセンタの機構部の送り軸を含めた駆動系の、制御性を含む全体像に関する考察が必須となる。

高精度加工、高品位加工の代表的な加工事例である高精度金型用銅電極を図 3.3 に、そしてこの加工を行う場合にサーボモータに要求される制御性を含む主な特性を表 3.5 に示す。



図 3.3 高精度高品位加工のワークピースの例（銅電極）

表 3.5 高精度高品位加工でサーボモータに要求される主な特性

High precision and fine surface machining	
Specifications required for machining center	Specifications required for servo motor
④High precision PTP control and high precision CP control	High resolution and high accuracy encoder High response control
⑤Smooth feed of axis and robust feed of axis	Small cogging torque High response control

3.4 サーボモータとマシニングセンタを用いた実加工実験の手法と結果

本節では、3.3節で論じたハイサイクル加工と高精度高品位加工という2つの代表的な加工事例について実加工実験を行うが、その前提として以下の準備を行う。①本章の実加工実験では、サーボモータの慣性モーメントが加工結果に与える影響の把握が目的なので、サーボ制御系のゲイン余裕、位相余裕が各実験で同じとなる様に、サーボ制御のパラメータを調整する。②実験結果の評価にはその評価指標が重要であり、ハイサイクル加工では、加工時間即ち加工サイクルタイムがそれに相当する。一方、高精度高品位加工では、高精度には表面粗さ計による測定値 Ra, Rz が一般的な評価指標だが、高品位については未だ定まっていない。そこで本研究では、白色干渉顕微鏡の非接触三次元表面粗さ・形状測定機 (Opt-scope, 東京精密) を使用して撮像した表面性状の三次元可視化画像を評価指標とする。ここで、非接触三次元測定機による加工面の測定方法に関しては、文献 75)~80)、論文 81)82)も参照する。

3.4.1 ハイサイクル加工の実加工実験の方法

ハイサイクル加工の実加工実験では、小型立形マシニングセンタの各軸に3グループのサーボモータを順次載せ替えて実加工実験を行い、その総加工時間を測定し、これを評価指標とする。ワークピースとしては、図 3.2 に示した自動車部品のクランクケースを用いたが、これは総加工時間を最優先とする量産部品のハイサイクル加工の代表的として好適である。テーブル積載物の重量は、実際のハイサイクル加工の生産現場で見られる加工条件に近い状態となる様に、ワークピース+加工治具で約 100kg に調整する。また、各軸の加減速時定数に関しては、3グループのサーボモータで必要な加減速トルクの値が同等となる様に、CNC の関連パラメータを調整した。実験手順は以下の通りである。①3グループのサーボモータを順次小型立形マシニングセンタに搭載して、X, Y, Z 各軸の早送り位置決め時間を測定する。②図 3.2 に示したクランクケースに表 3.7 に示す加工条件でタッピング加工を行い、その総加工時間を測定する。

ワークピースと加工治具を含む X, Y, Z 各軸の慣性モーメントを表 3.6 に、X, Y, Z 各軸で3グループのサーボモータを載せ替えた場合の慣性モーメント比を図 3.4 に、その場合の慣性モーメントの合計値を図 3.5 に示す。各軸の加減速能力は、X, Y 軸では、サーボモータの最大トルクから機構部の摩擦トルクを減じた値を慣性モーメントの合計値で割って求める。一方 Z 軸では、サーボモータの最大トルクから機構部の摩擦トルクと共に重力方向負荷を支えるトルクを引いた値を慣性モーメントの合計値で割って求める。これを定式化して示すと、式(3.1)となる。

$$a_{cc} = \frac{(T_{max} - T_{friction} - T_{gravity})}{J_{total}} \quad (3.1)$$

a_{cc} : Acceleration and deceleration of the axis

T_{max} : Maximum torque of the servo motor

$T_{friction}$: Mechanical friction torque

$T_{gravity}$: Gravitational torque

J_{total} : Total moment of inertia

3.4.2 ハイサイクル加工の実加工実験の結果

3.4.1 節で示す方法で実施した実加工実験の結果を、表 3.8 に示す。先述の通り、各軸に於ける位置決め時間を決める加減速能力は、サーボモータの加減速トルクを慣性モーメントの合計値で割った値である。機構部の慣性モーメントは一定なので、サーボモータ単体の慣性モーメントが小さいと各軸の加減速能力は高くなり位置決め時間は短くなる。表 3.8 に於いても、各軸の位置決め時間が慣性モーメントの合計値の小さい順に短い事が分かる。なお、表 3.8 のサーボモータ #2, #3 の欄で (+) で示した%値は、#1 に対する各条件下での増加分を示している。

表 3.8 のサーボモータ#1, #2, #3 に対応する結果を比較すると、X, Y, Z 各軸の早送り位置決め時間の差に比べて、総加工時間、即ち加工サイクルタイムの差が小さい事が分かる。これは、後者には、実切削時間や主軸の加減速時間、工具の交換時間などサーボモータの加減速能力以外で決まる要素が含まれるためである。一般に、ドリル、タップ、工具交換などの割合が多い加工プログラムでは、サーボモータの加減速能力が加工サイクルタイムに与える影響は大きく、同一工具で比較的長時間加工を継続する加工プログラムでは、その影響は小さくなる。

表 3.6 ハイサイクル加工実験に於ける送り軸 3 軸の慣性モーメント

	Unit	X	Y	Z
Moment of axis inertia	$\times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	0.94	1.33	0.94

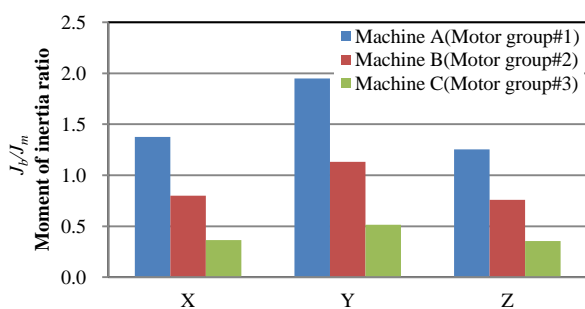


図 3.4 ハイサイクル加工実験に於ける送り軸 3 軸の慣性モーメント比

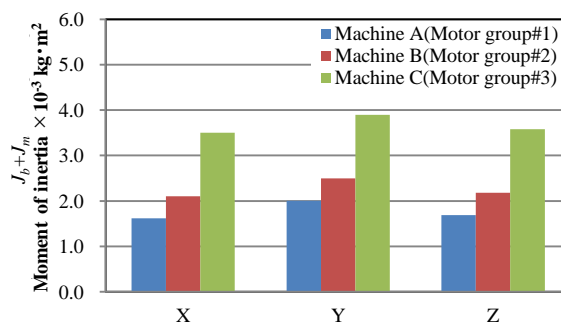


図 3.5 ハイサイクル加工実験に於ける送り軸 3 軸の慣性モーメントの合計値

表 3.7 ハイサイクル加工実験に於ける加工条件

Workpiece	Crankcase
Workpiece material	Aluminum die-cast
Workpiece mass (Including fixtures)	100 kg
Cutting type	Tapping and drilling
Spindle rotation speed	10000 min^{-1}
Rapid traverse feed rate	54000 mm/min

表 3.8 ハイサイクル加工実験に於ける早送り位置決め時間と総加工時間

Servo motor	#1	#2	#3
X(Stroke 500mm)	647ms	724ms (+12%)	778ms (+20%)
Y(Stroke 400mm)	582ms	679ms (+17%)	684ms (+18%)
Z(Stroke 300mm)	433ms	445ms (+3%)	514ms (+19%)
Total cutting time	1,299s	1,314s (+1%)	1,374s (+6%)

3.4.3 高精度高品位加工の実加工実験の方法

高精度高品位加工の実加工実験でもハイサイクル加工と同様に、小型立形マシニングセンタの各軸に 3 グループのサーボモータを順次載せ替えて実加工実験を行い、加工面の表面粗さ Ra, Rz 及び表面性状の三次元可視化画像を測定し、これを評価指標とする。但し、ワークピースは、図 3.6 に示す通り、高精度高品位加工実験用に設計したものとする。テーブル積載物の重量は、実際の高精度高品位加工の生産現場で見られる重量に近くなる様に、ワークピースと加工治具で約 30kg に調整する。実験手順は以下の通りである。①3 グループのサーボモータを順次小型立形マシニングセンタに搭載して、図 3.6 のテスト加工用のワークピースを図 3.7 に示す加工パスと表 3.9 に示す加工条件で加工する。②加工面の表面粗さと表面性状を測定する。

図 3.6 に示すワークピースは、X 軸と Z 軸のテーパ角度が各々 22.5° から 67.5° へと変化するテーパ面を含む。X 軸と Z 軸の同時 2 軸送りで加工面に直線軌跡を形成すると、角度が変化する部分でサーボモータの送り速度が急変し、その加速度、加加速度により機械振動が発生して直線軌跡が崩れ、加工面に筋目が現れやすい。即ち、このワークピースは同時 2 軸加工に於いて機械振動の抑圧性の差が加工面に現れやすい、即ち高精度高品位加工の評価に適したワークピースである。なお、図 3.7 に示す様に、加工パスは同一方向に揃えて、加工面の確認を容易にした。

第 2 章で分析した通り、加工現場で稼働する様々なマシニングセンタに於いて、高精度高品位加工向けマシニングセンタは、積載重量を小さく抑えて慣性モーメント比を下げる設計が一般的である。3.4.1 節と同様に、本節の実加工実験に用いたワークピースと加工治具を含む X, Y, Z 各軸の慣性モーメントを表 3.10 に、3 軸の各々で 3 グループのサーボモータを載せ替えた場合の慣性モーメント比を図 3.8 に、その場合の慣性モーメントの合計値を図 3.9 に示す。図 3.8 の慣性モーメント比の値もまた、マシニングセンタによる高精度高品位加工としては一般的である。

ここで、実加工実験を行う前に、3 グループのサーボモータを載せ替えた各々の場合に於いて、基礎データとして X 軸の周波数特性を測定する。送り軸の周波数特性の測定方法として、例えば CNC 工作機械のサーボ系に対して、微小角度を反転させる速度指令を低周波から高周波まで変化させて、その速度フィードバックを測定する方法が一般的であるが、他にも様々な方法があると考えられる。本研究では、X 軸の周波数特性は送り軸の挙動を測定するための専用の測定装置により測定するが、この測定装置と方法については、次章第 4 章で詳しく述べる事とする。

3.4.4 高精度高品位加工の実加工実験の結果

3.4.3 節で示す方法で、3 グループのサーボモータを順次載せ替えて高精度高品位加工の実加工実験を行った。サーボモータの慣性モーメント、慣性モーメント比と総慣性モーメント、X 軸の周波数特性、実加工したワークピースの加工面の精度と面品位の測定結果を一覧にして表 3.11 に示す。まず何より、表 3.11 上段の周波数特性から、マシニングセンタの X 軸で慣性モーメント比の違いが周波数特性に影響を与えている状況が観測される。具体的には、3 グループのサーボモータ #1, #2, #3 に対応して、反共振周波数は 68Hz で固定される一方で、共振周波数は 80Hz, 76Hz, 72Hz と異なっている。反共振周波数と共振周波数の乖離が小さい程、制御性は高くなるので¹⁹⁾²⁰⁾、#3, #2, #1 の順に制御性が良好で、#3 で最も高くなっている事が読み取れる。

加工面の精度の評価指標としては、表面粗さ計による測定結果である表面粗さ Ra, Rz と表面粗さ曲線が一般的であるが、本節でもこれを適用する。本節で加工したワークピースの表面粗さ Ra, Rz と表面粗さ曲線は、表 3.11 中段に示した通りである。表 3.11 中段より、ワークピースの加工面の表面粗さがサーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比の小さい順に良好で、マシニングセンタの加工精度が高い事が分かる。この結果は、機械振動が発生した時の減衰性、即ちサーボ制御系の制御性の差が、実加工実験の加工面に現れた結果であると言える。なお、表 3.11 中段の Ra, Rz の行、サーボモータ #2, #3 の列に於いて、(－) で示した%値は、#1 のサーボモータを使用した場合の表面粗さ Ra, Rz からの減少率を示している。

加工面の面品位の評価については、先述の白色干渉顕微鏡である非接触三次元表面粗さ・形状測定機 Opt-scope を用いて撮像した、表面性状の三次元可視化画像を評価指標とした。定量的な測定が難しい加工面品位に於いては、その評価方法に関して様々な試みはあるが、未だ完全には定まっていない。本研究で提案した撮像画像を評価指標とする方法は、現時点では効果的な評価方法の一つである。表 3.11 下段に示す一連の撮像結果に於いても、3 グループのサーボモータの各々に対応する加工面品位が慣性モーメント比の小さい順に良好である、具体的には、加工面の凹凸に起因する筋目が目立たず、加工面が滑らかである。撮像画像から読み取れる加工面の差もまた制御性、ここでは機械振動発生時の外乱抑圧性の差が加工面に現れた結果である。

なお、マシニングセンタの制御系は、一般にボールネジなどねじり剛性を持つ機構要素で結合した 2 慣性系であるため、慣性モーメントの合計値即ち総慣性モーメントは慣性モーメント比に比べて、高精度高品位加工に与える影響が比較的小さい事が知られている。しかしながら、万一この結合度が極めて高く、制御系として 1 慣性系と見なせる場合には、慣性モーメントの合計値即ち総慣性モーメントが重要となる。この点についても、3.4.5 節で実際に実加工実験を実施し、マシニングセンタの制御系が実際に 2 慣性系である事を、具体的、定量的に検証する。

表 3.11 下段の三次元表面粗さ・形状測定機を用いた撮像による測定結果を分析すると、サーボモータ#1 では加工表面に明らかに周期的な筋目が観察されるが、サーボモータ#2 ではその筋目は軽微であり、サーボモータ#3 では殆ど見られない。この種の筋目は、余程軽微でない限り肉眼でも確認出来るため、官能評価ながらも実際に金型加工などの加工現場では加工面品位に対する良否判別の一つの判断基準となっている。この様な筋目の周期や発生原因は機械や加工により様々であり、その研究も実加工現場では今後の重要テーマとなりつつある。

表 3.11 中段の表面粗さの測定結果と下段の撮像測定結果を総合すると、加工表面の主な筋目の大きさは3種類のモータグループにより異なるが、その周期は約 0.2mm と約 1.1mm である事が分かる。約 0.2mm 周期の成分は、表 3.9 の送り速度 2000 mm/min と主軸回転速度 10000min⁻¹ から、1回転当たりの送り量 0.2 mm/回と一致する。使用した工具は二枚刃だが、高品位加工の仕上げ加工では一般に切り込み量は数十μm と小さいため、二枚刃のうち一枚しかワークピースに接触しない。従って、0.2mm 周期の成分は所謂カッターマークであると考えられる。

一方、後者の約 1.1mm 周期の成分は、周波数換算で $2000/60/1.1 = 30.3(\text{Hz})$ となる。表 3.3 の下段に記載された通り、この小型立形マシニングセンタの X 軸は約 30Hz に共振点を持つため、X 軸のサーボモータの回転速度が 30Hz 付近に達した際に、マシニングセンタの X 軸方向の共振周波数と重なり加工表面に筋目となって表れた。表 3.11 上段の周波数特性では、反共振周波数、共振周波数は共に 60Hz 以上なので、上記の 30.3Hz 成分は制御による抑制が十分に可能である。但し、その抑制の程度、即ち外乱抑圧性はサーボモータ#1、#2、#3 で異なり、この差が表 3.11 中段の加工結果の違いとして表れている。サーボモータの回転速度が機械系の共振点と重なると送り軸の滑らかさに影響するというこの考え方は、工作機械とその制御では一般的である。

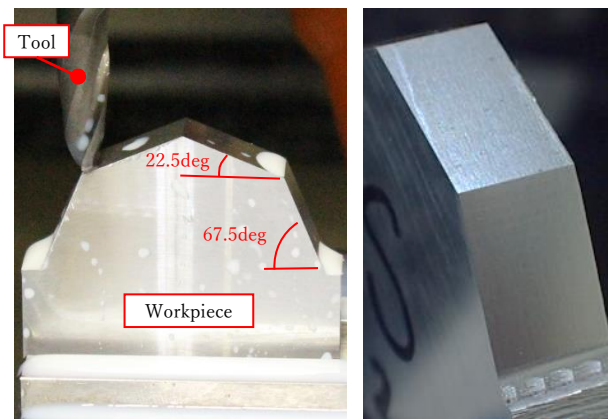


図 3.6 高精度高品位加工実験に使用したワークピース

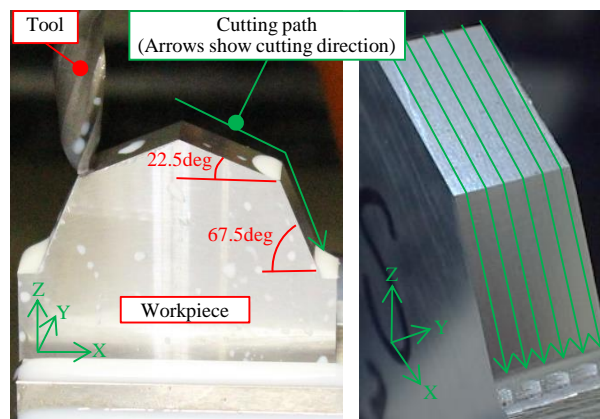


図 3.7 高精度高品位加工実験に使用した加工パス

表 3.9 高精度高品位加工実験に於ける加工条件

Workpiece material	Aluminum
Workpiece mass(Include fixtures)	30 kg
Cutting type	Milling
Spindle rotation speed	10000 min ⁻¹
Cutting feed rate	2000 mm/min
Tool	R4.0 2Flutes ball-end
Cut depth	0.1 mm
Pick feed pitch(X,Z)	0.1 mm

表 3.10 高精度高品位加工実験に於ける送り軸 3 軸の慣性モーメント

	Unit	X	Y	Z
Moment of axis inertia	×10 ⁻³ kg·m ²	0.68	1.07	0.94

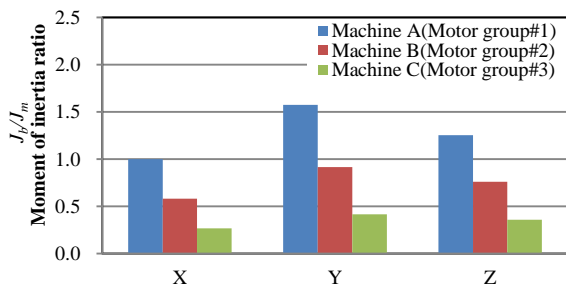


図 3.8 高精度高品位加工実験に於ける送り軸 3 軸の慣性モーメント比

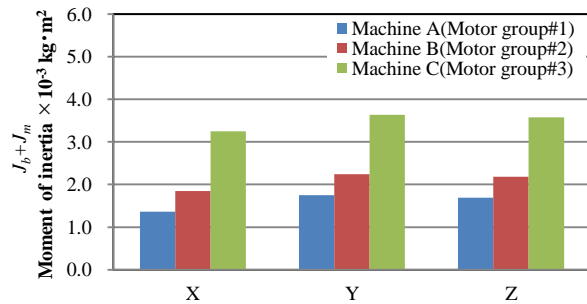


図 3.9 高精度高品位加工実験に於ける送り軸 3 軸の慣性モーメントの合計値

表 3.11 加工面粗さと加工面品位（負荷側の慣性モーメントが一定）

Motor group	#1	#2	#3
Moment of rotor inertia	$0.68 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$1.17 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$2.57 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Total moment of inertia	$1.36 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$1.85 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$3.25 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment of inertia ratio	1.01	0.58	0.27
Additional load	30kg		
Frequency response of velocity control of X axis Blue line: Closed-loop Red line: Open-loop			
Photograph of machining surface			
Line roughness	<p>Ra 0.37μm Rz 2.54μm</p>	<p>Ra 0.36μm (-3%) Rz 2.22μm (-13%)</p>	<p>Ra 0.31μm (-16%) Rz 1.97μm (-22%)</p>
Surface roughness			

3.4.5 総慣性モーメントが制御性に与える影響の確認実験の方法とその結果

3.4.4 節に於いて、マシニングセンタの機構部の送り軸とサーボモータの慣性モーメント比が、高精度高品位加工の加工結果に大きく影響する事を示した。しかし、3 グループのサーボモータを順次搭載した際に、機構部の送り軸とサーボモータの慣性モーメントの総和、即ち総慣性モーメントも若干だが変化した。そこで、3.4.4 節で得られた加工結果の差異が、慣性モーメント比の違いに起因し、総慣性モーメントの違いには起因しない事を確認する目的で、積載物のみを変更して総慣性モーメントを同一とした上で、3.4.4 節と同様の実加工実験による検証を行った。

まず、3.4.4 節の実験条件に加えて、3 グループのサーボモータを順次搭載した際に総慣性モーメントが全て同一となる様に計算した重量の積載物を、実加工実験毎にマシニングセンタのテーブルに搭載した。本研究で使用した小型立形マシニングセンタは、所謂テーブル移動型である。従って、3.4.4 節で準備したワークピースと、本節で準備した機構部の送り軸の慣性モーメントを調整するための積載物を図 3.10 に示す配置でテーブル上に固定すると、本実験で積載物の重量の違いの影響を受ける軸は、マシニングセンタのテーブルを駆動する X 軸のみとなる。

以上の準備を行った上で 3.4.4 節と同様の実加工実験を実施した。その測定結果を、表 3.11 と同じ形式で表 3.12 に示す。表 3.12 上段の周波数特性では、サーボモータ#1, #2, #3 に対応して、反共振周波数は 38Hz, 42Hz, 68Hz, 共振周波数は 58Hz, 58Hz, 72Hz であり、3.4.4 節と同様に両者の乖離に着目すると、やはり#3, #2, #1 の順に制御性が良好である事が分かる。表 3.12 中段下段の各測定結果も表 3.11 と同じ傾向であり、結局、総慣性モーメントを同一とした本節の実験結果は 3.4.4 節と同様の傾向となる。これにより、3.4.4 節で得られた加工結果の差異が慣性モーメント比の違いに起因し、総慣性モーメントの違いには起因しない事が確認された。そしてこの結果は、マシニングセンタの X 軸の駆動系が 1 慣性系ではない事を裏付けた。

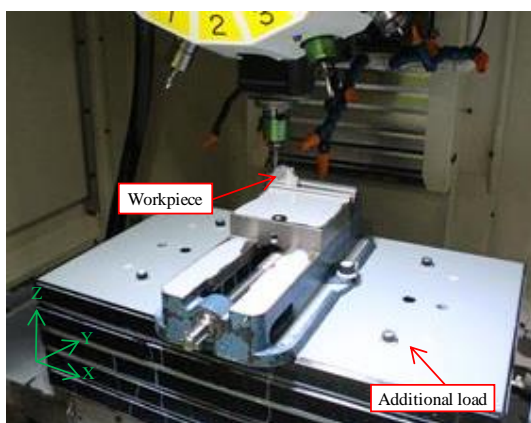


図 3.10 総慣性モーメントを一定とする比較実験用の積載物とその配置

表 3.12 加工面粗さと加工面品位（総慣性モーメントが一定：比較実験）

Motor group	#1	#2	#3
Moment of rotor inertia	$0.68 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$1.17 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$2.57 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Total moment of inertia	$3.25 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$		
Moment of inertia ratio	3.68	1.78	0.27
Additional load	500kg	400kg	30kg
Frequency response of velocity control of X axis Blue line: Closed-loop Red line: Open-loop			
Photograph of machining surface			
Line roughness	<p>R_a 0.61μm R_z 5.17μm</p>	<p>R_a 0.37μm (-39%) R_z 2.56μm (-50%)</p>	<p>R_a 0.28μm (-54%) R_z 1.87μm (-64%)</p>
Surface roughness			

3.4.6 高精度高品位加工の2種類の実加工実験結果の比較と定量考察

3.4.4 節で実施した実験条件，即ち積載重量は 30kg で統一し 3 グループのサーボモータを載せ替えて同一のワークピースを加工した場合の一連の測定結果は，表 3.11 に示す通りである．一方 3.4.5 節で実施した実験条件，即ちテーブル上の積載重量を 3 グループのサーボモータの搭載毎に調整して，総慣性モーメントを同じとした場合の一連の測定結果は，表 3.12 に示す通りである．表 3.11 と表 3.12 の全測定結果を比較すると，X 軸の周波数特性，加工面粗さ，表面性状可視化画像の全てに於いて，慣性モーメント比の小さい順に結果は良好だが，その程度の差は，表 3.12 即ち総慣性モーメントを同一とした場合の方がより顕著である事が分かる．これは，表 3.12 即ち 3.4.5 節で実施した実験条件で，慣性モーメント比の差がより大きい事に起因する．

現実的には，3.4.5 節で実施した様に，400kg，500kg の重量物をテーブル上に搭載して，小型立形マシニングセンタで高精度高品位加工を試みるケースは殆どない．これまでに述べた通り，このサイズのマシニングセンタで微細部品や高精度金型を加工する場合には，積載重量は 30kg 程度或いはそれ未満に留めて，高精度高品位加工を目指す事が一般的である．つまり，3.4.5 節の重量物の搭載は，総慣性モーメントではなく慣性モーメント比が制御性に与える影響が支配的である事を確認するために，意図的に作り出した条件であり，現実的には可能性の低い極端な条件設定であった．しかし，結果としては上述の通り，慣性モーメント比が高精度高品位加工の加工結果に与える影響をより顕著に観測出来たという点で，副次的に有意義な知見が得られた．

本実験で副次的に得られた知見の別の例を挙げる．表 3.11 の表面粗さ計による測定結果で考察した 1.1mm 周期成分は，表 3.12 の，特に#1，#2 で 1.4mm 程度の周期に拡大している事が読み取れる．これは，表 3.12 では比較実験を実施するためにテーブル積載重量を増しており，特に#1，#2 に於いてその値が 500kg，400kg と大きいため，マシニングセンタの X 軸の共振周波数が本来持つ値である 30Hz から大きく低下した事に起因する．一般には，送り軸の共振周波数を大きく低下させる重量の積載物の搭載は，工作機械の使用方法として適切でなく，それが高精度高品位加工を目的としたマシニングセンタであれば，尚更適切ではない．このような副次的な考察が可能となる点でも，3.4.5 節の比較実験の有用性が確認された．

総慣性モーメントより慣性モーメント比が制御性に強い影響を与える理由を，制御的観点から改めて考察すると，マシニングセンタに於いてサーボモータから切削点に至るまでの機構系にはボールネジや LM ガイドなどのねじり剛性を持つ機構要素が含まれ，またワークピースを載せるテーブルや主軸を搭載するコラムも剛体ではない．即ち，制御対象としては少なくとも 2 慣性系以上であると考えられる．仮に，機械要素の結合剛性が非常に高く，制御的には 1 慣性系或いはそれに近い制御対象とみなせる機構部の場合には，総慣性モーメントが大きな影響を与える事に

なる。但し、マシニングセンタの機構部の送り軸が1慣性系でない事は、先述の3.4.5節で実施した総慣性モーメントを同一としての確認実験の結果により、定量的に証明された。

以上を総括すると、3.4.5節で実施した比較実験、即ち現実問題としては可能性の低いテーブル積載重量とした比較実験により、①本来の目的である、マシニングセンタの機構部の送り軸を2慣性系として扱う事の妥当性が裏付けられ、②慣性モーメント比が高精度高品位加工の加工面に与える影響がより顕著に分かり、様々な副次的な分析や考察も可能となった。言い換えれば、本研究に於いて最も重要な実験の一つである3.4.4節の結果が、3.4.5節の実験を追加した事により深く考察され、本研究の主張点がより明確になったと考える。

ここで、表3.11、表3.12で示した周波数特性に着目して、数理的な考察を試みる。まず、第2章の図2.5に示した2慣性系力学モデルの伝達関数を用いて、サーボモータと機構部の送り軸からなる制御系の共振周波数と反共振周波数を、計算により算出する。次に、表3.11及び表3.12の周波数特性から、共振周波数と反共振周波数を読み取る。

まず、第2章の図2.5に示した2慣性系力学モデルの伝達関数を再度以下に示す。

$$\frac{\theta_m}{T_m} = \frac{J_b \cdot s^2 + K_s}{s^2(J_m \cdot J_b \cdot s^2 + K_s(J_m + J_b))} \quad (3.2)$$

反共振点に於いては $J_b \cdot s^2 + K_s = 0$ なので、 $s = j\sqrt{\frac{K_s}{J_b}}$

共振点に於いては $J_m \cdot J_b \cdot s^2 + K_s(J_m + J_b) = 0$ なので、 $s = j\sqrt{K_s\left(\frac{1}{J_b} + \frac{1}{J_m}\right)}$

従って、反共振周波数 f_a 、共振周波数 f_{ro} 、共振比 f_{ro}/f_a は各々以下の通りとなる。

$$f_a = \frac{s}{2\pi j} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_s}{J_b}} \quad (3.3)$$

$$f_{ro} = \frac{s}{2\pi j} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K_s\left(\frac{1}{J_b} + \frac{1}{J_m}\right)} \quad (3.4)$$

$$\frac{f_{ro}}{f_a} = \sqrt{1 + \frac{J_b}{J_m}} \quad (3.5)$$

以上の計算式で算出された共振周波数と反共振周波数から算出される共振比を表 3.13 に、また表 3.11 及び表 3.12 の周波数特性から読み取った共振比の値を表 3.14 に示す。

表 3.13 サーボモータと機構部の送り軸で構成される制御系の共振比（計算結果）

計算値	表 3.11			表 3.12		
	#1	#2	#3	#1	#2	#3
$J_b \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	0.00068	0.00068	0.00068	0.00257	0.00208	0.00068
$J_m \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	0.00068	0.00117	0.00257	0.00068	0.00117	0.00257
共振比	1.41	1.26	1.12	2.19	1.67	1.12

表 3.14 サーボモータと機構部の送り軸で構成される制御系の共振比（実測結果）

実測値	表 3.11			表 3.12		
	#1	#2	#3	#1	#2	#3
反共振 Hz	68	68	68	38	42	68
共振 Hz	80	76	72	58	58	72
共振比	1.18	1.12	1.06	1.53	1.38	1.06

式(3.3)によれば、反共振周波数は機構部の送り軸の慣性モーメントには関係して、サーボモータの慣性モーメントには関係しない。一方、式(3.4)によれば、共振周波数は両方の慣性モーメントに関係する。この観点で本章の実験結果を確認すると、実際に送り軸の慣性モーメントを変えていない 3.4.4 節の実験結果では、反共振周波数は 68Hz で一定であり、比較のためにテーブル積載重量を増して送り軸の慣性モーメントを変えた 3.4.5 節の実験結果では、反共振周波数はサーボモータ #1, #2, #3 に対応して 38Hz, 42Hz, 68Hz と異なっている。これらの結果は表 3.14 に示した通りであり、式(3.3), 式(3.4)と整合する。また式(3.5)より、制御性の指標となる共振比は、送り軸とサーボモータの慣性モーメントのみで決定し、2 慣性系の持つばね要素、ねじり剛性には関係しない事が分かる。これより、上述の様な表 3.13 と表 3.14 との比較、即ち計算結果と実験結果との比較が比較的容易に可能となる。

表 3.13 と表 3.14 を比較すると、サーボモータ#3, #2, #1 の順に共振比が 1 に近く、#3 が最も 1 に近い、即ち制御性が高いという傾向が両者で一致する事が分かる。この結果から、機構部の送り軸を基本的に 2 慣性系と想定した事の妥当性が確認された。一方で、計算値と実測値とが一致しない理由として、機構部の送り軸の慣性モーメントの算出誤差、機構部の送り軸が持つ他のばね要素の存在が考えられる。特に表 3.14 のサーボモータ#1 は、送り軸の慣性モーメントを意図的に極端に増やした比較実験であるため、制御的に非常に厳しい条件となり、計算値との差も大きくなったものと推定する。従って、計算精度を更に向上させるためには、2 慣性系より多い多慣性系でのより詳細な分析が必要となると考える。

計算結果と実測結果が一致しないもう一つの要因として、ボールネジの慣性モーメントが全て機構部の送り軸側に含まれるとの仮説が一定の誤差を含む可能性が考えられる。サーボモータとボールネジとの間が減速機構を介して接続される場合は、この仮説が成立するが、本研究のマシニングセンタは、近年工作機械で採用される事の多い、サーボモータとボールネジをリジッドカップリングで直結する構造を取っている。従って、ボールネジの途中まで或いはその大部分が、サーボモータ側の慣性モーメントとして挙動する可能性もある。その場合には、表 3.13 の共振比の計算結果は表 3.14 の実測結果に近づく。この点から考えても、更に計算精度を向上させるためには、2 慣性系より多い多慣性系での議論が必要となる。

3.5 サーボモータとマシニングセンタを用いた実加工実験の結果に対する考察

慣性モーメントの異なる3グループのサーボモータを、小型立形マシニングセンタの送り軸に順次搭載し、その各々に於いて、ハイサイクル加工と高精度高品位加工の実加工実験を実施した。準備した3グループのサーボモータの慣性モーメントは互いに明確に異なり、かつ小型立形マシニングセンタの機構部の送り軸の慣性モーメントに対して見合った値、即ち慣性モーメント比で0.2~2と設定した。このため、サーボモータの慣性モーメントの違いとマシニングセンタによる実加工結果の違いとの相関が、より顕著に現れる結果となった。

3.4.2節の実験結果より、ハイサイクル加工に於いて、サーボモータの慣性モーメントは、マシニングセンタの送り軸を十分に駆動出来る範囲で出来るだけ小さい方が加工時間短縮に寄与する事が分かった。一方、3.4.4節からは、高精度高品位加工に於いて、マシニングセンタの機構部の送り軸の慣性モーメントとサーボモータの慣性モーメントの比である慣性モーメント比が小さい方が、加工面粗さと面品位が良い事が分かった。3.4.4節の結果は、言い換えればサーボモータの慣性モーメントは出来るだけ大きい方が良い事になり、3.4.2節の結果と相反する。つまり、マシニングセンタの種類とその加工対象により、選定され搭載されるサーボモータに求められる慣性モーメント値の範囲が明確に異なる事が、実加工実験により裏付けられた。

これは、第2章で実施した、サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関する議論の中で実施した、力学モデルを用いた定量的な考察、及び実際に加工現場で稼働している様々な種類のマシニングセンタとその慣性モーメント比の調査の結果と良く合致している。即ち、第2章の一連の考察の結果が、本章の実加工実験で明確に裏付けられた。

ハイサイクル加工と高精度高品位加工について、更に詳しく比較すると、一般に前者では加工プログラム中にドリル、タップ、工具交換などが多いため、位置決め頻度は高いが、切削時間は短い。しかし後者では、加工プログラム中に同一工具で長時間加工するケースが多いため、位置決め頻度は低い、切削時間は長い。その結果、位置決めが多いハイサイクル加工用プログラムでは、必然的に早送りが占める割合が多くなり、切削時間の長い高精度高品位加工用プログラムでは、必然的に切削送りが占める割合が多くなるという特徴がある。

従って、ハイサイクル加工では早送り時間の短縮のために、マシニングセンタの送り軸に慣性モーメントが比較的小さく加減速性能の高いサーボモータが求められる。一方、高精度、高品位加工では切削送りの精度と滑らかさが重要で、送り軸に慣性モーメントが比較的大きく制御性の高いサーボモータが求められる。この様に、マシニングセンタの加工プログラムの中で、早送りと切削送りとが占める割合を比較しても、ハイサイクル加工と高精度高品位加工の各々で、求められるサーボモータの慣性モーメントが明確に異なる事が明らかとなる。

3.6 結言

本章では、サーボモータの慣性モーメントの違いがマシニングセンタの加工結果に与える影響に着目した。まず、慣性モーメントの異なる 3 グループのサーボモータを順次小型立形マシニングセンタに搭載して、実加工実験を行った。次に、その加工時間と加工精度、加工面品位を測定し、その結果を比較して考察した。その結果、マシニングセンタが加減速性能を重視する場合、制御性（特に外乱抑圧性）を重視する場合の各々で、第 2 章に於いて実施した考察と分析の結果が、本章で実施した実加工実験により裏付けられた。

また、第 2 章と本章により、マシニングセンタの種類、加工内容、ワークピースに応じた慣性モーメントという観点からのサーボモータの適不適、選定方法について、2 慣性系の力学モデルによる理論的考察、実際の加工現場で稼働するマシニングセンタの調査と分析、小型立形マシニングセンタを使用した実加工実験による検証結果という 3 つの根拠に基づいて、汎用性のある指針を示す事が出来た。この指針は、既存のサーボモータの慣性モーメントに関する経験則を具体的に裏付けただけでなく、更に様々な方向に展開出来ると考える。

本章の議論の過程で、慣性モーメントのみ異なるサーボモータとマシニングセンタを使用した一連の実加工実験とその測定評価の有用性を実証した点、及び高品位加工の実加工実験とその評価に適したワークピースを新たに考案した点も、本章の成果である。高品位加工は加工する対象が複雑な曲面である事が多く、そのためハイサイクル加工や高精度加工と比較して、実験と評価が難しいとされて来た。そして最後に、機構部の送り軸を 2 慣性系で表現する事の妥当性も、総慣性モーメントを一定とした比較実験により更に実証した。

この様に、本章で実際にマシニングセンタを用いて実加工実験を行う事で第 2 章の考察と分析を裏付けたが、実加工実験は工作機械の総合的な加工性能を示す一方で、サーボモータ以外の要素、例えば加工工具、工具ホルダ、加工条件などから受ける影響を完全に排除する事は出来ないという問題点もある。そこで次章即ち第 4 章では、本章と同じサーボモータと小型立形マシニングセンタを用いながら、サーボモータの慣性モーメントとサーボモータの挙動のみとの関係に着目した実験と考察を行い、本章の結果との差異を検証する。

第4章 慣性モーメント比の違いがマシニングセンタの送り軸の挙動に与える影響とその評価のための測定システム

4.1 緒言

4.2. マシニングセンタの送り軸の挙動測定による検証の手法

4.2.1 実加工実験に用いるサーボモータの主な仕様

4.2.2 送り軸の挙動測定に用いる測定システムと測定方法

4.3 マシニングセンタの送り軸の挙動測定の想定動作と想定条件

4.3.1 マシニングセンタによるハイサイクル加工

4.3.2 マシニングセンタによる高精度高品位加工

4.4 マシニングセンタの送り軸の挙動測定の結果

4.4.1 ハイサイクル加工に於ける測定結果

4.4.2 高精度高品位加工に於ける測定結果

4.4.3 実加工実験と測定システムによる測定結果の二次元表示による比較

4.4.4 実加工実験と測定システムによる測定結果の三次元表示による比較

4.5 マシニングセンタの送り軸の挙動測定の結果に対する考察

4.6 結言

第4章 慣性モーメント比の違いがマシニングセンタの送り軸の挙動に与える影響とその評価のための測定システム

4.1 緒言

第3章では、第2章の一連の議論に基づいて、サーボモータの慣性モーメントの違いがマシニングセンタの加工性能に与える影響を、実際にマシニングセンタを用いた実加工実験を実施して検証した。具体的に言えば、慣性モーメントのみが異なる3グループのサーボモータと小型立形マシニングセンタを用いて一連の実加工実験を行い、加工に要した加工時間と、加工したワークピースの加工精度、加工面品位を測定してその結果を比較した。そして、この実加工実験と測定結果を、第2章で得た結論、即ち慣性モーメントの小さいサーボモータは加工サイクルタイムを重視する機種に適し、慣性モーメントの大きいサーボモータは加工精度と面品位を重視する機種に適するという結論と比較し、両者が整合性を持つ事を確認した。

しかしながら、第3章で実施した実加工実験は、工作機械の最終的な加工性能を示す一方で、サーボモータ以外の要素、例えばマシニングセンタの機械剛性、加工工具、加工条件などの影響も排除し切れない。そこで、第4章となる本章では、第3章で使用した実加工プログラムを実行するが、実加工の結果のみに着目するのではなく、その際のマシニングセンタの機構部の送り軸の挙動に着目する。即ち、サーボモータとその駆動系を測定する、専用の測定システムを準備し、これを用いて機構部の送り軸の挙動を定量的に測定し、その測定結果と第3章の実加工結果とを比較する。この手法であれば、サーボモータ以外の要素の影響が測定結果に反映されないため、サーボモータの違いがマシニングセンタに与える影響をより明確に評価出来る。

併せて、第3章で実施した実加工実験による工作機械の加工性能の検証と、本章に於いて提案する専用の測定システムによる機構部の送り軸の挙動の測定という2つの手法を比較して、両者の長所と短所を考察する。サーボモータの与える影響を含めた工作機械の性能を評価する際に、その主な評価対象を、サーボモータが駆動する送り軸に絞るか、或いは工作機械の総合的な加工性能とするかにより、上述の2つの手法のどちらが適するかが決まると考えられる。本章の議論の中で、この2つの手法の適性、即ち長所と短所についても具体的に論じる。

4.2 マシニングセンタの送り軸の挙動測定による検証の手法

第3章では、サーボモータとマシニングセンタを用いた実加工実験を通して検証を行い、その結果から、慣性モーメントの比較的小さなサーボモータは加工サイクルタイムの短縮に寄与する一方、慣性モーメントの比較的大きなサーボモータは高精度高品位加工に適しているとの考察に至った。そして、この第3章の考察の結果は、第2章の考察の結果と整合性を持つ事を明らかにした。なお、第3章でも述べたが、本章以降に於いても、より短い加工時間、より短いサイクルタイムを目指す種類の加工を、ハイサイクル加工と呼ぶ事にする。

しかし、実加工実験は工作機械の総合的な加工性能を示すものの、一方でサーボモータ以外の要素の影響は排除しきれない。例えば、加工工具がワークピースを削る際に生じる所謂カッターマークは、事前の加工工具の選択、その加工工具の切削性能などにより、大きさも形状も大きく異なる。その結果、得られた加工面質の違いが、サーボモータの違いにより生じたものなのか、加工工具の違いにより生じたものなのかの判別が難しいといった問題に直面する。判別が難しい場合、その対策もまた難しくなるため、問題を切り分ける手段が必要とされる。

そこで本章では、まず第3章と同様に、小型立形マシニングセンタの各軸に3つのグループのサーボモータを順次搭載し、同じ加工プログラムを実行するが、その際に同時にサーボモータのエンコーダから得られる位置データを、準備した専用の測定システムを用いて測定する。具体的には、サーボモータの位置データを測定システム内の計算機に取り込み、各送り軸の動作時間と位置偏差、即ち CNC がサーボモータに指令する指令位置と、同時刻にサーボモータが搭載するエンコーダから CNC にフィードバックされる実際の位置との偏差を算出する。

更に、高精度高品位加工の実験に於いては、この手法で得られた各送り軸の時間と位置偏差のデータを合成して2軸同時送り時の位置と位置偏差の関係を算出する。最後に、この手法で得られた測定結果と第3章の実加工実験の結果とを比較して、両者の整合性を確認すると共に、この手法と第3章の実加工実験の、各々の長所と短所も検証する。この手法の場合、加工工具や加工条件の影響などが測定結果に反映されないため、特に高品位加工実験に於いて、サーボモータの慣性モーメントの違いがマシニングセンタに与える影響をより明確に評価出来る。

4.2.1 実加工実験に用いるサーボモータの主な仕様

まず、第3章で使用した3つのグループのサーボモータと小型立形マシニングセンタ、そして加工プログラムなどを改めて準備する。全ての実験準備を行った後、同一の加工プログラムで、実切削は行わず機構部のみを駆動する空運転を行う。なお、サーボモータグループ#1、#2、#3に搭載されたエンコーダは全て同一の仕様で、分解能は24bit (約 1.6×10^7 /rev) であり、本章の実験に使用するマシニングセンタのボールネジピッチはX、Y、Z軸全軸で12mm/revなので、上述の分解能は直線換算で $12/1.6 \times 10^7 = 7.5 \times 10^{-7}$ (mm)、即ち0.75nmとなる。サーボモータを高精度高応答に制御したい場合にはエンコーダの分解能も重要となるが、nmレベルではなく μm レベルの加工結果を論じる本章では、上述のエンコーダは十分に高分解能である。

4.2.2 送り軸の挙動測定に用いる測定システムと測定方法

機構部の送り軸の挙動の測定には様々な方法があるが、送り軸を駆動するサーボモータのエンコーダから得られる信号を、CNCを経由して計算機に取り込んで処理する方法も、その代表的な事例である。一般に、エンコーダ信号はCNCの内部で位置データに換算され、サーボモータの制御に使用される。本章では、CNC内部で換算された位置データを計算機に取り込み、その計算結果を送り軸の挙動測定に活用する。本章の測定システムの構成を、図4.1に示す。なお、この測定システムに於けるエンコーダ信号のサンプリング周期は1msに設定している。

エンコーダ信号に基づいて算出する送り軸の挙動の表示方法を、図4.2に示す。図4.2の左の図で、 $P_n(X_n, Y_n)$ は時刻 n に於けるサーボモータの実際の位置である。一方 $Q_m(X_m, Y_m)$ は、 P_n 近傍の加工プログラムの指令位置である。 (a, b) を大きさが1の単位ベクトルとして、 Q_{m-1} と Q_m とを結ぶ直線をベース線分 $ax+by=k$ と定義すると、 P_n からベース線分に垂線を降ろしたベクトル d_n の長さ D_n は、 $D_n = (aX_n + bY_n - k) / \sqrt{(a^2 + b^2)}$ となる。この D_n を、サーボモータの位置とプログラム指令位置との位置偏差と定義する。しかし、この位置偏差をそのまま図示してもその絶対値が微小であるため、目視による観察や分析は難しい。そこで、図4.2の右の図に示す様に、位置偏差を任意に拡大表示して、目視による観察や分析が可能な波形データに変換する。本章の測定システムにより取得する位置偏差データは、この方法を用いて拡大表示している。

図4.1の測定システムによる送り軸の挙動測定方法は、工作機械の加工性能を推定する一つの手法²⁵⁾²⁶⁾として、既に加工現場で広く活用されている。しかし、実際にワークピースを加工した実加工実験による評価と比較してみると、以下に示す様な長所と短所がある。そのため、実際の工作機械の設計現場などでは、まずこの測定システムを使用してCNC機能のパラメータ調整や工作機械の剛性アップなどの工作機械側の改善を実施し、その上で最終確認として実加工実験を行い、加工時間、加工精度、加工面品位などを確認するという手法が、より合理的である。

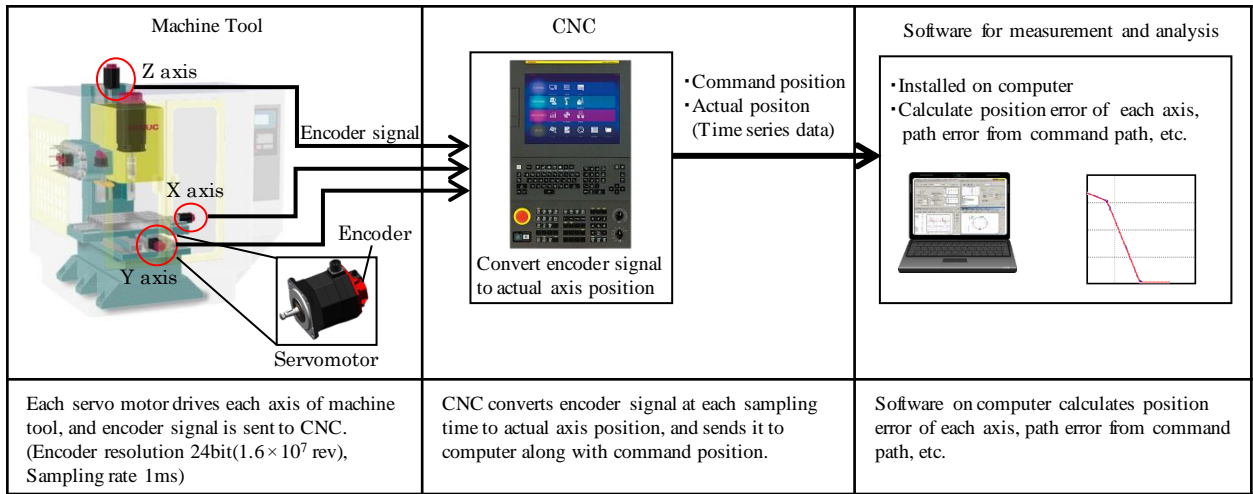
長所 : ①加工に関連する要素の影響を受けず, 送り軸の挙動のみの評価が可能
②実加工実験と比較して, 短時間でより多くの実験データの収集が可能

短所 : ①工作機械の総合的な加工性能の指標にはなり得ず, 参考指標に留まる
②特に加工面品位に関しては, 最終的な良否判断には実加工実験が必須

第3章では実加工実験を一通り実施したが, 本章では, まず第3章で用いた加工プログラムを実行し, 実切削は行わず機構部のみを駆動する空運転を行い, 上述の測定システムを活用して, サーボモータの位置データを計算機に取り込む. 次に, その位置データを元に機構部の送り軸の動作時間及び送りの精度と滑らかさを求める. この一連の手法を実施して得られた測定結果と, 第2章の考察結果及び第3章の実加工結果を比較して, 互いの整合性を確認する. 特に, 第3章と本章との比較は, 上述の測定評価手法の長所と短所の議論の裏付けにもなる.

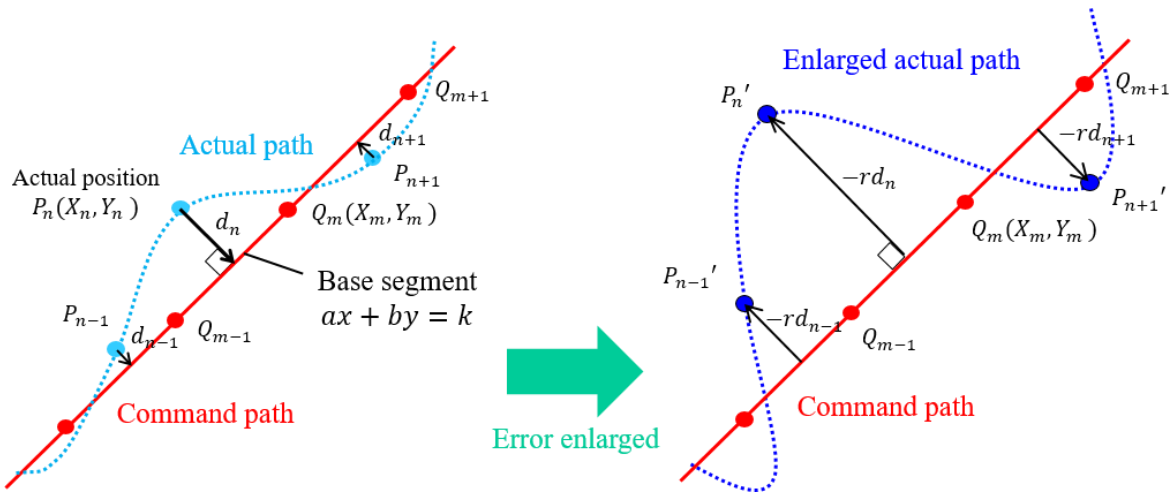
ここで, 第3章の実加工実験では加工工具がワークピースと接触して切削負荷を発生するが, 本章では空運転なので切削負荷が発生しないという相違点がある. しかし, 実際の加工現場では難削材加工や重切削加工などの場合を除き, 一般的なハイサイクル加工や高精度高品位加工ではサーボモータに加わる切削負荷は軽微であり, 特に後者は加工精度や面品位を求める仕上げ加工であるため切り込み量も切削負荷も一般に非常に小さい. そこで本章では, サーボモータの慣性モーメントの違い以外の影響を極力排除するために, 空運転による実験を選択する.

なお, 近年市場要求が急速に高まりつつある高品位加工に於いては, 加工時間及び加工精度と比較して, 加工結果である面品位の定量的な測定と評価が難しいという課題がある. そのため, 特に高品位加工の実際の加工現場に於いては, 本章で提案した測定システムによる評価と実加工実験による評価を併用する機会が多い. そこで本章では, この難題である高品位加工に於いて, 慣性モーメント比, 送り軸とその駆動系の挙動, 及び実加工結果の間の相関関係に着目して考察すると共に, 特に高品位加工の面品位の定量的な測定と評価の手法の提案も試みる.



Note) Servo Tuning Tool FANUC SERVO GUIDE (FANUC CORPORATION)

図 4.1 サーボモータと送り軸の挙動を測定する測定システム（再掲）



$P_n(X_n, Y_n)$: Actual position at each sampling time "n"

$Q_m(X_m, Y_m)$: Command position near P_n

d_n : Path error vector

Assume that a base segment is specified by $ax + by = k$,

The scalar value of $|d_n| = D_n$ is expressed by following formula

$$|d_n| = D_n = (aX_n + bY_n - k) / \sqrt{a^2 + b^2}$$

P'_n : Enlarged point of path error d_n

r : Enlargement ratio

図 4.2 エンコーダ信号に基づく送り軸の挙動の表示方法（二次元）

4.3 マシニングセンタの送り軸の挙動測定の想定動作と想定条件

マシニングセンタを用いた加工が、加工時間を重視するハイサイクル加工と加工精度、加工面品位を重視する高精度高品位加工に大別される事は、第3章で述べた通りである。従って、本章に於いても第3章と同様に、ハイサイクル加工と高精度高品位加工の2例に絞り、機構部の送り軸の挙動を測定して考察を進める。なお、近年高機能携帯電話即ちスマートフォンや、スマートフォンとの通信が可能な所謂ウェアラブル機器の部品に於いて、とりわけ高い加工面品位が求められるケースが増えている。そこで、第3章では、高品位加工の実加工実験の結果に対して特に詳しく分析と考察を行ったが、本章に於いても同様に、高品位加工を実施した際の送り軸の挙動を専用の測定システムで測定した結果に対して、特に詳しく分析と考察を行う。

4.3.1 マシニングセンタによるハイサイクル加工

第3章で述べた通り、ハイサイクル加工の代表例として、自動車、二輪車関連のアルミニウム部品加工が挙げられる。ハイサイクル加工に於いては、一般にワークピース1個当たりに要する加工時間の短縮が重要であり、従ってこの用途のマシニングセンタには、①高速、②高加減速、③高頻度の動作特性が求められ、そしてそのマシニングセンタに搭載されるサーボモータには、①高い最高回転速度、②高い加減速性能、即ち大きな最大トルクと小さな慣性モーメント、③高頻度の動作を実現するための大きな連続定格トルクが求められる。一般に、加工時間の最小化を最優先課題とするハイサイクル加工では、金型加工などと異なり高い加工面品位が求められないので、サーボモータの慣性モーメントに対する要求は比較的シンプルとなる。

4.3.2 マシニングセンタによる高精度高品位加工

同じく第3章で述べた通り、高精度加工の代表例として時計や医療部品、高品位加工の代表例として金型加工や高機能携帯電話、即ちスマートフォンの部品が挙げられる。この用途のマシニングセンタには、④プログラム上で指定された加工点と加工経路からの、実際に動く工作機械の加工点と加工経路の偏差の極小化、即ち高い位置決め精度と軌跡精度を実現する軸送り、⑤滑らかな軸送りが求められ、またサーボモータには、④エンコーダの分解能と分解精度が高い、指令への応答性が高く指令からの偏差が小さい、⑤サーボモータが発生するコギングトルクが小さくコギングトルクを含む外乱に対する抑圧性が高い、などの特性が求められる。第3章と同様に、本章に於いても、④を指令応答性、⑤を外乱抑圧性、④⑤を併せて制御性と定義する。

制御パラメータに関しては、サーボモータ#1, #2, #3 に対してゲイン余裕、位相余裕が同じとなる様にパラメータを調整している。具体的には、サーボモータ#1, #2, #3 を順次小型立形マシニングセンタに搭載して速度ゲインの調整を行う際に、各々でほぼ同じ安定余裕（ゲイン余裕 10dB, 位相余裕 45°）となる様に、各パラメータを設定している。指令応答性と外乱抑圧性に関して付記すれば、近年の制御ではフィードフォワードの設定が支配的なので、サーボモータの慣性モーメントは指令応答性には殆ど影響しない。一方、外乱抑圧性に関してはサーボモータの慣性モーメントは極めて大きく影響する。従って、本章の様にサーボモータの慣性モーメントと位置偏差の変動との関係を論じる場合には、後者即ち外乱抑圧性に特に着目する必要がある。

4.4 マシニングセンタの送り軸の挙動測定の結果

本章では、4.3 節で示したハイサイクル加工と高精度高品位加工の各々に於ける代表的な加工事例について、4.2 節で新たに示した測定システムを活用して送り軸の挙動を測定し考察する。第3章と同様に、本章の測定システムに於いてもその評価指標が必要であり、ハイサイクル加工では、第3章と同様にサイクルタイムがそれに相当する。一方、高精度高品位加工に関しては、本章では、同時2軸送りを行った際の各軸のサーボモータの挙動を、まず時間と位置偏差、即ちサーボモータに対する指令位置と、同時刻における実位置の差の相関として求め、次に2軸分のデータを合成して、位置と位置偏差との関係に変換する。最後に、得られた同時2軸送りの位置偏差曲線と、第3章で表面粗さ計を用いて測定した表面粗さ曲線とを比較する。

4.4.1 ハイサイクル加工に於ける測定結果

ハイサイクル加工用のワークには、第3章と同様に自動車部品のクランクケースを選択した。図4.3に、クランクケースとその固定治具を含むX、Y、Z各軸の慣性モーメントと、3つのグループのサーボモータの慣性モーメントとの比率、即ち慣性モーメント比を示し、また表4.1には、実際にクランクケースの加工プログラムを実行して空運転を行った場合の、送り軸の挙動を測定したデータを元に算出した加工時間を示す。表4.1より、加工時間即ちサイクルタイムはサーボモータ#1、#2、#3の順に短まっている事が分かるが、これは図4.3の慣性モーメント比の大きな順、即ちサーボモータの慣性モーメントの小さい順であり、これは第3章の実加工結果と一致する。4.3.1節で述べた通り、ハイサイクル加工では慣性モーメントの議論は比較的シンプルとなる。

但し、第3章では、単に総加工時間の違いを測定したに留まったが、本章では、この加工プログラム上の、どの部分でどの程度の所要時間の差異が生じているか、などの分析が可能となる。典型的なハイサイクル加工に於ける送り軸の挙動を示す表4.1では、横軸を時間、縦軸を速度としているが、このデータより各軸のサーボモータが頻繁に加減速を繰り返している事が分かる。表4.2に、表4.1の一部の時間軸を拡大した波形を示す。サーボモータの慣性モーメントは、#1、#2、#3の順に小さいので、加減速毎に要する時間も、僅かではあるが#1、#2、#3の順に短い。この加減速時間の差の累積が、1加工サイクルの総加工時間の差異となる。この様に、測定したデータの詳細な分析が可能となる点も、本章で提案する測定システムの長所である。

ハイサイクル加工に慣性モーメントの小さなサーボモータが適している理由として、加減速に要する時間が短い点に加えて、サーボモータが高頻度で加減速を行っても自身が発生する発熱が小さい点がある。サーボモータの主な発熱源としては銅損と鉄損があるが、前者の銅損はサーボモータを加減速させるための電流値の二乗に比例する。頻繁に加減速を行う加工では、慣性モーメントの小さなサーボモータは自身の加減速のために消費する電流が小さく損失も小さいため、

発熱限界の余裕を観測しながら、加減速時定数を小さくする事も可能となる。この様に、サーボモータの発熱による制限も加味して加工1サイクルの挙動を分析し、更に加工時間の短縮を図る考察が可能となる点に於いても、本章で提案する測定システムは有効であると考える。

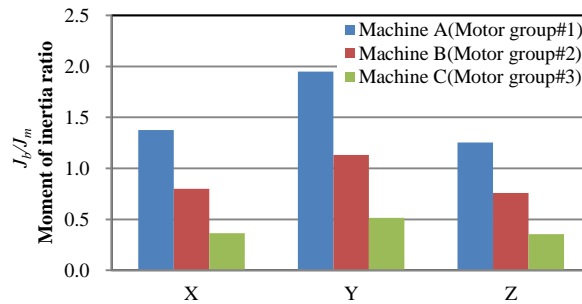


図 4.3 ハイサイクル加工実験に於ける送り軸 3 軸の慣性モーメント比

表 4.1 ハイサイクル加工実験に於ける送り軸の位置と速度

	Motor group #1	Motor group #2	Motor group #3
Position-Time	<p>Total cutting time 1,299s Position 200 mm/div Cutting time 15s/div</p>	<p>Total cutting time 1,314s (+1%) Position 200 mm/div Cutting time 15s/div</p>	<p>Total cutting time 1,374s (+6%) Position 200 mm/div Cutting time 15s/div</p>
Speed-Time	<p>Speed 1000 mm/div Cutting time 15s/div</p>	<p>Speed 1000 mm/div Cutting time 15s/div</p>	<p>Speed 1000 mm/div Cutting time 15s/div</p>

表 4.2 ハイサイクル加工実験に於ける位置と速度の波形の拡大図

Motor group #1	Motor group #2	Motor group #3
<p>Position mm Speed mm/s Time 50ms/div</p>	<p>Position mm Speed mm/s Time 50ms/div</p>	<p>Position mm Speed mm/s Time 50ms/div</p>

4.4.2 高精度高品位加工に於ける測定結果

高精度高品位加工の空運転実験に於いても第3章と同様に、図4.4に示すワークピースと加工パスを用いた。第3章で述べた通り、このワークピースはX軸とZ軸のテーパ角度が 22.5° から 67.5° へと変化するテーパ面を含むため、X軸とZ軸の同時2軸で加工面に直線軌跡を形成する際に、テーパ角度が変化する部分でサーボモータの送り速度が急変し、その直後に加速度、加加速度により機械振動を発生して直線軌跡が崩れ、加工面に筋目となって現れやすい、即ち高精度高品位加工の実加工実験に正に好適と言いえる。これも第3章と同様に、図4.5に、この高精度高品位加工用のワークピースと治具を含めたX, Y, Z各軸の慣性モーメントと、3つのグループのサーボモータの慣性モーメントとの比率、即ち慣性モーメント比を改めて示す。

第3章で使用した高精度高品位加工用のテストプログラムを実行し、4.2節で示した測定システムを活用してマシニングセンタ各軸の時間と位置の関係のデータを取得した。表4.3に、その際のX, Z各軸の動作パターンを示す。表4.4は、同時2軸送りを行った際のX, Z各軸の時間と位置偏差の関係を、また表4.5に、X, Z両軸の位置偏差データを合成して得られた波形を示す。表4.5に於いて、左端の図は図4.4のワークピース形状とX, Z軸の合成位置偏差を重ね合わせたものであり、他の3つの曲線は3つのグループのサーボモータを搭載した場合の位置偏差を比較して示したものである。また表4.6は、表4.5の左端を除く3つの合成位置偏差を表面粗さ曲線と比較しやすくするために、角度を変えて水平方向に展開したものである。

ここで、表4.4と表4.6が、各々どのような分析に適するかを比較する。送り軸の制御性、即ち指令応答性や外乱抑圧性の程度の把握やその支障となる要因の分析には、各軸の位置偏差を独立して観察出来る表4.4が適する。例えば、機械剛性が低い軸やサーボパラメータの調整が十分でない軸を確認したい場合には、各軸毎の挙動の把握が必要となるが、これには表4.4が適する。一方、工作機械で実加工を行った際に送り軸が加工面の精度と面品位に与える影響を把握したい場合には、各軸の挙動を合成して得られた表4.6が適する。表4.4、表4.6のいずれの場合にも、送り軸の位置偏差はサーボモータ#3, #2, #1の順に小さい。これは、図4.5では慣性モーメント比の小さい順であるが、この結果も第3章の実加工結果と一致する事が分かる。

そして、表4.6の結果、即ち専用の測定システムを活用して得られた同時2軸送りの位置偏差曲線は、第3章で測定された表面粗さ曲線と直接比較出来る点に大きな特長がある。即ち、一方は専用の測定システムで得られた送り軸の挙動、一方は実加工実験にて得られた加工精度と加工面品位であるが、共に横軸が位置、縦軸が位置偏差として表現されているため、曲線形状の直接比較が可能となる。これにより、第3章及び本章の主題であるサーボモータの慣性モーメントのマシニングセンタに与える影響の議論を、更に多くの観点から検証する事が可能となる。

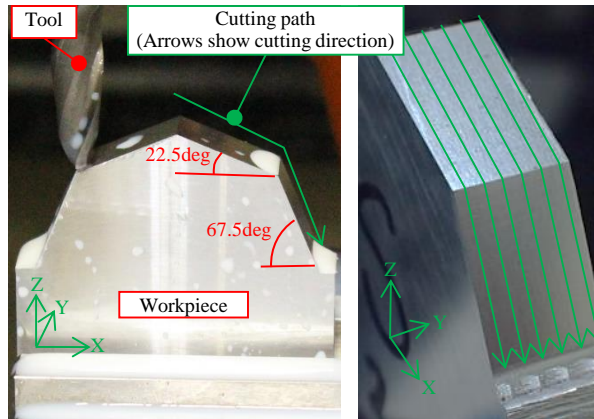


図 4.4 高精度高品位加工実験に使用したワークピースと加工パス

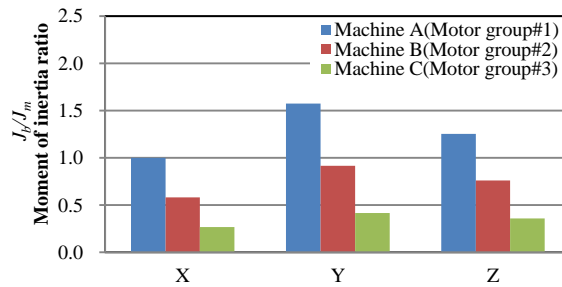


図 4.5 高精度高品位加工実験に於ける送り軸 3 軸の慣性モーメント比

表 4.3 高精度高品位加工実験に於ける X, Z 各軸の動作パターン

Motor group #1	Motor group #2	Motor group #3

表 4.4 高精度高品位加工実験に於ける X, Z 各軸の位置偏差

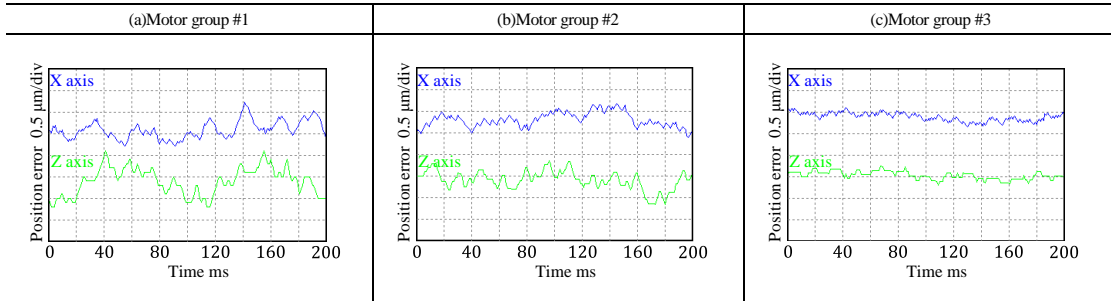


表 4.5 高精度高品位加工実験に於ける X, Z 両軸の位置偏差の合成値

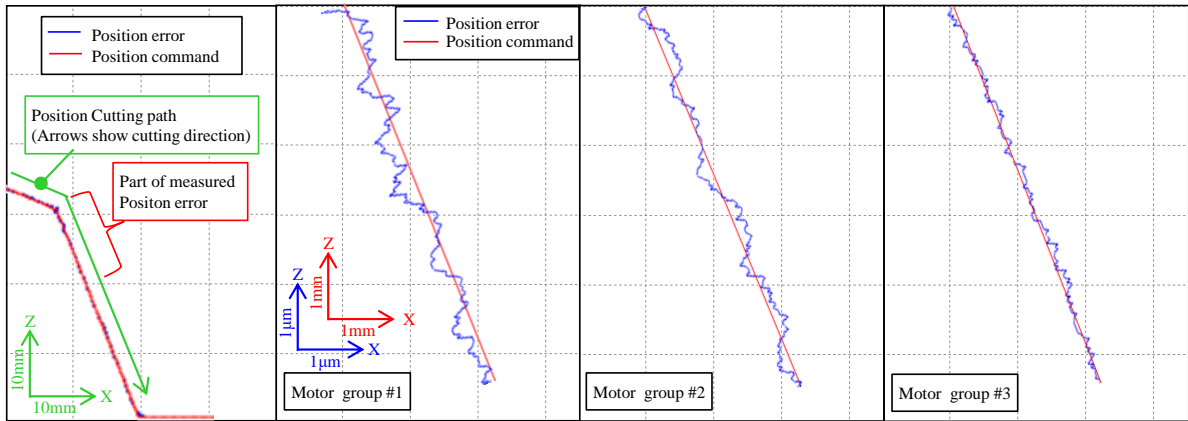
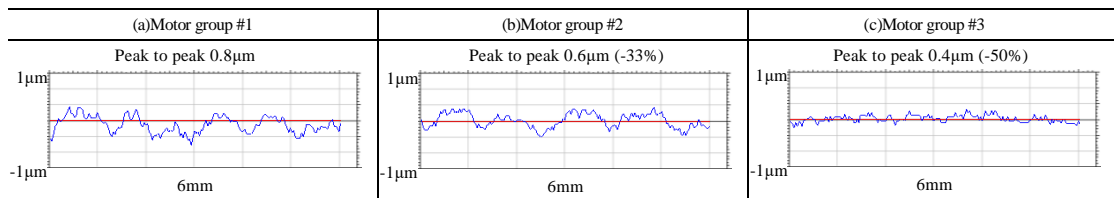


表 4.6 高精度高品位加工実験に於ける X, Z 両軸の位置偏差の合成値



4.4.3 実加工実験と測定システムによる測定結果の二次元表示による比較

第3章の表面粗さ計による測定値 Ra, Rz と表面粗さ曲線を, 表 4.7 中段に, 本章の測定システムを活用して得られた位置偏差を表す曲線を, 表 4.7 下段に示す. 表 4.7 の中段と下段に示す両曲線を比較すると, サーボモータの慣性モーメントの違いが与える影響の大小の傾向は両者で一致するが, その曲線の形状自体は両者で若干異なる事が分かる. 具体的に言えば, 本章の測定システムにより得られた波形に於いて, 慣性モーメントの違いが与える影響がより顕著に表れている事が分かる. これは, 実加工実験では加工工具の切れ味などサーボモータ以外の要素が加工面に影響するためである. 従って, サーボモータの慣性モーメントの違いが加工面品位に与える影響を選択的に把握したい場合などには, 本章の測定システムによる検証が効果的である.

表 4.7 中段の表面粗さ曲線と下段の 2 軸分を合成した位置偏差曲線を, 更に比較して分析してみる. 表面粗さ曲線で観測される筋目の周期は約 0.2mm と約 1.1mm であるが, 第3章で論じた通り, 約 0.2mm 周期の成分は加工工具のカッターマークであり, そして約 1.1mm 周期の成分は加工方向の変化に伴って生じた各軸での速度変化により機械振動が発生し, その振動が引き起こした筋目と考えられる. 一方, 2 軸分を合成した位置偏差曲線では, 約 1.1mm 周期の成分のみが観測され, 加工工具による約 0.2mm 周期の成分は当然ながら観測されない. また, 3 グループのサーボモータの違いによる約 1.1mm 周期の成分の大きさの違いは, 表面粗さ計の Rz で約-13%, -22%に対し, 位置偏差曲線の最大振幅で約-33%, -50%と, より顕著となっている.

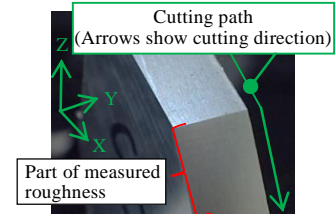
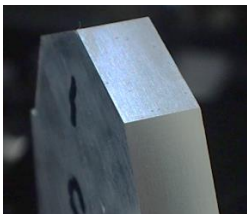
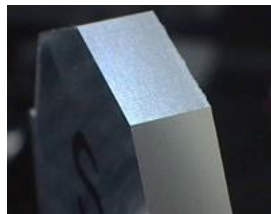
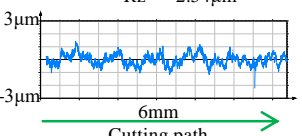
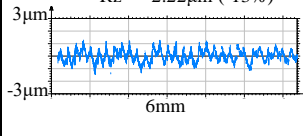
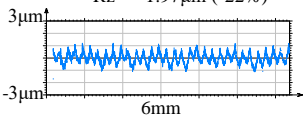
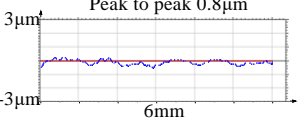
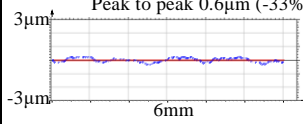
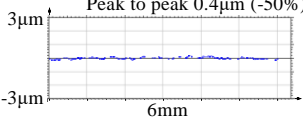
2 軸分を合成した位置偏差曲線では, 加工工具による成分が全く観測されない一方, その他の周期の成分が僅かながら観測される. 例えば, サーボモータが持つトルクリップルなどもこれに含まれるが, この様なサーボモータ固有の成分の分析には, 表 4.6, 表 4.7 の位置偏差曲線では, 2 軸の成分が合成されているため分析が難しく, むしろ X, Z 軸各々の挙動が独立して示される表 4.4 に着目した方が効率的である. 即ち, 位置偏差曲線の成分分析の目的に応じて各軸の位置偏差曲線と合成位置偏差曲線から適した方を選択出来る点も, 本測定システムの長所である.

実験に使用した小型立形マシニングセンタの X, Z 軸のボールネジピッチは共に 12mm/rev であり, 高精度高品位加工実験に於ける切削速度は 2000mm/min である. 図 4.4 のワークピースの形状から, 加工工具の進行方向に対する X, Z 軸の進行方向の角度は各々 67.5° , 22.5° である. 従って, X, Z 軸の回転角速度は, X 軸で $2000 / 60 \times \cos(67.5^\circ) / 12 = 1.06 \text{ rev/s}$, Z 軸で $2000 / 60 \times \cos(22.5^\circ) / 12 = 2.57 \text{ rev/s}$ となる. ここで, 表 4.4 の X, Z 軸の位置偏差を分析すると, 例えばサーボモータ#2 の波形で, X 軸で約 5 回, Y 軸で約 12 回の周期的うねりが観測される. 横軸はフルスケールで 200ms なので, 周波数に換算すると X 軸で 25Hz, Y 軸で 60Hz となる. 更にこれをサーボモータ 1 回転当たりのうねりに換算すると, $25/1.06 = 23.6$, $60/2.57 = 23.3$ と

なる。今回使用したサーボモータは全て 8 極構造であり、かつ 3 相電流制御駆動のため、1 回転 24 回のリップル成分を内在する事が分かっているが、上述のうねりはこの値と一致する。

3.4.2 節で考察した 1.1mm 周期の成分は、表 4.7 の中段の表面粗さの測定結果からも読み取れるが、この波形は X 軸と Z 軸の挙動の合成波形なので、上述のサーボモータのトルクリップルに起因する成分などは読み取りづらい。一方、表 4.4 に示す様な各軸毎の位置偏差曲線の場合には、X 軸と Z 軸の挙動を分離して分析出来るため、送り軸の回転に起因するリップルの成分の特定が容易である。この様に、各軸の筋目やうねりの成分の把握と分析が可能となる点も、本章で提案した測定システムの活用により得られる大きな効果の一つである。工作機械の共振周波数に起因する成分とサーボモータの回転速度に比例する成分とを分離する事が出来れば、筋目やうねりの発生要因の特定も可能となり、加工面粗さの改善への論理的アプローチにつながる。

表 4.7 加工面粗さと加工面品位の測定結果の比較 (2D)

Motor group	#1	#2	#3
Moment of rotor inertia	$0.68 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	$1.17 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	$2.57 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
Total moment of inertia	$1.36 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	$1.85 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	$3.25 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
Moment of inertia ratio	1.01	0.58	0.27
Photograph of machining surface			
Line roughness quoted from Tab 3.11	Ra 0.37 μm Rz 2.54 μm 	Ra 0.36 μm (-3%) Rz 2.22 μm (-13%) 	Ra 0.31 μm (-16%) Rz 1.97 μm (-22%) 
Position Error	Peak to peak 0.8 μm 	Peak to peak 0.6 μm (-33%) 	Peak to peak 0.4 μm (-50%) 

4.4.4 実加工実験と測定システムによる測定結果の三次元表示による比較

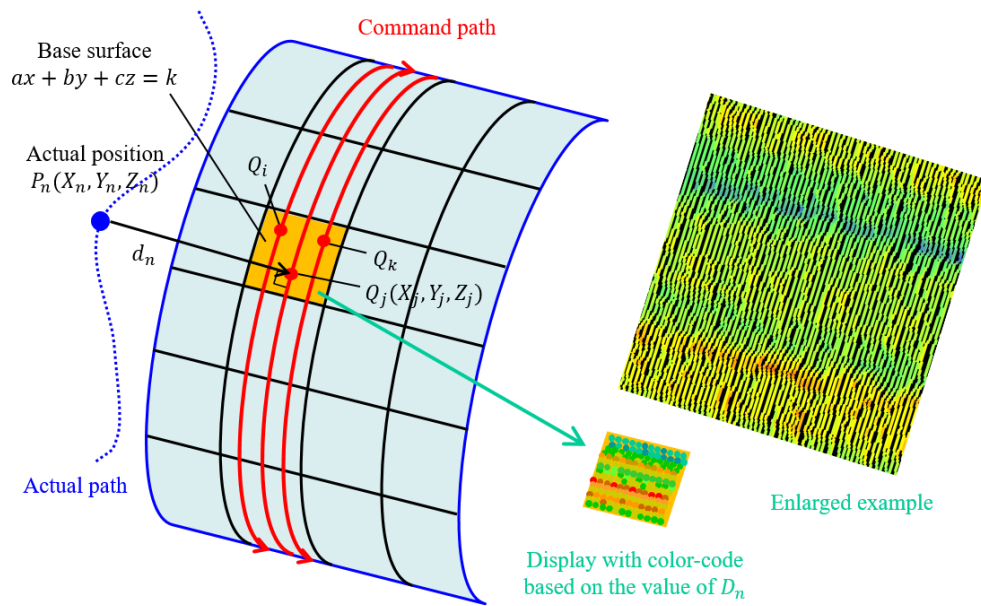
以上の具体的な事例研究から明らかな様に、本章の測定システムに於いては、サーボモータの慣性モーメント比の違いが実加工結果に与える影響を、より短時間で効率良く把握出来るという特長に加えて、実加工実験による場合と比較して、サーボモータと送り軸の様々な挙動を、より選択的、集中的に観測出来るという大きな特長もある。特に、サーボモータ以外の要素が大きく影響する高品位加工に於いて、サーボモータの与える影響のみを抽出出来るという点で、本章で提案した専用の測定システムは正に効果的な評価手法であると考えられる。

更に、本章の測定システムで得られた送り軸の各軸の挙動を示す位置偏差データは、図 4.6 に示す計算処理により、ワークピース上の各位置に於ける位置偏差を色別の三次元表示に変換する事も可能である。本章では、このデータ処理を実際に行った。第 3 章で得た非接触三次元表面粗さ・形状測定機 (Opt-scope, 東京精密) による三次元可視化画像と、上述の計算処理で得られた位置偏差を色別に表示した三次元表示を、表 4.8 の中段下段に並べて示す。色別の表示では定量比較は難しいが、加工面品位の直観的な比較という観点では有効である事が分かる。

ここで、図 4.6 の計算処理方法を説明する。図 4.2 では、加工プログラムの位置指令とサーボモータの実際の位置との位置偏差を二次元で図示する方法を示したが、図 4.6 はこれを三次元に応用した図である。図 4.6 の左の図で、 $P_n(X_n, Y_n, Z_n)$ はサーボモータの位置、一方 $Q_j(X_j, Y_j, Z_j)$ は P_n 近傍の指令位置である。 (a, b, c) を大きさが 1 の単位ベクトルとして、複数の加工パス上の指令位置 $Q_i, Q_j, Q_k \dots$ を含んだ平面をベース平面 $ax + by + cz = k$ と定義すると、 P_n からその平面に垂線を降ろしたベクトル d_n の長さ D_n は、 $D_n = (aX_n + bY_n + cZ_n - k) / \sqrt{(a^2 + b^2 + c^2)}$ となる。

4.2.2 節で議論した二次元の場合と同様に、この D_n をサーボモータの位置と指令位置との位置偏差と定義するが、この位置偏差をそのまま図示しても絶対位置が微小であるため、やはり目視による観測と分析が難しい。そこで図 4.6 では、図 4.2 と同様に、左の図の位置偏差を拡大し、かつ位置偏差の絶対値を色別に表示した。またその配色は、非接触三次元表面粗さ・形状測定機による表面性状の三次元可視化画像と比較可能となる様に調整した。即ち、定性的ではあるが、三次元可視化画像と本章の測定システムによる三次元表示との直接比較が可能となった。

表 4.8 中段の実加工結果の三次元可視化画像に於いて、その横に示したカラーバーから分かる通り、基準位置は緑色であり、その基準位置から凸となる部分は赤色で、凹となる部分は青色で示されている。本章の測定システムにより得られた位置偏差の三次元表示に於いても、使用する色は三次元可視化画像のカラーバーに準じる様に計算機上で工夫している。そして、この 2 つのデータに於いても、カラーで示された凹凸がサーボモータ #3, #2, #1 の順に小さく、その凹凸の大きさが表 4.8 下段でより顕著である点が、4.4.3 節までの分析結果と定性的に一致する。



$P_n(X_n, Y_n, Z_n)$: Actual position at each sampling time “n”
 $Q_j(X_j, Y_j, Z_j)$: Command position near P_n
 d_n : Path error vector
 Assume that a base surface is specified by $ax + by + cz = k$,
 The scalar value of $|d_n| = D_n$ is expressed by following formula

$$|d_n| = D_n = (aX_n + bY_n + cZ_n - k) / \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$$

図 4.6 エンコーダ信号に基づく送り軸の挙動の表示方法（三次元）

表 4.8 加工面粗さと加工面品位の測定結果の比較（3D）

Motor group	#1	#2	#3
Photograph of machining surface			
Surface roughness quoted from Tab 3.11			
Position error (3D)			

4.5 マシニングセンタの送り軸の挙動測定の結果に対する考察

慣性モーメントの異なる3つのグループのサーボモータを、小型立形マシニングセンタの送り軸に順次搭載し、各々に於いて、ハイサイクル加工と高精度高品位加工のプログラムを実行して空運転を行い、その際の機構部の送り軸の挙動を、本章で準備した測定システムを活用して測定した。その結果、ハイサイクル加工と高精度高品位加工の各々に於いて、本章の測定システムを活用して測定した結果は第3章の考察結果と一致し、第3章の実加工実験との間に整合性がある事が明らかとなった。以下に、それらの考察の結果を順を追って示す。

(1)ハイサイクル加工と高品位加工に関する考察

ハイサイクル加工に於いては、サーボモータの慣性モーメントはマシニングセンタの機構部の送り軸を十分に駆動出来る条件下で出来るだけ小さい方が加工時間短縮に寄与すると考えられているが、本章で提案した測定システムを活用した測定結果はこれを実証している。一方、高精度高品位加工に於いては、機構部の送り軸の慣性モーメントとサーボモータの慣性モーメントとの比、即ち慣性モーメント比が出来るだけ小さい方が表面粗さと面品位の向上に寄与すると考えられているが、こちらも本章で提案した測定システムを活用した一連の測定結果はこれを実証している。そして、本章の実験と考察の結果は、第2章で実施した考察、第3章で実施した考察とも整合し、かつ特に第3章をより多くの測定データで裏付けたと考えられる。

(2)送り軸の挙動を測定する測定システムに関する考察

ハイサイクル加工の実加工実験に於いては、加工時間の結果が本章と第3章とで一致するが、使用した加工プログラムが同一であるため、一致は当然の結果である。但し、加工プログラムのどの部分でどの程度の差が生じているか、加減速時定数を小さくして加工時間を短縮出来ないかなどより詳細な分析が可能となる点が、本章で提案した測定システムの持つ長所である事が確認された。一方、高精度高品位加工の実加工実験に於いては、第3章の表面粗さ曲線と本章の位置偏差曲線との間で定性的な傾向は一致し、加えて本章の測定システムでは、第3章で観測されたカッターマークなどの影響が含まれず、サーボモータの慣性モーメントの違いによる影響の差が顕著に表れるため、サーボモータとサーボ制御に絞った分析が可能となる事が確認された。

高精度高品位加工に於いて、特に高品位加工の加工面品位に対しては、サーボモータの与える影響が大きいですが、実際には他にもマシニングセンタの機械剛性、加工治具、加工工具、加工条件など多くの要素が関係するため、実加工結果の分析のみではサーボモータの与える影響の分析が難しい。従って、サーボモータの慣性モーメントが加工面品位に与える影響に絞って分析を行いたい場合には、本章の測定システムの活用が効果的である。更に、実加工実験に比べて短時間で極めて多くのデータを収集出来る点も、本章で活用した測定システムの長所である。特に、加工

面品位の向上を図る場合は、加工工具や加工条件を変えてテスト加工を繰り返す事が多いので、本章で活用した測定システムはテスト加工の回数の削減という点に於いても効果的である。

(3)三次元表面性状データの生成による加工面品位の可視化に関する考察

更に、本章の測定システムでは、加工プログラムと測定データから両者の位置偏差を算出し、またその位置偏差を二次元の曲線データ或いは三次元の表面性状データとして可視化する方法を提案した。特に後者、即ち三次元の表面性状データの曲面と色分けによる可視化により、非接触三次元表面粗さ・形状測定機による表面性状の可視化画像との直接比較が可能となった。これは定量的分析には十分でないものの、加工面品位の定性的な評価手法としては有効である。また、測定データは定量的数値であるため、更に様々な加工を施して有用なデータを生成する事も可能である。本章で提案した三次元の可視化データの生成方法は、依然目視による官能検査が主流である高品位加工の加工面品位に関して、定量的評価手法の確立の第一歩となると考える。

4.6 結言

本章では、まずマシニングセンタの機構部の送り軸の挙動を測定する、専用の測定システムを準備した。次に、第3章で用いた手法に準じ、慣性モーメントの異なる3つのグループのサーボモータを順次マシニングセンタに搭載して加工プログラムを実行して空運転を行い、専用の測定システムを活用して加工時間と加工精度、加工面品位を各々測定した。そして、本章の測定システムによる測定結果と、第2章の考察結果、第3章の実加工実験結果とを比較し、考察を行った結果、両者の間に整合性がある事が分かり、第2章、第3章の結果が再検証された。

また、第3章で、マシニングセンタが加減速性能を重視する場合、指令応答性と外乱抑圧性、即ち制御性を重視する場合の各々に於いて、一般に知られているサーボモータの選定の考え方の妥当性を検証したが、機構部の送り軸の挙動に着目した本章に於いても、その妥当性が裏付けられた。第2章では加工現場で稼働するマシニングセンタを調査分析し、第3章では実加工実験を実施し、そして本章でマシニングセンタの機構部の送り軸の挙動を測定したが、いずれの場合に於いても、慣性モーメント比に着目したサーボモータの選定の考え方は一致した。

次に、サーボモータの慣性モーメントがマシニングセンタの加工性能に与える影響の検証手法に関して、本章で示した機構部の送り軸の挙動の測定と第3章で示した実加工実験とを比較し、両者の長所と短所を論じた。本章の評価手法は、サーボモータの与える影響のみを短時間でより多く収集出来る点で優れるが、その一方で、工作機械の最終的な加工性能の指標にはなり得ないという課題もある。従って、サーボモータの与える影響を含めた工作機械の性能を評価する場合には、この2つの手法を目的に応じて効果的、効率的に組合せる事が重要となる。

また、本章の実験結果の検証の過程で、その測定評価の手法が未だ確立されておらず、依然として目視による官能検査が主流である高品位加工の加工面品位に関して、新たな測定評価手法を考案した。具体的には、送り軸の挙動を測定する測定システムで得られた位置偏差データを元に計算処理を行い、色別の三次元表示に変換する事で、非接触三次元表面粗さ・形状測定機による表面性状の三次元可視化画像との比較を可能とした。色別表示では定量的分析は難しいものの、加工面品位の定性的な比較評価としては有効であり、定量的評価手法確立の第一歩となる。

なお、第3章に於いても本章に於いても、サーボモータとマシニングセンタに関する検証は、ハイサイクル加工、高精度高品位加工の各々で1種類のワークピースのみを使用して実施した。しかし、特に高品位加工に関して言えば、第3章と本章で選択したワークピースの形状が検証に最適であるとはいえ、実際に加工対象となる金型や部品の形状は様々である。従って、第3章と本章の考察をより確かなものとするためには、出来るだけ多くの種類のテーパ形状や曲面形状の実加工を実施する事が望ましい。次章即ち第5章では、この課題に具体的に取り組む。

第5章 慣性モーメント比がマシニングセンタの高品位加工に与える影響の検証とその総括

5.1 緒言

5.2 実在するワークピースを使用した高品位加工の実加工実験の手法

5.2.1 実在するワークピースを使用した高品位加工の実加工実験の概要

5.2.2 高品位加工の実加工実験に使用するワークピース群

5.2.3 各ワークピースの実加工実験に使用する治具と工具

5.2.4 各ワークピースの実加工実験の加工条件と評価方法

5.3 実在するワークピースを使用した高品位加工の実加工実験の結果

5.3.1 各ワークピースの高品位加工の実加工実験の結果

5.3.2 各ワークピース間に見られる実加工結果の相違点

5.4 実在するワークピースを使用した高品位加工の実加工実験の考察

5.4.1 本章のワークピース群と第3章, 第4章のワークピースとの関係の考察

5.4.2 本章のワークピース群と加工面品位との関係の考察

5.4.3 サーボモータの挙動を測定する測定システムの有用性の考察

5.5 高品位加工を実現するための諸考察

5.5.1 高精度加工と高品位加工の相違点

5.5.2 高品位加工に適したサーボモータ

5.5.3 高品位加工に影響を与える要素の全体像

5.5.4 高品位加工の加工結果の定量的評価指標

5.6 高品位加工に影響を与える要素の全体像の更なる考察

5.7 高品位加工の加工結果の定量的評価指標の更なる考察

5.8 結言

第5章 慣性モーメント比がマシニングセンタの高品位加工に与える影響の検証とその総括

5.1 緒言

本研究の主題，即ちサーボモータの慣性モーメントの違いがマシニングセンタの加工性能に与える影響の研究に於いて，第3章では実加工実験を実施し，続く第4章では専用の測定システムを準備して機構部の送り軸の挙動を測定して検証した．第4章で得た結論により，第3章の結論，即ち慣性モーメントの比較的小さいサーボモータは加工時間の短縮に寄与し慣性モーメントの比較的大きいサーボモータは加工精度と加工面品位の向上に寄与するとの結論を，実加工実験だけでなく機構部の送り軸の挙動の観点からも裏付ける事が出来た．

しかし，第3章，第4章の加工性能の比較検証に於いて，ハイサイクル加工では実在する自動車のクランクケースを使用した，高精度高品位加工では，X軸とZ軸の角度が 22.5° から 67.5° へと変化するテーパ面を含むテスト加工用のワークピースを使用しており，実在する高精度金型や，高機能携帯電話に代表される最新の電子機器の加工部品，或いはそれに近いワークピースを使用していない．上述のテスト加工用のワークピースは，サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比の影響を反映しやすい形状だが，第3章，第4章で考察した結果をより確実に裏付けるためには，実在する，或いはそれに近い複数のワークピースを使用して，同様の実験，測定，考察を行う必要があると考える．

そこで本章では，最近の高品位加工を代表する部品，或いはそれを模したワークピースを準備して，第3章，第4章と同様の手法により実加工実験を実施する．具体的には，高精度金型用銅電極，ペットボトル用金型，高機能携帯電話のケースを模した部品，高級腕時計のベゼルを模した部品の合計4種類のワークピースを準備する．これらのワークピースを使用して，第3章，第4章と同様の手法で順次実加工実験を実施し，得られた加工面の面品位を評価すると共に，その際の送り軸とその駆動系の挙動を測定する．これら複数の実加工実験により，第3章，第4章にて実施したサーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比の高品位加工に与える影響に関する考察の結果を更に裏付ける．

但し，実在する，或いはそれを模したワークピースに於いて，高品位が必要な加工面は，テスト加工用のワークピースと異なり，必ずしも単純な平面ではなく，時に複雑な曲面形状である．そのために，高品位加工の実施だけでなく，測定機器による加工面品位の測定評価にも制約と困難が伴う．また，各ワークピースの高品位加工に最適な工具の選択，例えば，ステンレス系の材料ならPCBボールエンドミル，アルミ材ならヘール工具といった，個別の準備が必要である．更に，ワークピースの種類によっては仕上げ加工に長時間を要するが，

その際には工作機械の熱変位が加工結果に与える影響も考慮する必要がある。本章の内容の実施に際しては、以上の様な様々な課題、難題の克服が必須となる。

本章で、最近の高品位加工を代表する部品、或いはそれを模したワークピースを使用して第3章、第4章と同様の手法で実加工実験を実施する事により、本研究で計画した、サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関する研究の、簡単な力学モデルによる考察、実際に加工現場で稼働するマシニングセンタの調査、及び一連の実加工実験と測定が一通り終了する。そこで、本章の5.5節以降では、近年その市場が急速に拡大している高品位加工に焦点を絞り、高精度加工と高品位加工との相違点、高品位加工に適したサーボモータ、高品位加工に影響を与える要素の全体像、高品位加工の加工結果の定量的評価指標などについて整理し、最後にこの分野に於ける今後の必須重要課題を提示する。

5.2 実在するワークピースを使用した高品位加工の実加工実験の手法

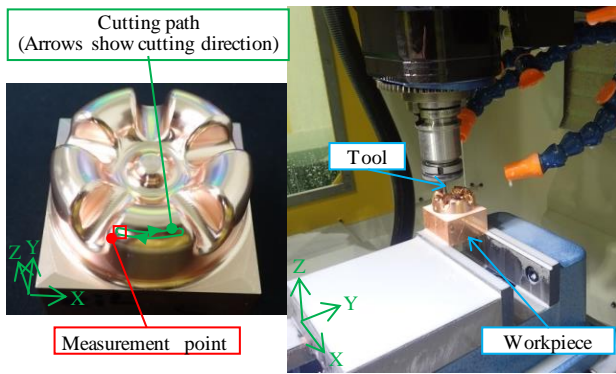
第3章、第4章では、慣性モーメント比の違いがマシニングセンタの実加工及び送り軸の挙動に与える影響を考察した。しかし、これらの考察の中で、高精度高品位加工に関しては、X軸とZ軸の角度が 22.5° から 67.5° へと変化するテーパ面を含む、テスト加工用のワークピースを使用しており、この分野の実情を十分に反映したとは言い難い。そこで本章では、実在する高精度金型、高機能携帯電話に代表される最新の電子機器の加工部品、或いはそれらを模したワークピースを複数準備して、第3章、第4章と同様の手法で実加工実験を実施する。これらの実加工実験を通して、第3章、第4章で得られた慣性モーメント比の高品位加工に与える影響の考察を、複数のワークピースの測定結果により更に裏付ける。

5.2.1 実在するワークピースを使用した高品位加工の実加工実験の概要

第3章、第4章と同様に、3つのグループのサーボモータとマシニングセンタを使用して、高品位加工に関する実加工実験を実施する。実加工実験の方法や加工結果の測定方法、専用の測定システムを使用した機構部の送り軸の挙動の測定方法などは、第3章、第4章と同様である。但し、ワークピースに関しては、第3章、第4章で使用したテスト加工用のワークピースに加えて、5.2.2節以降に於いて紹介する、最近の高品位加工市場で実際に加工されているワークピース、或いはそれを模した複数のワークピースを使用する。当然ながら、実在するワークピースの形状は実に様々なので、第3章、第4章のテスト加工用のワークピースの場合と比較して、実加工実験も加工結果の測定もその難易度は格段に高くなる。

5.2.2 高品位加工の実加工実験に使用するワークピース群

本章の実加工実験用として準備した、実在する、或いはそれを模した高品位加工のワークピースを、図5.1～図5.4に示す。具体的には、高精度金型用銅電極、ペットボトル胴体部の樹脂金型、高機能携帯電話のケースを模した部品、高級腕時計のベゼルを模した部品の合計4種類であり、いずれもその主要部位には筋目のなさや光沢の均一さ、即ち高い加工面品位が必須とされるワークピースである。これらのワークピースに対して高品位加工を行った際に着目すべき加工箇所と評価ポイントを、表5.1に一覧表として示す。表5.1の4種類のワークピースの中でも、とりわけ高機能携帯電話のケースの高品位加工は、最近の市場拡大の速度が目覚ましく、高品位加工に於いて新たに注目される分野となっている。図5.1～図5.4及び表5.1の各図に於いて、各々赤枠で囲った部分、赤い矢印で示した部分が、本章の実加工実験で加工面品位を測定した部位であり、また緑字で示した部分が加工パスである。



5.1 実在する高品位加工のワークピース (銅電極)

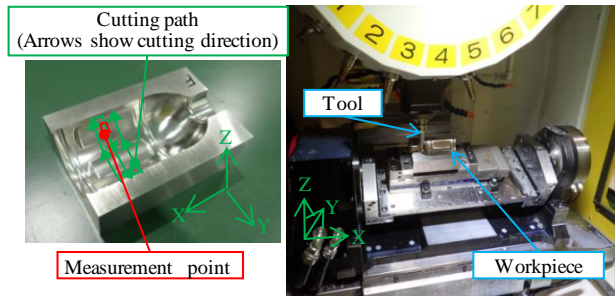


図 5.2 実在する高品位加工のワークピース (ペットボトル用金型)

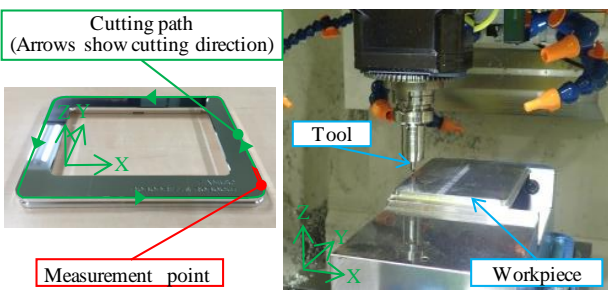


図 5.3 実在する高品位加工のワークピース (高機能携帯電話のケース)

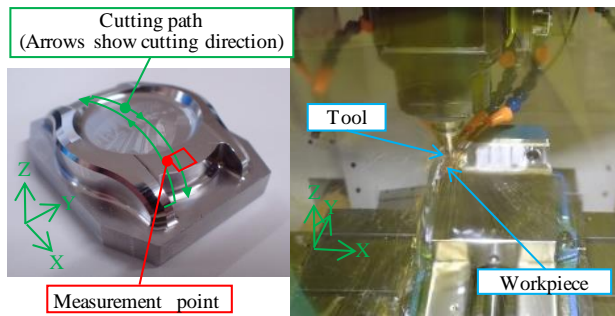


図 5.4 実在する高品位加工のワークピース (高級腕時計のベゼル)

表 5.1 高品位加工の評価時に着目する加工箇所と評価ポイント

<p>Cutting path (Arrows show cutting direction)</p> <p>Measurement point</p>	<p>Measurement point</p> <p>Cutting path (Arrows show cutting direction)</p>	<p>Measurement point</p> <p>Cutting path (Arrows show cutting direction)</p>	<p>Measurement point</p> <p>Cutting path (Arrows show cutting direction)</p>
a) Copper electrode	b) Plastics mold for PET bottles	c) Mobile phone case	d) Luxury watch bezel

5.2.3 各ワークピースの実加工実験に使用する治具と工具

第3章、第4章では、高品位加工の実加工実験を実施するにあたり、ワークピースをマシンニングセンタに固定する治具と、その加工に最適な加工工具を準備した。本章でも同様に、各々のワークピースの加工に最適な固定治具と加工工具の準備は不可欠である。本章で準備する各ワークピースと固定治具を図5.1～図5.4に、図5.1～図5.4に於ける各ワークピースと固定治具を含むX、Y、Z各軸の総慣性モーメントと慣性モーメント比を表5.2、表5.3に示す。そして、各々の加工に最適とされる加工工具を、表5.4に示す。表5.3より、4種類のワークピースの全てに於いて、慣性モーメント比が比較的小さい事が読み取れるが、加工面品位を重視する高品位加工では、小さ目の慣性モーメント比は一般的である。

5.2.4 各ワークピースの実加工実験の加工条件と評価方法

図5.1～図5.4に示したワークピースを使用して順次実加工実験を実施する際の、具体的な加工条件を、表5.4の右側に示す。表5.4では、ワークピースの材質は、銅、アルミニウム、ステンレスの3種類であり、各加工条件はそれらの材質に対して一般的に使用されるものである。また、加工結果の評価方法は、第3章、第4章で実施した内容と同一とする。但し、図5.1～図5.4の各ワークピースに於いては、第3章、第4章のテスト加工用のワークピースと異なり、表面粗さ計による測定が可能な直線部分が殆どない。そこで、非接触三次元表面粗さ・形状測定機（Opt-scope、東京精密）で得た測定データを元に、表面粗さ相当のデータを算出し、これをもって表面粗さ計による測定結果の代替手段とする。

また第3章、第4章では、ワークピースの加工面の中で、送り軸の制御が難しく、従って筋目が出やすいコーナ部を測定評価の対象としたが、本章の4種類のワークピースの加工面に於いても、やはり送り軸の制御が難しく従って筋目が出やすい、かつ見た目の滑らかさが要求される部位を測定評価の対象とする。実在する高品位加工のワークピースに於いては、加工面が必ずしも単純な平面形状でなく、そのために加工面の測定評価も簡単でない場合が多い。実際に、自動車のプレス金型やIT機器の樹脂金型は、単純な平面形状だけでは構成されていないため、通常 of 測定機器による評価が簡単ではない。高品位加工の面品位の評価手法として今なお目視検査が主流である一因は、この測定評価の難しさにもある。

表 5.2 高品位加工実験に於ける送り軸 3 軸の総慣性モーメント ($J_b + J_m$)

Work piece	Axis								
	X			Y			Z		
	#1	#2	#3	#1	#2	#3	#1	#2	#3
Copper electrode	1.62	2.11	3.51	2.01	2.50	3.90	1.69	2.18	3.58
Plastics mold for PET bottles	2.34	2.83	4.23	2.73	3.22	4.62	1.69	2.18	3.58
Mobile phone case	1.62	2.11	3.51	2.01	2.50	3.90	1.69	2.18	3.58
Luxury watch bezel	1.62	2.11	3.51	2.01	2.50	3.90	1.69	2.18	3.58

$\times 10^3 \text{kg}\cdot\text{m}^2$

表 5.3 高品位加工実験に於ける送り軸 3 軸の慣性モーメント比 (J_b/J_m)

Work piece	Axis								
	X			Y			Z		
	#1	#2	#3	#1	#2	#3	#1	#2	#3
Copper electrode	2.38	1.80	1.36	2.95	2.13	1.52	2.25	1.76	1.36
Plastics mold for PET bottles	3.45	2.42	1.65	4.02	2.76	1.80	2.25	1.76	1.36
Mobile phone case	2.38	1.80	1.36	2.95	2.13	1.52	2.25	1.76	1.36
Luxury watch bezel	2.38	1.80	1.36	2.95	2.13	1.52	2.25	1.76	1.36

表 5.4 高品位加工実験に於けるワークピース毎の加工条件

Copper electrode	Work piece material : Tough-Pitch Copper Work piece mass (including fixtures) : 100kg Cutting type : Milling Tool : R2 Ball end mill Cutting Fluid : FGE57 (Water-base) Spindle rotation speed : 5,000min ⁻¹ Rapid traverse feed rate : 350mm/min
Plastics mold or PET bottles	Work piece material : Specialized stainless steel (STAVAX) Work piece mass (including fixtures) : 300kg Cutting type : Milling Tool : R0.75 Ball end mill Cutting Fluid : rhenus EP22S (Oil-base) Spindle rotation speed : 20,000min ⁻¹ Rapid traverse feed rate : 810mm/min
Mobile phone case	Work piece material : Aluminum Work piece mass (including fixtures) : 100kg Cutting type : Hale Tool : MCD Hale tool Cutting Fluid : rhenus EP22S (Oil-base) Rapid traverse feed rate : 8,000mm/min
Luxury watch bezel	Work piece material : Specialized stainless steel (STAVAX) Work piece mass (including fixtures) : 100kg Cutting type : Milling Tool:R1 PCD Ball end mill Cutting Fluid : rhenus EP22S (Oil-base) Spindle rotation speed : 10,000min ⁻¹ Rapid traverse feed rate : 100mm/min

5.3 実在するワークピースを使用した高品位加工の実加工実験の結果

第3章、第4章と同様に、慣性モーメントの異なる3グループのサーボモータを順次小型立形マシニングセンタに取り付けて実加工実験を行った。但し、本章では第3章、第4章のテスト加工用のワークピースの代わりに、5.2節で紹介した、実在する、或いはそれを模した4種類のワークピースを使用した。また、加工面品位の評価方法も基本的に第3章、第4章と同様に、表面粗さ計と非接触三次元表面粗さ・形状測定機 Opt-scope, そして専用の測定システムを活用して実施した。但し、本章のワークピースはいずれも単純形状ではなく、従って測定したい箇所が表面粗さ計では測定出来ないため、非接触三次元表面粗さ・形状測定機によるデータからX軸方向の表面粗さのデータを算出して代替手段としている。

5.3.1 各ワークピースの高品位加工の実加工実験の結果

図5.1～図5.4に示した各ワークピースを使用して、慣性モーメントの異なる3グループのサーボモータを順次小型立形マシニングセンタに取り付けて実施した、一連の高品位加工の実加工実験の結果を、各々表5.5～表5.8に示す。4種類の表の、中段より下段に向かって、①表面粗さ曲線、②送り軸の挙動の二次元表示、③加工面の三次元可視化画像、④送り軸の挙動の三次元表示を列挙している。ここで、加工面の測定①③は第3章で、送り軸の挙動の測定②④は第4章で考案した表示方法と、基本的に同一である。なお、④は加工点に於ける位置偏差を示すが、表5.5の様に、加工工具の進行方向に対して垂直方向の送り、所謂ピックフィードが大きな加工プログラムの場合には、表示された線と線との間は粗くなる。

ここで、5.2.2節の最後に述べた様に、4種類のワークピースに於ける測定箇所は、制御が難しく加工面に筋目が出やすい、かつ見た目の滑らかさが要求される部位とした。具体的に言えば、図5.1～図5.4で赤い枠で囲った部位が測定箇所である。図5.1、図5.4で赤い枠で囲った部位では、加工工具の進行方向が反転する、即ち送り軸の回転方向が反転するため、送り軸の制御が難しい。また図5.2、図5.3で、赤い枠で囲った部位では、第3章、第4章の場合と同じく、送り軸の送り速度が急変するため、やはり送り軸の制御が難しい。

表5.5～表5.8の測定結果①②③④を比較すると、全てのワークピースに於いて程度の違いこそあれ、加工面に見られる凹凸と筋目の深さはモータグループ#3、#2、#1の順に小さく、#3で加工面が最も良好である事が分かる。これは、全てのワークピースに於いて、慣性モーメントの大きいサーボモータを搭載した場合、即ち慣性モーメント比が小さい場合に、加工面がより均一で筋目がより小さい事を意味する、即ち、本章のこれらの実加工実験により、高品位加工に関する第3章、第4章の実験の結果と考察の妥当性が更に裏付けられた。

5.3.2 各ワークピース間に見られる実加工結果の相違点

本章の主題である慣性モーメント比と高品位加工の加工面品位との相関に関しては、上述の通り、各ワークピース間でその傾向は概ね一致する。しかし、慣性モーメント比の違いが加工面品位に与える影響の大きさは、各ワークピース間で必ずしも同一ではない。実際に、表 5.5～表 5.8 より、慣性モーメント比の加工面に与える影響の大きさが、各ワークピースの種類や形状に応じて異なる事が分かる。これは、各ワークピースを実加工する際に、制御性、即ち指令応答性及び外乱抑圧性が与える影響が、各々の場合で異なるためと考えられる。

慣性モーメント比の影響の差異を表す値として、表 5.5～表 5.8 の各々の中段に示された①表面粗さ曲線、②送り軸の挙動の二次元表示の欄に於けるモータグループ#1 に対するモータグループ#2、#3 の Ra, Rz, Peak to Peak の減少率、即ち-%で示した値が挙げられる。この4種類の表を比較して分かる様に、減少率は4種類のワークピース間で異なるものの、総じて言えば、加工面の急激な角度の変化、即ちサーボモータが大きな加減速を必要とする形状に於いて、慣性モーメント比の違いによる影響がより顕著に表れている事が分かる。

以上が実加工結果の総論であるが、4種類のワークピース間で、その表面性状の様相が各々異なる点について若干補足をする。表 5.7、即ち高機能携帯電話のケースを模した部品では、他の3種類に比べて表面の凹凸が極端に小さく、逆に形状の誤差は他より大きい。これは、表 5.7 では高速ヘール加工を実施したためと考えられる。高速のヘール加工では、工具を回転させずカナ削りの様な引き切りを行うため、カッターマークが発生せず、通常の切削加工より綺麗な表面となる。一方、高速で加工するため、必然的に形状誤差は大きくなる。

また、表 5.8、即ち高級腕時計のベゼルの実加工結果では、他の3種類に比べて表面上に様々な凹凸があり、モータグループ#1、#2、#3 の差異が分かりづらい。これは、表 5.8 の実加工時間が他の3種類の実加工時間より長く、従って機構部の熱変位の影響を受けているためと考えられる。実際、表 5.8 の実加工の所要時間は120分を超えており、20分未満である他の3種類よりも明らかに長い。一般に、中型、大型の金型や部品を長時間加工する際には、工作機械の機構部の発熱による熱変位が与える影響にも留意する必要がある。

表 5.5 加工面粗さと加工面品位の測定結果（銅電極）

Motor group	#1	#2	#3
Moment of rotor inertia	$0.68 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$1.17 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$2.57 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment of inertia ratio	2.38	1.80	1.36
Work piece mass (including fixtures)	100kg		
Photograph of machining surface	<p>Cutting path (Arrows show cutting direction)</p> <p>Measurement point</p> <p>Tool</p> <p>Workpiece</p>		
① Line roughness	<p>Ra 0.34μm Rz 2.50μm</p>	<p>Ra 0.23μm(-32%) Rz 2.02μm(-19%)</p>	<p>Ra 0.21μm(-38%) Rz 1.32μm(-47%)</p>
② 2D display of feed axis operation	<p>Peak to Peak 2.32μm</p>	<p>Peak to Peak 2.19μm(-6%)</p>	<p>Peak to Peak 1.75μm(-25%)</p>
③ 3D visualization image of machined surface			
④ 3D display of feed axis operation			

Note) The data ④ show the deviation between position command and feedback on the cutting point.

表 5.6 加工面粗さと加工面品位の測定結果（ペットボトル用金型）

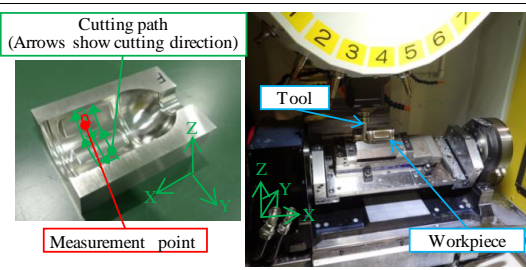
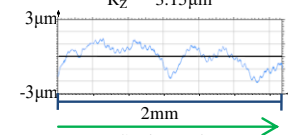
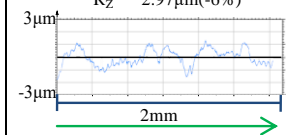
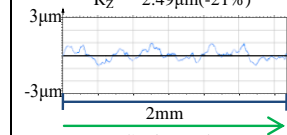
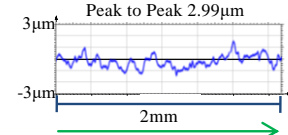
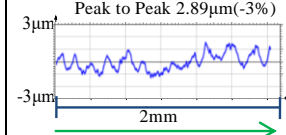
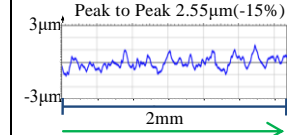
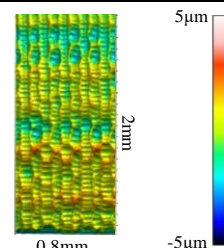
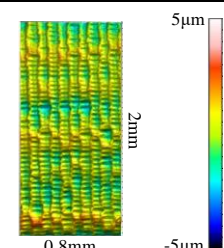
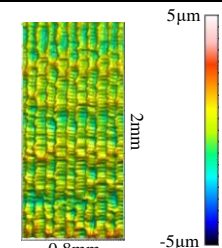
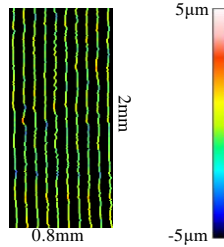
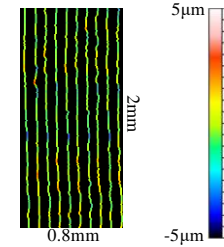
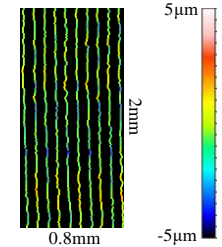
Motor group	#1	#2	#3
Moment of rotor inertia	$0.68 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$1.17 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$2.57 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment of inertia ratio	3.45	2.42	1.65
Work piece mass (including fixtures)	300kg		
Photograph of machining surface	 <p>Cutting path (Arrows show cutting direction)</p> <p>Measurement point</p> <p>Tool</p> <p>Workpiece</p>		
① Line roughness	<p>Ra 0.53μm Rz 3.15μm</p>  <p>3μm -3μm 2mm Cutting path</p>	<p>Ra 0.50μm(-6%) Rz 2.97μm(-6%)</p>  <p>3μm -3μm 2mm Cutting path</p>	<p>Ra 0.46μm(-13%) Rz 2.49μm(-21%)</p>  <p>3μm -3μm 2mm Cutting path</p>
② 2D display of feed axis operation	<p>Peak to Peak 2.99μm</p>  <p>3μm -3μm 2mm Cutting path</p>	<p>Peak to Peak 2.89μm(-3%)</p>  <p>3μm -3μm 2mm Cutting path</p>	<p>Peak to Peak 2.55μm(-15%)</p>  <p>3μm -3μm 2mm Cutting path</p>
③ 3D visualization image of machined surface	 <p>5μm 2mm 0.8mm -5μm</p>	 <p>5μm 2mm 0.8mm -5μm</p>	 <p>5μm 2mm 0.8mm -5μm</p>
④ 3D display of feed axis operation	 <p>5μm 2mm 0.8mm -5μm</p>	 <p>5μm 2mm 0.8mm -5μm</p>	 <p>5μm 2mm 0.8mm -5μm</p>

表 5.7 加工面粗さと加工面品位の測定結果（高機能携帯電話のケース）

Motor group	#1	#2	#3
Moment of rotor inertia	$0.68 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$1.17 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$2.57 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment of inertia ratio	2.38	1.80	1.36
Work piece mass (including fixtures)	100kg		
Photograph of machining surface	<p>Cutting path (Arrows show cutting direction)</p> <p>Measurement point</p> <p>Tool</p> <p>Workpiece</p>		
① Line roughness	<p>Ra 2.22μm Rz 11.76μm</p>	<p>Ra 1.99μm(-10%) Rz 11.26μm(-4%)</p>	<p>Ra 1.74μm(-22%) Rz 9.85μm(-16%)</p>
② 2D display of feed axis operation	<p>Peak to Peak 16.55μm</p>	<p>Peak to Peak 16.38μm(-1%)</p>	<p>Peak to Peak 7.28μm(-56%)</p>
③ 3D visualization image of machined surface			
④ 3D display of feed axis operation			

表 5.8 加工面粗さと加工面品位の測定結果（高級腕時計のベゼル）

Motor group	#1	#2	#3
Moment of rotor inertia	$0.68 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$1.17 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$2.57 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment of inertia ratio	2.38	1.80	1.36
Work piece mass (including fixtures)	100kg		
Photograph of machining surface	<p>Cutting path (Arrows show cutting direction)</p> <p>Measurement point</p> <p>Tool</p> <p>Workpiece</p>		
① Line roughness	<p>Ra 0.063μm Rz 0.35μm</p> <p>1.5mm Cutting path</p>	<p>Ra 0.047μm(-25%) Rz 0.32μm(-9%)</p> <p>1.5mm Cutting path</p>	<p>Ra 0.030μm(-52%) Rz 0.25μm(-29%)</p> <p>1.5mm Cutting path</p>
② 2D display of feed axis operation	<p>Peak to Peak 0.35μm</p> <p>1.5mm Cutting path</p>	<p>Peak to Peak 0.35μm(0%)</p> <p>1.5mm Cutting path</p>	<p>Peak to Peak 0.23μm(-34%)</p> <p>1.5mm Cutting path</p>
③ 3D visualization image of machined surface	<p>0.5μm 1mm 0.3mm -0.5μm</p>	<p>0.5μm 1mm 0.3mm -0.5μm</p>	<p>0.5μm 1mm 0.3mm -0.5μm</p>
④ 3D display of feed axis operation	<p>0.5μm 1mm 0.3mm -0.5μm</p>	<p>0.5μm 1mm 0.3mm -0.5μm</p>	<p>0.5μm 1mm 0.3mm -0.5μm</p>

5.4 実在するワークピースを使用した高品位加工の実加工実験の考察

本章では、5.2 節、5.3 節で実加工した 4 種類のワークピースに、第 3 章、第 4 章のテスト加工用のワークピースを加えた、合計 5 種類のワークピースの実加工実験の結果を比較検証する。比較のため、第 3 章、第 4 章のテスト加工用のワークピースを使用した実加工実験の結果を再度表 5.9 に示す。これら 5 種類の実加工実験の結果を元にして、5.3.2 節で整理したモータグループ#1 に対するモータグループ#2、#3 の Ra, Rz, Peak to Peak の減少率、即ち-%で示した値を抽出して、表 5.10 に一覧表で示す。表 5.10 より、第 3 章、第 4 章のテスト加工用のワークピースも含めた 5 種類のワークピースで、慣性モーメント比の違いが与える影響の傾向は一致するが、影響の大きさは必ずしも同一でない事が読み取れる。

5.4.1 本章のワークピース群と第 3 章、第 4 章のワークピースとの関係の考察

5.3.2 節で述べた通り、本章で使用したワークピース毎に慣性モーメント比の与える影響に差異がある事が分かった。一方、いずれの場合にも第 3 章、第 4 章で使用したテスト加工用のワークピースの場合と比較するとその影響が小さい事が、表 5.10 より読み取れる。これは即ち、第 3 章、第 4 章で使用したテスト加工用のワークピースが、単純な形状でありながら、或いは単純な形状であるため、サーボモータと送り軸の機構部との慣性モーメント比が加工面品位に与える影響を顕著に反映するワークピースである事を意味する。

表現を変えれば、マシニングセンタの設計に際して、例えばサーボモータや制御系のパラメータ変更などが発生した場合に、その変更が加工面品位に与える影響の検証方法として、第 3 章、第 4 章のテスト加工用のワークピースの使用が、単純な形状ながら、或いは単純な形状であるため、より効果的である事を意味する。いずれにしても、サーボモータが急激な加減速を必要とする形状を含むワークピースを加工して、優れた加工面品位を実現するためには、慣性モーメントの比較的大きなサーボモータが有利という結論は変わらない。

なお、5.3.2 節で、高速ヘール加工に代表される工具と工法の違い及び工作機械の熱変位の大きさの違いが加工結果に与える影響について付記したが、実際に各現場でワークピースを加工する際にも、使用する工具や工法、工作機械の特性などが加工結果に与える影響を考慮する必要がある。一方で、第 3 章、第 4 章のテスト加工用のワークピースは、特殊な工具を必要とせず、加工も 10 分未満で完了する。つまり、サーボモータが加工結果に与える影響を他の影響を比較的受けずに測定出し評価出来る点も大きな特長である。

表 5.9 テスト加工用ワークピースを使用した実加工実験の結果（再掲）

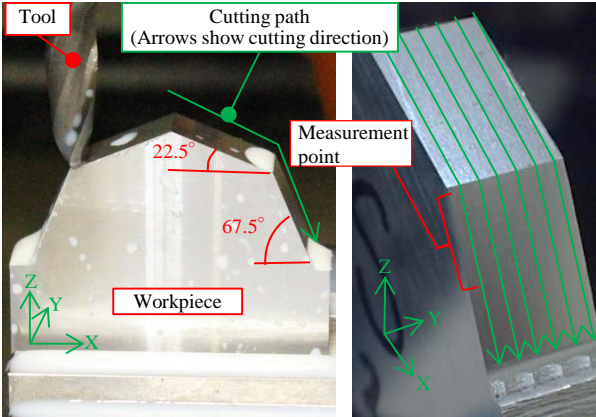
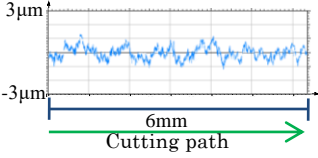
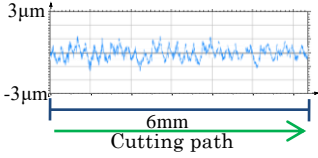
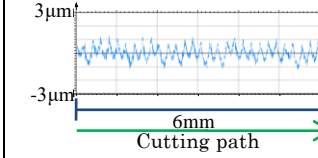
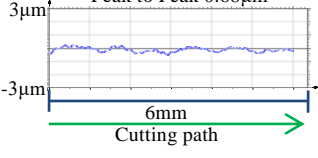
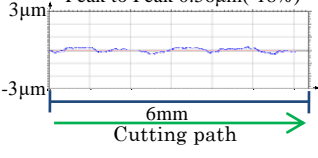
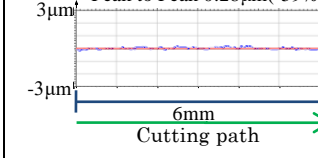
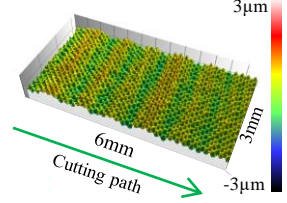
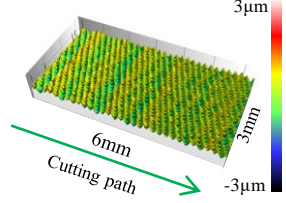
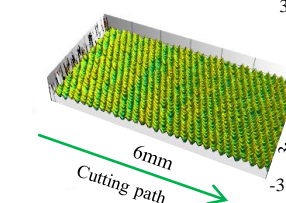
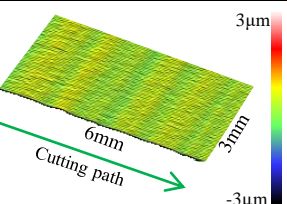
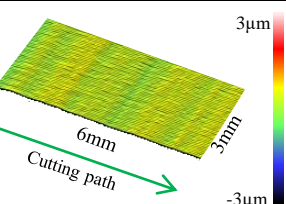
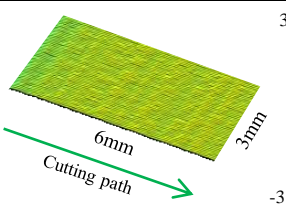
Motor group	#1	#2	#3
Moment of rotor inertia	$0.68 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$1.17 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$2.57 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment of inertia ratio	1.01	0.58	0.27
Work piece mass (including fixtures)	100kg		
Photograph of machining surface			
① Line roughness	<p>Ra 0.37μm Rz 2.54μm</p> 	<p>Ra 0.36μm (-3%) Rz 2.22μm (-13%)</p> 	<p>Ra 0.31μm (-16%) Rz 1.97μm (-22%)</p> 
② 2D display of feed axis operation	<p>Peak to Peak 0.68μm</p> 	<p>Peak to Peak 0.56μm (-18%)</p> 	<p>Peak to Peak 0.28μm (-59%)</p> 
③ 3D visualization image of machined surface			
④ 3D display of feed axis operation			

表 5.10 各ワークピースと慣性モーメント比が与える影響との関係の比較

		Copper electrode die	Plastics mold for PET bottles	Mobile phone case	Luxury watch bezel	Workpiece for high precision and fine surface test machining
Ra	#1:	0.34 μ m	0.53 μ m	2.22 μ m	0.06 μ m	0.37 μ m
	#2:	0.23 μ m (- 32%)	0.50 μ m (- 5.7%)	1.99 μ m (- 10%)	0.05 μ m (- 25%)	0.36 μ m (- 2.7%)
	#3:	0.21 μ m (- 38%)	0.46 μ m (- 13%)	1.74 μ m (- 22%)	0.03 μ m (- 52%)	0.31 μ m (- 16%)
Rz	#1:	2.50 μ m	3.15 μ m	11.76 μ m	0.35 μ m	2.54 μ m
	#2:	2.02 μ m (- 19%)	2.97 μ m (- 5.7%)	11.26 μ m (- 4.3%)	0.32 μ m (- 8.6%)	2.22 μ m (- 13%)
	#3:	1.32 μ m (- 47%)	2.49 μ m (- 21%)	9.85 μ m (- 16%)	0.25 μ m (- 29%)	1.97 μ m (- 22%)
Peak to peak	#1:	2.32 μ m	2.99 μ m	16.55 μ m	0.35 μ m	0.68 μ m
	#2:	2.19 μ m (- 5.6%)	2.89 μ m (- 3.3%)	16.38 μ m (- 1.0%)	0.35 μ m (0.0%)	0.56 μ m (- 18%)
	#3:	1.75 μ m (- 25%)	2.55 μ m (- 15%)	7.28 μ m (- 56%)	0.23 μ m (- 34%)	0.28 μ m (- 59%)

5.4.2 本章のワークピース群と加工面品位との関係の考察

ワークピースの形状により、慣性モーメント比が加工面品位に与える影響が差異を生じる要因として、テーパ面のテーパ角度の大小、曲面の曲率変化の大小などが挙げられる。同時2軸加工では、テーパ角度が小さい、即ち片方の軸の一回転毎の移動量が小さい程、制御性の差異が位置偏差として現れづらく、 0° の場合は停止している送り軸の位置偏差は加工結果に全く反映されない。逆に 45° テーパでは、各軸の位置偏差が加工結果に大きく反映されて、慣性モーメント比に起因する制御性の差異も加工結果に大きく影響する。

一般に、曲面の曲率変化が小さいとサーボモータに与えられる位置指令の変化も小さく、サーボモータが位置指令に追従しやすいため、慣性モーメント比に起因する制御性の差異は加工面品位に影響しづらい。逆に、曲面の曲率変化が大きいと与えられる位置指令の変化も大きく、サーボモータが位置指令に追従しづらいため、慣性モーメント比に起因する制御性の差異は加工面品位に影響しやすい。この他、曲率変化が一定の円弧形状では R が小さい程サーボモータに大きな加減速が必要となり、その結果高品位加工の難易度も高くなる。

図 5.1～図 5.4 に示したワークピースに於いて、角度変化や曲率変化の比較的大きな部位は各々の図の中で赤い枠で囲った箇所である。これらの箇所が他の部位、即ち角度変化や曲率半径の比較的小さな部位と比較して、表面の凹凸や筋目などが顕著に表れる事は、経験的に知られている。実際に、本章で実施した4種類のワークピースを使用した実加工実験に於いても、他の加工部位と比較して、加工面の乱れが顕著である事が目視にて確認されており、上述の制御性の観点での議論が実際の加工結果と合致している事を確認した。

5.4.3 サーボモータの挙動を測定する測定システムの有用性の考察

5.3.1 節に於いては、実在する、或いはそれを模したワークピースを使用して高品位加工を実施した場合、その加工面が必ずしも単純な平面形状でないため、加工面の測定評価が簡単ではない点を指摘した。この課題は、高品位加工分野の現場に於いて、今もなお目視による官能評価が主流である主な要因の一つである。また、5.3.2 節では、高速のヘール加工が加工結果に与える影響、熱変位が加工結果に与える影響について付記し、実際のワークピースの高品位加工に於いては、使用する工具や工法、工作機械の熱特性など、サーボモータ以外の様々な要素もまた加工結果に影響を与える点を指摘した。サーボモータが高品位加工の加工結果に与える影響のみを評価したい場合に、この点も一つの大きな課題である。

この2つの課題に対して、第4章で提案した機構部の送り軸のサーボモータの挙動を測定する専用の測定システムの活用が、一つの解決手段となる。何故なら、この測定システムは加工面の形状に依存せずにサーボモータの挙動の定量的な測定が可能であり、測定データを二次元或いは三次元のデータとして比較しやすく加工する事も可能だからである。そして、サーボモータの与える影響に絞って測定と分析を行い、その他の要素を極力排除したい場合にも、第4章で提案した測定システムは有効な手段である。工作機械の最終的な加工性能の把握のためには、加工結果の測定評価は必須であるが、現実問題としてそれが簡単ではない場合の補完手段、代替手段として、第4章の測定システムの有効性が裏付けられた。

5.5 高品位加工を実現するための諸考察

5.4節までで、慣性モーメント比がマシニングセンタの加工性能及び送り軸の挙動に与える影響に関する研究を、加工の種類を高品位加工に絞って詳しく論じて来た。しかしながら、高品位加工と言えば永らくその対象は金型で、近年の高機能携帯電話の登場と共に部品加工にも適用範囲が広がった新分野である。従って、学術的、技術的には未だ検討が十分でない要素も多い。例えば、高精度加工と高品位加工が時に混同され、サーボモータの選定或いはマシニングセンタの加工性能の評価に於いて混乱を招く場合があり、従って、両者の違いを改めて明確化する必要がある。また、高品位加工を実現する要素の全体像の把握、その加工結果の定量的評価指標の確立などは、正に今後の研究課題と考えられる。

5.5.1 高精度加工と高品位加工の相違点

先述の通り、マシニングセンタによる加工は、サイクルタイムを重視する加工と、高精度高品位を重視する加工とに大別される。更に後者は、高精度を重視する加工と高品位を重視する加工に分類される。後者の分類について、高精度と高品位は一般にほぼ同義である様に思えるが、要求される機能要件は実はかなり異なる。但し、一般的なマシニングセンタではなく、超精密加工機、ナノ加工機などの分野では、高精度と高品位が共に高いレベルで要求される市場もある。以上の議論を整理すると、以下の様になる。

- ① 加工精度を重視する場合 ～ 機械部品の勘合部や締結部、ドリルやタップの中心位置など、組み付けられる機械要素の相手との位置関係に高精度が必要な場合
- ② 加工面品位を重視する場合 ～ 自動車や電子機器用の高精度金型、或いは高機能携帯電話や高級腕時計の外観部品など、見た目の滑らかさや質感が必要な場合
- ③ 加工精度と加工面品位を共に重視する場合 ～ 高機能携帯電話のレンズや自動車用ヘッドアップディスプレイの樹脂金型、高画質が要求される光学部品など

一般に、①に分類される部品は、工業製品の構成部品の一部として内蔵され、外部に露出しないため、見た目の良し悪しは一定の水準であれば許容される。しかし、一般に②に分類される金型や部品は、嵌め合わせたり突き当てたりする相手を持たないため、精度は一定の水準であれば許容される。但し、③の光学部品では、加工精度は撮像される画像全体の形状に影響し、加工面品位は画像の局所的な歪みに影響するため、その両方が重視される。即ち、要求される機能要件が非常に厳しい加工分野であると言える。

5.5.2 高品位加工に適したサーボモータ

近年急速に拡大している高品位加工市場として、高機能携帯電話に代表される最新の電子機器が挙げられる。これらの市場に共通した特徴は、要求される精度は一般的だが、外観の美しさ、滑らかさなどに対する要求が極めて高い点である。慣性モーメントの比較的大きなサーボモータは、サイクルタイムの観点で近年市場評価が低かったが、高品位加工の急速な市場拡大を背景に、その重要性と価値が見直されている。サーボモータのコギングトルクの大小やサーボ制御の制御性についても、慣性モーメントと全く同様である。

第2章で分析した通り、現在加工現場で稼働しているマシニングセンタに於いても、金型加工機、高精度高品位加工機分野では、それらの加工機の送り軸に対して慣性モーメントの比較的大きなサーボモータ、即ち慣性モーメント比を小さく抑えるサーボモータを選定して搭載している。今後は、サイクルタイムを重視する用途、加工面品位を重視する用途、その中間を狙う用途、即ち汎用機といった具合に、対象とする市場とワークピースを明確に意識した上で慣性モーメント比の設計を行う事が効果的であると考えられる。

5.5.3 高品位加工に影響を与える要素の全体像

本研究の第2章～第4章を通して、サーボモータの特性、特に慣性モーメントと工作機械の加工性能との関係に着目し、様々な実加工実験を含む研究を一貫して実施して来た。慣性モーメントに着目した理由は、それが工作機械の加工性能、特に高品位加工に関する性能に大きく影響する事が経験的に知られているが、両者の定量的な関係は従来あまり研究されていなかったためである。当然の事ながら、慣性モーメント以外の様々な要素も、加工性能、特に高品位加工に影響を与えるが、その全体を俯瞰する研究も未だあまり多くない。

加工面の面品位に影響を与える可能性のある要素としては、サーボモータとサーボ制御の他に、加工プログラムとCNCの機能、機械剛性と主軸バランス、工具と工具ホルダ、主軸の回転速度や切り込み量などの加工条件が挙げられる。これらを整理して、高品位加工の構成要素の全体像として図5.5に示す。図5.5の構成要素の中で、何が適切でないと加工面がどう乱れるかの相関は、現在のところ各加工現場で経験的に知られているに過ぎず、従ってこの相関関係の究明も、この分野の今後の発展に寄与すると考えられる。

5.5.4 高品位加工の加工結果の定量的評価指標

高品位加工の加工結果の評価指標としては、一般に表面粗さ Ra, Rz が用いられるが、最近では所定の幅に於ける表面粗さ Sa, Sz が好まれる場合もある。しかしながら、実際の高精度金型や高級腕時計部品の加工現場では、表面粗さの数値と同様、或いはそれ以上に、加工面の滑らかさ、周期的な筋目のなさ、光沢の均一さなどの目視による官能検査が、未だ評価の中心となっている。そのため、同じ加工面品位の評価結果が、目視検査の担当者によりばらつくといった問題も発生しており、この点での研究も今後の課題である。

この解決策として、第 3 章、第 4 章及び本章に於いて使用した、表面性状の三次元可視化画像測定装置が準拠する評価指標の活用は、一つの可能性を有する。三次元可視化画像測定装置とその測定評価の流れの概要を、図 5.6 に示す。文献 75)78)によれば、図 5.6 に示した測定装置は、三次元表面粗さの規格 JIS B 0651⁸³⁾、ISO25178^{84)~88)}に準拠した、三次元表面性状を表現する様々なパラメータの算出機能を有する。この中から、高品位加工の評価指標として適切な候補を選択する方法も、本課題の有効な解決策となる可能性がある。

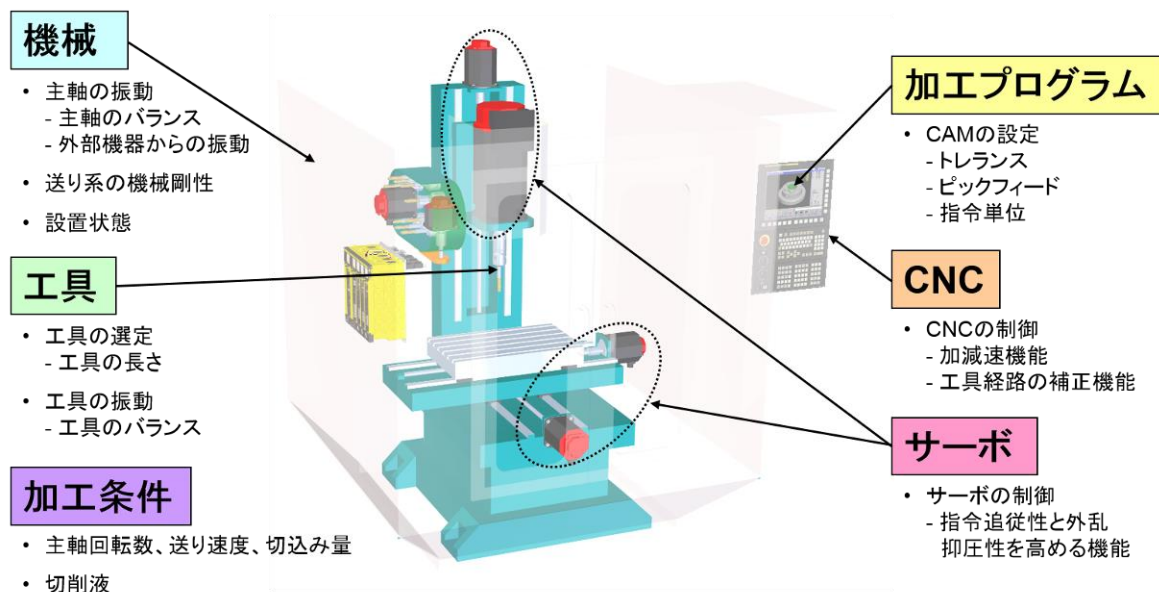


図 5.5 高品位加工に影響を与える構成要素の全体像

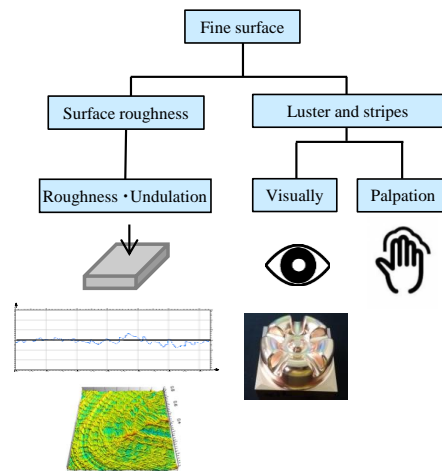
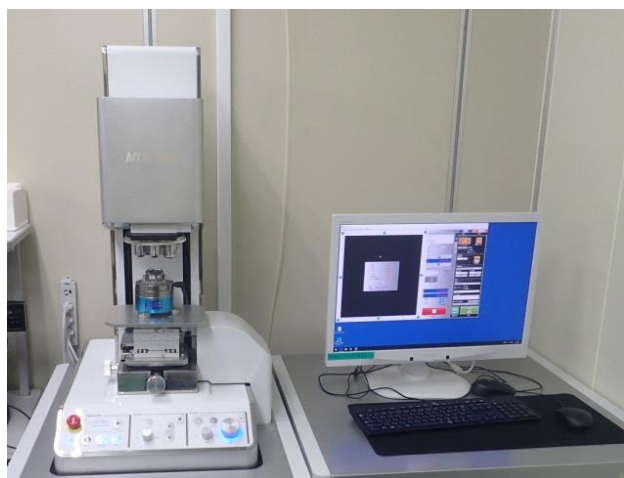


図 5.6 三次元可視化画像測定装置とその測定評価の流れ

5.6 高品位加工に影響を与える要素の全体像の更なる考察

実際の高品位加工の現場では、ワークピース毎にテスト加工を実施し、その加工面を主に目視で評価する。そして、その加工面の状況に応じて、CAM でプログラムを再生成する、CNC やサーボのパラメータを再調整する、機械系に剛性不足がないか確認する、工具や加工条件を変更するなど、試行錯誤的な方法で改善を図っている。その知見は、経験値としては徐々に蓄積されているものの、そもそも高品位加工に影響を与える要素として何と何が存在するのかといった全体像は、これまであまり整理され論じられては来なかった。

そこで、一つの新たな試みとして、高品位加工に必要な構成要素として現在知られている全体像を改めて図 5.7 に、その流れを図 5.8 に示す。かつ、これらの構成要素の、何が適切でない場合に加工面がどう乱れるかの相関の例を、以下に列挙する。以下の例は、過去に加工面品位の問題が発生した際、その解決のために試行錯誤した事例から抽出したものである。この様な事例をデータベース化すれば、今後類似の事例が発生した場合にも、迅速な解決が可能となる。つまり、本件もまた高品位加工分野で目指すべき方向の一つと考える。

- (1) CAM の設定に不備がある場合、例えば、要求される精度や面品位に対して指令単位が大きい場合、理想的な加工経路に対する経路誤差が大きくなる。この事例を、図 5.9 に示す。但し、指令単位を小さく設定すると、CNC の計算処理に時間を要するため、要求される精度や面品位に応じて指令単位を適切に設定する必要がある。
- (2) サーボ制御のパラメータ調整が不十分な場合、例えば速度ループゲインが過剰、共振フィルタの設定が不適切などの場合には、コーナ部で速度ループが発振気味となり、加工面が振動的となる。逆に、速度ループゲインが低過ぎる場合には、外乱抑圧性が不十分となり、加工面に筋目が発生する。後者の事例を、図 5.10 に示す。
- (3) 主軸から工具に至る回転機構部のバランスが悪い場合、例えば主軸のバランス調整が不十分、或いは工具の取り付け状態が悪く回転バランスが悪いなどの場合には、主軸回転中に微小振動が発生し、その大きさによっては、加工面に主軸の回転速度に比例した周波数の周期的な筋目が発生する。後者の事例を、図 5.11 に示す。
- (4) 加工工具が経時劣化した場合、例えばエンドミル先端が摩耗した場合には、むしろ様な加工面となる。或いは、そもそも加工工具の選択が不適切な場合、例えばワークピースの材料や加工条件に対して適切な材質、形状、表面処理でない加工工具を選択した場合には、光沢のない加工面となる。後者の事例を、図 5.12 に示す。

この他にも、制御装置の冷却ファンの微振動が加工エリアに伝わっていたため、加工面に一定周期の筋目が発生したケース、加工用切削液の補給が不十分であったため、加工精度は悪くないものの、加工面の光沢が損なわれてしまったケースなど、想定外の諸要因で良好な加工面品位が得られなかった様々な事例が、実際の加工現場では少なからずある。従って、これらの事例を逐一記録して蓄積しておき、検索が容易な形式でデータベース化する事で、以後に類似事例が発生した際に、より迅速な分析と解決が可能となると期待される。

以上が、現時点で知見、経験として残されている範囲であるが、高品位加工に必要な構成要素とそれらが加工面に与える影響との関係の事例である。これらの事例研究に於いて注目すべきは、その学術分野、技術分野が、制御から加工まで広範囲に亘る点である。一般に、CNC、サーボ、工作機械、機械加工などの全ての分野に精通する専門家は恐らく存在しないので、調査の初期段階で問題となる要素を特定し、その分野の専門家に詳細分析を委ねるという観点でも、図 5.7、図 5.8 に示す全体像は、今後のこの分野の研究の指針となる。

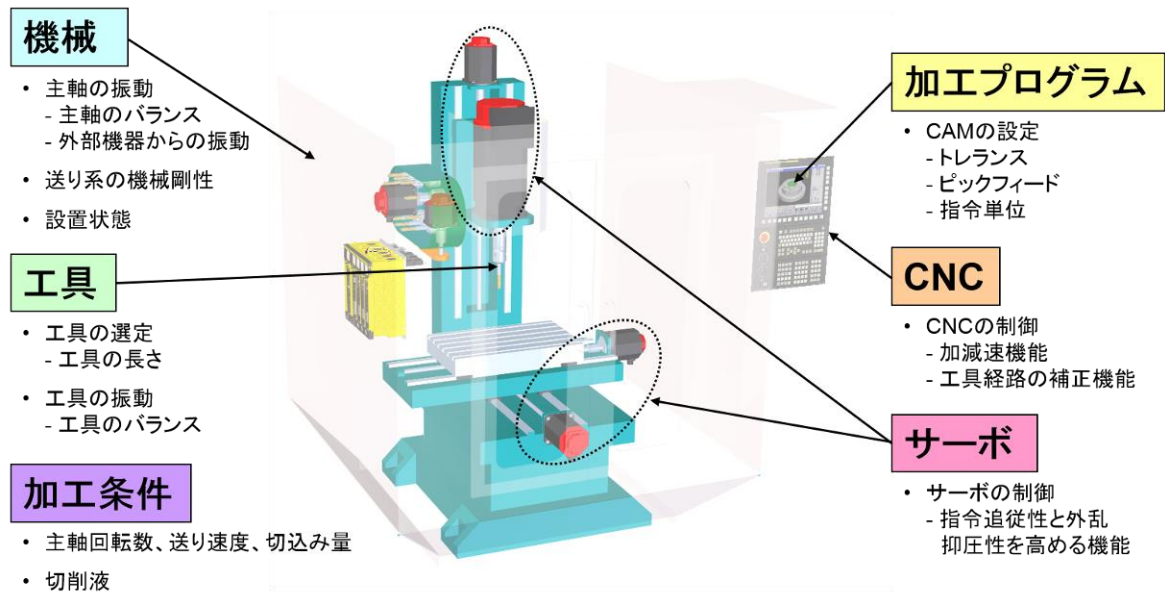


図 5.7 高品位加工に影響を与える構成要素の全体像（再掲）



図 5.8 高品位加工に影響を与える構成要素の流れ

CAMの設定

- 指令単位 指令単位の精度で工具経路が生成される

指令単位を小さくすると工具経路は滑らかになる (推奨値=0.1 μm)

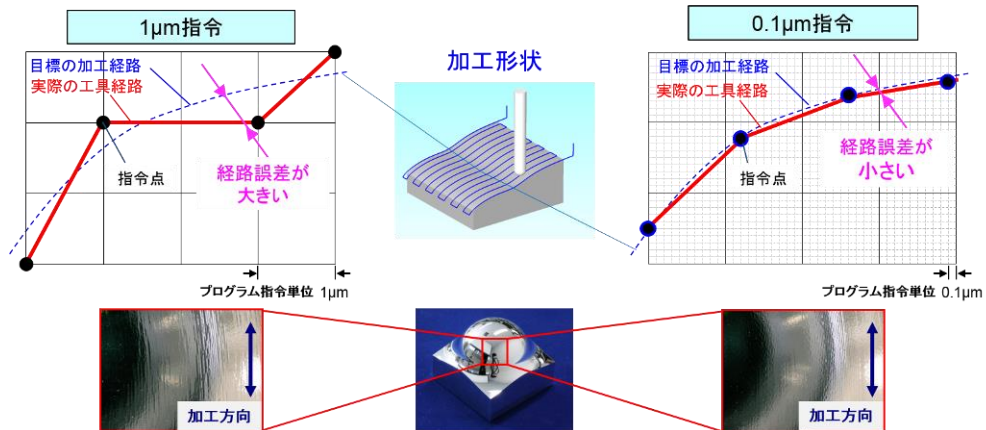


図 5.9 構成要素と加工結果との関連の事例 (CAM の設定)

サーボ制御

- サーボ制御の最適化により
外乱抑圧性を向上

高応答サーボ制御 適用例

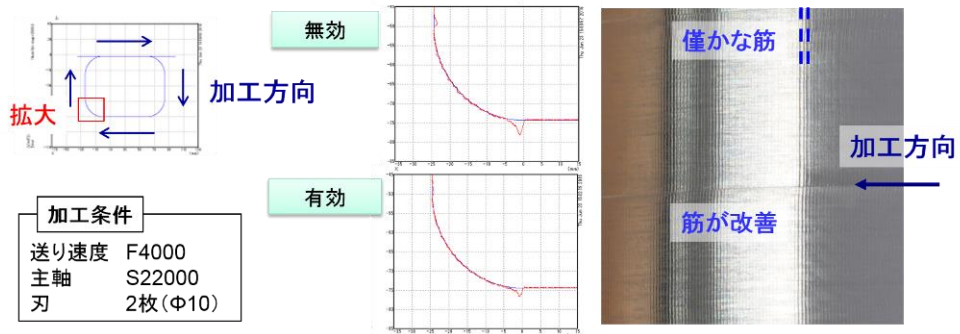


図 5.10 構成要素と加工結果との関連の事例 (サーボ制御)

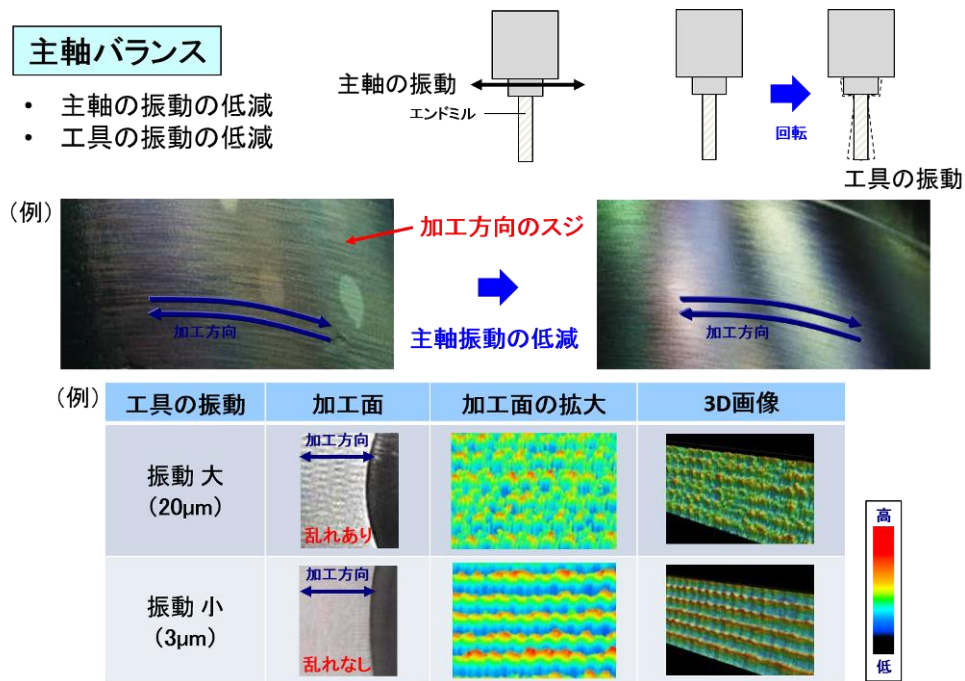


図 5.11 構成要素と加工結果との相関の事例（主軸バランス）

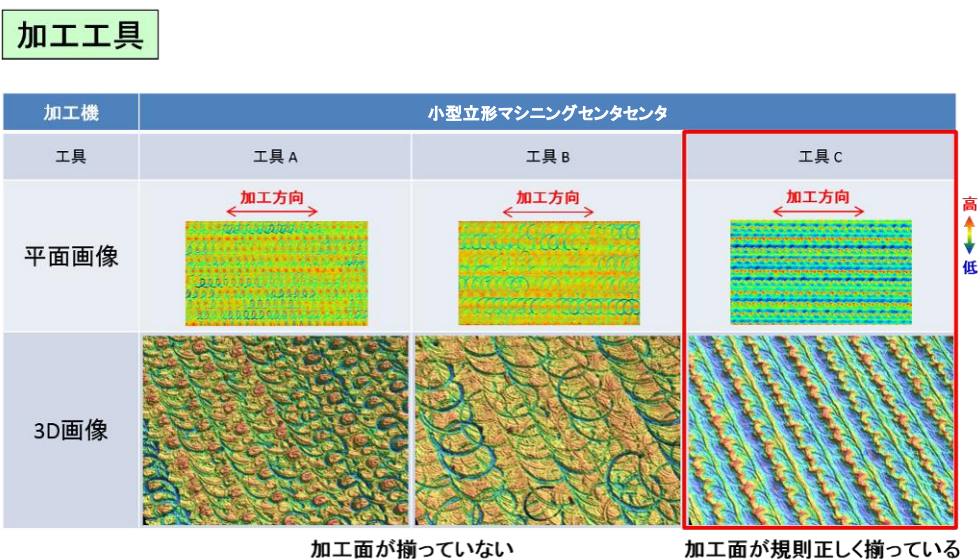


図 5.12 構成要素と加工結果との相関の事例（加工工具）

5.7 高品位加工の加工結果の定量的評価指標の更なる考察

三次元可視化画像測定装置とその測定評価の流れを、改めて図 5.13 に示す。図 5.13 の測定装置は、現時点で既に市場で販売されている一般的な非接触型の測定装置であり、国際規格 ISO 25178 に準拠した、三次元表面性状を表現する様々なパラメータ算出機能を有している点が特徴である。また、ISO 25178-2⁸⁵⁾に記載された加工面品位の評価指標の候補を、表 5.11 に示す。表 5.11 に列挙された評価指標の候補は、いずれも加工面の表面性状を凹凸も含めて三次元で評価する指標である。従って、表面性状の違いを、表面粗さだけで評価した場合、或いは目視による官能検査に依存して評価した場合と比較して、より明快でより信頼出来る定量的評価結果が得られる可能性があると期待される。

表 5.11 の評価指標の候補を、ISO 25178-6⁸⁷⁾に基づいて考察した結果、空間パラメータの一つである Str 値が、金属加工面の表面性状を表す評価指標として、現時点で有力候補と考えられる。その理由は、①空間パラメータは、加工面に生じる筋目の規則性を示す指標として適している、②その空間パラメータ群の中で、Str 値は金属の研磨による表面仕上げの筋目の評価指標として既に使用された実績があるという 2 点である。Str 値は、自己相関関数の中心（遅れがゼロの点）から、最も早く減衰する方向の長さとも最も遅く減衰する方向の長さとの比率である。従って、その値は 0 と 1 の間に収まり、0 に近い程加工面の筋目が均一で乱れが小さく、1 に近い程加工面の筋目が不均一である事を示す。このため、基本的に筋目が存在しない研削加工による表面仕上げでは Str 値が 1 に近い程面品位が良く、工具による規則的な筋目が存在するエンドミル加工では Str 値が 0 に近い程面品位が良い事になる。

また、この Str 値を含む ISO 25178-2⁸⁵⁾で示された評価指標は、文献 78)に記載された測定装置以外の測定装置に於いても、例えば文献 76)などに記載された、他の測定機メーカーの最新の非接触三次元表面粗さ・形状測定機であっても算出可能である。即ち、Str 値算出のために、新たに他の測定機器や処理用ソフトウェアを追加導入する必要がない点で、実用的である。一方、Str 値を含む全ての評価指標が一定の条件下でのみ加工面性状の評価に使用可能であるという大きな課題も残されている。本研究で使用したテスト加工用のワークピースは単純な形状だが、高品位加工のワークピースは一般に複雑な形状であるため、全ての加工面性状の定量的評価が可能な単一の評価指標は、現時点で見当たらないのが実情である。

Str 値の実際のイメージを掴むため、表面性状を Str 値で評価した事例を、図 5.14 に示す。図 5.14 に於いて、(a)の例では Str 値が 0 に近く、加工面には均一な筋目が見られる。一方、(b)の例では Str 値が 1 に近く、加工面には均一な筋目はなく無秩序である。この事例より、Str 値に着目すれば、加工面の筋目の均一さの定量的な評価が可能である事が分かる。次に、

第3章で示したテスト加工用のワークピースの実加工結果に対して Str 値を算出した結果を、表 5.12 に示す。既に論じた様に、面品位はサーボモータ#3, #2, #1 の順に良好であるが、Str 値もまた#3, #2, #1 の順に 0 に近い値となっている。これは、#3, #2, #1 の順にエンドミル加工による加工面の筋目が均一で、筋目の乱れが少ない事を示している。

但し、この Str 値は加工面の筋目の均一さのみを評価する指標なので、加工面品位の汎用的定量評価指標としては適用が難しい。研削加工では多くの場合に適用が可能と思われるが、エンドミルによる高品位加工のワークピースは、一般に三次元曲面形状を有し、加工方向も一定でない場合が多い。例として、第5章で実加工実験を実施した4種類のワークピースの中で、加工方向が途中で最も大きく変わる図 5.1 の銅電極の実加工結果に対して Str 値を算出した結果を表 5.13 に示す。表 5.13 では、加工が一方向でなく加工中に変わるため、Str 値が#1, #2, #3 の全てで 0.5 前後と差がない。また、元々筋目が非常に小さく高精度である図 5.4 の高級腕時計のベゼルの実加工結果に対して Str 値を算出した結果を表 5.14 に示す。表 5.14 では、縦軸は $\pm 0.5 \mu\text{m}$ と高精度で、Str 値も#1, #2, #3 の全てで 0.2 以下とやはり差がない。即ち、表 5.13, 表 5.14 の例では、Str 値で面品位の良否を論じる事は現実的でない。

また、加工面品位の目視による官能検査では、一般に筋目の有無と光沢の2つが主な検討要素となる場合が多いが、Str 値は前者、即ち筋目の有無に対してのみ、適用が可能である。後者の光沢に関しては、Str 値以外の空間パラメータや複合パラメータなどを評価指標とするといった提案も出されている。図 5.7, 図 5.8 の高品位加工に必要な構成要素の中では、主に加工工具の選択や摩耗の状態、或いは送り軸の送り速度や主軸の回転などの加工条件による影響が加工面の光沢に大きな影響を与える事が一般的に知られているが、この点についても今後更に研究が行われ、両者の相関が定量的に解明されると期待される。いずれにしても、高品位加工の定量的な評価指標の確立は、この分野に於ける今後の大きな研究課題である。しかしながら、本研究に於いて、上記の Str 値が特定の条件下とはいえ三次元表面性状の評価指標となり得る事が分かった点は、今後の研究に繋がる一つの成果であると考えられる。

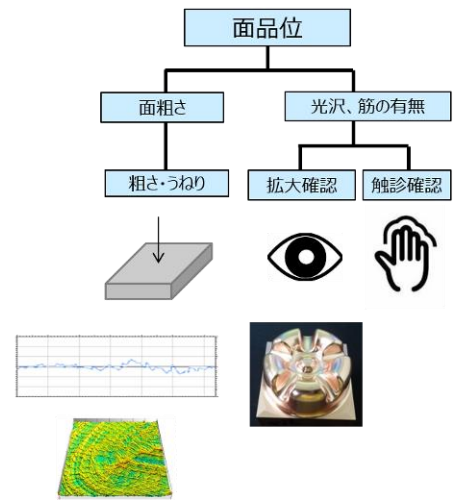
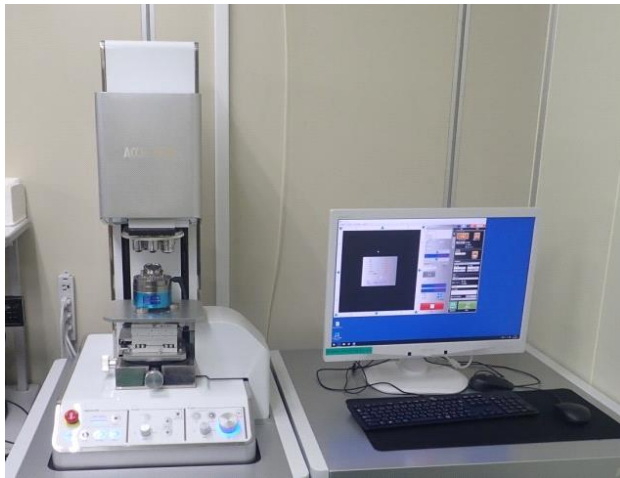
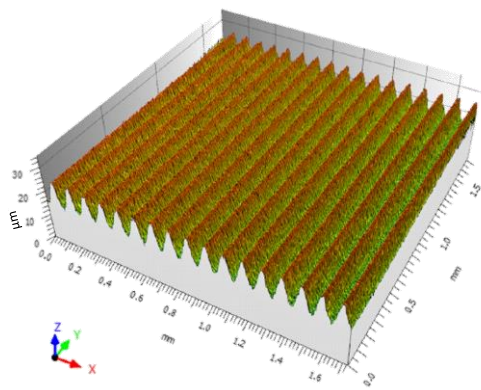


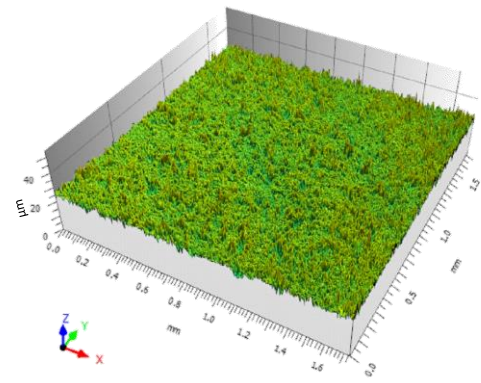
図 5.13 三次元可視化画像測定装置とその測定評価の流れ（再掲）

表 5.11 三次元表面性状を表現する評価指標の候補

カテゴリ category	パラメータ Parameters
高さパラメータ Height Parameters	Sq Ssk Sku Sp Sv Sz Sa
空間パラメータ Spatial Parameters	Sal Str
複合パラメータ Hybrid Parameters	Sdq Sdr
機能パラメータ Functions and related parameters	Sk Spk Svk Smr1 Smr2 Svq Spq Smq Sxp
体積パラメータ Void and material volume parameters	Vvv Vvc Vmp Vmc
フラクタルパラメータ Fractal Parameters	Safc SRC
形態パラメータ Feature Parameters	Spd Spc S5p S5v S10z
その他のパラメータ Miscellaneous parameters	Std



(a) 筋目が均一 Str=0.026



(b) 筋目が無秩序 Str=0.914

図 5.14 三次元表面性状を表現する評価指標の事例

表 5.12 テスト加工用ワークピースの加工表面の Str 値計算事例

	#1	#2	#3
Str	0.311	0.095	0.022
3D visualization image of machined surface			

表 5.13 銅電極の加工表面の Str 値計算事例

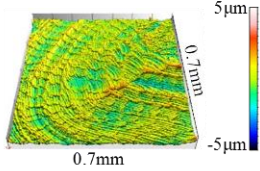
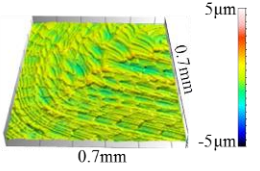
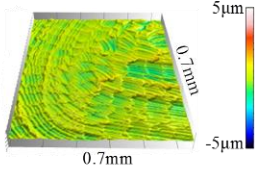
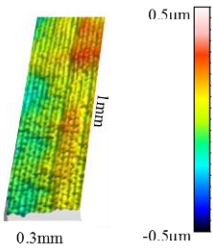
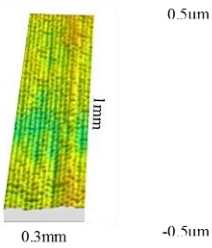
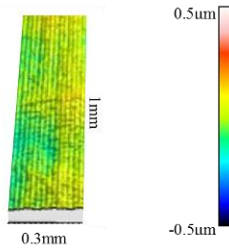
	#1	#2	#3
Str	0.692	0.573	0.462
3D visualization image of machined surface			

表 5.14 高級腕時計のベゼルの加工表面の Str 値計算事例

	#1	#2	#3
Str	0.124	0.171	0.186
3D visualization image of machined surface			

5.8 結言

本章では、第3章、第4章で実施した、慣性モーメント比がマシニングセンタの加工性能及び送り軸の挙動に与える影響に関する研究を、加工の種類を高品位加工に絞って集中的に議論した。具体的には、第3章、第4章と同様に慣性モーメント比の異なる3つのグループのサーボモータを順次小型立形マシニングセンタに搭載して高品位加工を行ったが、本章に於いては実在する、或いはそれを模した4種類のワークピース群を使用して実加工を実施し、加工面品位を第3章、第4章と同様の方法で測定評価し、4種類の結果を比較検証した。

本章の中心となる5.2節～5.4節に於いては、サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比がテーパ面や曲面の高品位加工に与える影響を、現実に近い実加工実験を通して考察した。この結果、第3章、第4章で論じた高品位加工に関する慣性モーメント比の議論が更に裏付けられた。即ち、高品位加工では、慣性モーメントの比較的大きなサーボモータ、即ち機構部の送り軸の慣性モーメントとの慣性モーメント比を小さく抑えるサーボモータの選定が有効であるとの結論が、複数の実験を通して更に明確になった。

続く5.5節では、第2章～第4章と本章に於いて議論した項目の中から、特に高品位加工に関する内容を抽出して整理し、全体を通して骨子を総括した。また、慣性モーメント比の議論の総括に加えて、近年盛り上がりを見せる高品位加工市場の動向と具体的な加工対象を紹介し、この分野の研究の重要性を訴求した。更に、高品位加工に於いて、サーボモータも含めて加工面品位に影響を与える構成要素の全体像の提示、或いはその加工面品位の客観的かつ定量的な評価指標の確立など、この分野に於ける今後の必須課題を明確にした。

5.5.3節で論じた高品位加工に影響を与える要素の全体像と5.5.4節で論じた高品位加工の加工結果の定量的評価指標に関しては、各々5.6節及び5.7節で更に具体的に考察を行った。5.6節では、高品位加工に影響を与える要素の何が適切でない場合に加工面がどう乱れるかの相関の例を、また5.7節では、国際規格ISO25178に記載された加工面品位の評価指標の候補を列挙した。5.6節、5.7節は、共にこれまで必要性はありながらもあまり具体的、定量的に議論されて来なかった課題であり、今後も継続的な研究が必要となる分野である。

第2章～第4章及び本章が、ハイサイクル加工用或いは高精度高品位加工用のマシニングセンタの設計、及びその際のサーボモータの選定の指針の一つとなれば幸いである。また、今なお目視による官能検査が評価の中心となる高品位加工の現場に於いて、工作機械や制御装置の加工性能評価のための一つの評価手法として有効に活用されれば幸いである。しかしながら、高品位加工に関する研究は本章も含めて未だスタート地点に着いたばかりである。この研究を今後も継続し、加工現場で実際に役立つ研究を進めて行きたいと考える。

第6章 結論

6.1 本研究で得られた主な結論及び新たに考案した手法

6.1.1 本研究で得られた主な結論

6.1.2 本研究で新たに考案した手法

6.2 本研究で残された研究課題及び本研究を超えた研究課題

6.2.1 本研究で残された研究課題

6.2.2 本研究を超えた研究課題

第6章 結論

6.1 本研究で得られた主な結論及び新たに考案した手法

これまで、サーボモータの特性とそれが搭載された工作機械の送り軸との適合性、という観点から論じられた文献、論文は少なく、特にサーボモータの慣性モーメントと工作機械の加工性能の関係に関して、経験則は存在するものの、これを定量的に論じた研究はなされていない。そこで本研究では、慣性モーメントの異なるサーボモータと、工作機械の代表例であるマシニングセンタの準備、そして加工結果の評価方法の提案まで、多くの難作業を克服しながら、この課題、即ち慣性モーメントが工作機械に与える影響の研究に取り組んだ。

その結果、サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関して、一般的に知られていた経験則が、簡単な力学モデルによる考察、実際に加工現場で稼働しているマシニングセンタの調査と分析、実加工実験による加工結果、その際の送り軸の挙動の測定結果という複数の観点からの検証により、定量的に裏付けられた。更に、高品位加工という新しい領域に関してより詳しく考察し、従来目視による外観検査のみで評価されていた加工面品位に関して、実加工実験を通じて一つの定量的な評価手法を提案した。

6.1.1 本研究で得られた主な結論

本研究の中心となる第2章～第5章で実施した主な研究内容は、以下の通りである。

第2章 サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比

まず、サーボモータとマシニングセンタの機構部の送り軸との慣性モーメント比に関して簡単な力学モデルを用いた考察を行い、次に、実際に加工現場で稼働する合計12機種のマシニングセンタを対象として、搭載されたサーボモータとマシニングセンタの機構部の送り軸との慣性モーメント比を考察した。最後に、力学モデルによる考察結果と実際のマシニングセンタの考察結果を比較し検証した。本章で、サーボモータとマシニングセンタの機構部の送り軸との慣性モーメント比に関する既存の経験則を、まずは概略的に裏付けた。

第3章 慣性モーメント比の違いがマシニングセンタの加工性能に与える影響

まず、慣性モーメントのみが異なり他の特性がほぼ同一の3グループのサーボモータと、実加工が可能な小型立形マシニングセンタを準備し、次に、その3グループのサーボモータを順次小型立形マシニングセンタに載せ替えて、部品加工市場に必要なハイサイクル加工、金型加工市場に必要な高精度高品位加工を順次実施した。そして、前者では加工時間、後者ではワークピースの加工精度と加工面品位を測定した。本章で実施した実加工実験により、慣性モーメント比に関する既存の経験則を、初めて具体的、定量的に実証した。

第4章 慣性モーメント比の違いがマシニングセンタの送り軸の挙動に与える影響とその評価のための計測システム

まず、第3章で実施した実加工実験を元に、機構部の送り軸の挙動を測定する手法、即ち送り軸の挙動を、サーボモータのエンコーダから得られるフィードバック信号を用いて定量的に測定する手法を提案し、次に、実際に第3章の加工プログラムとワークピースを用いて一連の測定を実施した。そして、第3章で実施した実加工実験と、本章で実施した送り軸の挙動測定に於ける長所、短所を比較し分析した。第3章に於いて実証した慣性モーメント比に関する既存の経験則を、本章では別の手法で実証し、第3章を更に裏付けた。

第5章 慣性モーメント比がマシニングセンタの高品位加工に与える影響の検証とその総括

本章では加工の種類を高品位加工に絞り、その代表例である高精度金型や高級腕時計など複数の実在する部品或いはそれを模したワークピースを用いて順次実加工実験を実施した。そして、一連の実加工実験の結果を整理し、結果を考察した。本章では、第3章、第4章で展開した、高品位加工に於ける慣性モーメント比の与える影響の検証を、複数の現実に近い加工部品の実加工実験を通じてより明確に裏付けた。そして最後に、高品位加工の全体像を考察すると共に、その定量的評価指標に関する今後の課題を整理して明らかにした。

そして、第2章から第5章の研究で得られた結論を総括すると、以下の通りとなる。

- (1) サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関して、マシニングセンタが加減速性能を重視する場合には、慣性モーメント比を大きくする、即ち慣性モーメントの小さなサーボモータの選定が、制御性、特に外乱抑圧性を重視する場合には、慣性モーメント比を小さくする、即ち慣性モーメントの大きなサーボモータの選定が推奨される、という経験則が、多角的かつ定量的に実証された。
- (2) 慣性モーメント比は、そのマシニングセンタの目指す加工性能やコストにもよるが、一般的に0.5~5程度が目安であり、加減速を重視する場合には1.5~5、制御性、特に外乱抑圧性を重視する場合には0.5~1.5が推奨範囲となり、更に、加工面品位を重視する高品位加工では、そのサーボモータのコストやサイズが許容される範囲で1.0未満が推奨範囲となる、という経験則が、多角的かつ定量的に実証された。
- (3) マシニングセンタの機構部が比較的単純な構造の場合には、送り軸の制御系はねじり剛性を持つ機構要素で結合した2慣性系と見なしての検証が可能で、この仮定の元で、制御性の指標である共振比に関する計算結果と実験結果の傾向は一致する。しかし、計算を更に高精度に行いたい場合、或いは大型機や複合機など単純でない構造を持つ工作機械を研究対象とする場合には、多慣性系を前提とした議論が必要となる。

- (4) マシニングセンタの加工性能の評価に於いて、実加工実験を実施してその結果を直接測定する手法と、機構部の送り軸の挙動を測定する手法とがある。大別して、サーボモータの与える影響のみを評価するには送り軸の挙動測定、工作機械の最終的な加工性能を評価するには実加工実験が適するが、マシニングセンタの性能を総合的に評価する場合には、これらの2つの手法を目的に応じて適切に組合せる事が重要である。送り軸の挙動測定システムには、サーボモータの与える影響のみを評価出来る長所に加えて、実加工実験と比較して少ない準備と短い時間で数多くの測定を行える、送り軸各軸の挙動を独立して表示出来るため、実加工実験では難しい各軸の挙動の把握が可能となるなどの長所もある。これにより、各軸の送りのうねりなどの分析が可能となり、サーボモータ或いは機構部の送り軸の最適化の検討も容易になる。
- (5) 近年その重要性が増している高品位加工では、慣性モーメント比をより小さく抑えるサーボモータの選定が特に重要になるが、一方でサーボモータと加工面品位との相関関係の把握と評価が難しいという課題がある。高品位加工の対象となる高精度金型や外観重視部品は、一般に単純な平面形状では構成されないため、測定機器による表面粗さなどの測定が困難になる場合が多い。この場合には、加工対象を直接測定しない送り軸の挙動測定システムがその有力な代替手段となる。加えて、送り軸の挙動測定システムでは、測定した位置偏差データが既に数値化されているため、二次元或いは三次元のデータに加工する事も可能である。この特徴を活かして、測定した位置偏差データを、実加工結果を撮像した三次元可視化画像と比較する事が出来る形式に加工するなど、特に高品位加工に於いて様々な目的に活用出来る可能性がある。
- (6) 高品位加工の面品位に影響を与える要素には、サーボモータとサーボ制御以外にも、加工プログラムとCNCの機能、機械剛性と主軸バランス、工具と工具ホルダ、主軸の回転速度や切り込み量などがある。高品位加工の構成要素の全体像の整理、及び何が適切でないと加工面がどう乱れるかの相関の究明は、今後の研究課題である。また、未だ完全に確立されていない加工面品位の定量的評価方法に関して、ISO25178に準拠した三次元表面性状を表現する空間パラメータ Str 値は、金属加工面の表面性状を表す評価指標の有力候補である。但し、これは加工面の一方向の筋目の均一さのみの評価指標なので、汎用的な適用は難しく、Str 値以外の空間パラメータや複合パラメータの検討も必要である。以上2点が、この分野に於ける今後の重要な研究課題である。

6.1.2 本研究で新たに考案した手法

本研究の第2章～第5章の過程で、慣性モーメント比が実加工性能に与える影響を調査し検証する手法として、以下の分析と実験の手法を新たに提案した。

- (1) マシニングセンタの機構部の送り軸を2慣性系の力学モデルで表現し、加減速性能と制御性の観点からの得失を計算し分析する方法を整理した。また、実際に加工現場で稼働するマシニングセンタの慣性モーメント比を調査し、ハイサイクル加工と高精度高品位加工に大別して調査し分析する方法を整理した。そして、前者即ち計算結果と後者即ち分析結果を比較して、両者の結果の妥当性を検証する手法を提案した。
- (2) 慣性モーメントのみが異なり他の仕様がほぼ同じのサーボモータを複数種類準備し、マシニングセンタに順次載せ替えて実加工実験を行いその差異を測定評価する手法を整理した。高精度高品位加工では、慣性モーメント比の違いが加工面に影響しやすい形状のワークピースを新たに提案した。また、送り軸を2慣性系で表現する妥当性を実証するための、総慣性モーメントを一定とした比較実験の手法も提案した。

また、本研究の第2章～第5章の過程で、高品位加工という従来独立して研究されていなかった領域に於いて、以下の実験と測定の手法を新たに考案した。

- (3) 測定評価の手法が確立されていない高品位加工に於いて、慣性モーメント比の違いが加工面品位に与える影響を検証する実加工実験の手法を考案した。具体的には、実在する或いはそれに近いワークピース、それらを実加工するための加工プログラム、各ワークピースの加工に適した固定治具と加工工具、様々な曲面で構成される各ワークピース上で加工面品位の評価に適切な箇所を選択など、必要要件を整理した。
- (4) 同じく高品位加工に於いて、目視による官能検査に替わる、加工面品位の新たな測定評価の手法を考案した。具体的には、送り軸の挙動を測定する測定システムを用いて得た位置偏差データを、二次元、三次元に変換し表示して、二次元では表面粗さ計を用いた面粗さの測定結果と、三次元では非接触三次元表面粗さ・形状測定機を用いた表面性状の三次元可視化画像と、直接比較が可能となる測定手法を考案した。

6.2 本研究で残された研究課題及び本研究を超えた研究課題

本研究では、2 慣性系の力学モデルによる慣性モーメント比の考察、実際に加工現場で稼働しているマシニングセンタの慣性モーメント比の調査と分析、そして何より慣性モーメントの異なるサーボモータと工作機械の代表例であるマシニングセンタの準備、その加工結果の評価方法の提案など、幅広い分野と項目にまたがる研究を実施した。そのため、6.1 節で整理した、慣性モーメント比に関しての明快で有用な結論と今後活用可能な手法を得た一方、本研究では実施に至らず、別途研究が望まれる幾つかの課題がある事も確認された。

また、今後本研究及び関連する研究を超えて更に展開されるべき課題として、その市場が急拡大すると予想される高品位加工分野に関する展望と方向性についても議論した。具体的には、加工面品位に影響を与える構成要素の全体像の把握及びそれら構成要素と加工面品位との相関関係の究明、そして従来目視による外観検査を中心に評価されていた加工面品位の定量的評価指標の確立である。これらの 2 つのテーマは、いずれ劣らぬ難題であるが、その研究成果は、高品位加工の加工現場で実際に極めて有用で有効な知見となると考える。

6.2.1 本研究で残された研究課題

本研究の過程で確認された、残された研究課題は、以下の通りである。

(1) 工作機械用サーボモータの選定手法の確立

工作機械の送り軸にサーボモータを選定する際の評価指標、即ち慣性モーメント比は 0.5~5 程度に収まる範囲とし、高精度高品位加工の場合には 0.5~1.5 とするとといった指標を更に体系立て、工作機械用サーボモータの選定手法として確立する。

(2) 工作機械の表現に最適な力学モデルの検証

標準的な工作機械の送り軸は 2 慣性系の力学モデルで表現可能として、大型工作機械では 3 慣性系で表現するべきか否か、リニアスケールを搭載したフルクロード機やリニアモータ駆動機の場合はどうかなど、本研究の検証を更に横展開する。

(3) 工作機械の加工点の挙動を実測定した結果との比較検証

工作機械の機構部の送り軸の挙動を測定する測定システムに関連して、ダブルボールバー装置 (DBB) 或いはレーザ測長機などを使用して、加工点の挙動を直接観測し、機構部の送り軸の挙動、加工点の挙動、実加工結果の三者を比較検証する。

(4) 実際の工作機械を使用した実加工実験の代替手段の考案

上記(1)(2)(3)をシミュレーションで検証可能とし、実加工実験を代替する。

6.2.2 本研究を超えた研究課題

今後、本研究を超えて展開されるべき研究課題は、以下の通りである。

高品位加工に影響を与える要素の全体像

第5章の図5.7及び図5.8で、高品位加工に必要な構成要素として現在考えられる全体像を示した。図5.7の右側が、加工プログラム、CNC、サーボ、即ち数値制御に関連する要素、左側が、工作機械、加工工具、加工条件、即ち機械と加工に関連する要素である。しかし、まず全体像を描いてはみたものの、現実問題として、加工面品位に影響を与える構成要素と加工結果との相関、即ち構成要素の選定が不適切な場合や仕様が十分でない場合に発生する可能性のある加工面の乱れや筋目の発生との相関関係の究明は、大変な難題である。

まず何より、図5.7で構成要素が既に6項目あり、しかもそれらの中に更に複数の要素がある。かつ、それらの要素と加工結果との相関の多くは、実際に数多くの実加工実験を実施しないと把握出来ない。例えば、加工工具の選択や性能と実際の加工結果との相関は、正に実加工を実施しないと明らかにならない。そのため、現在の高品位加工の現場では、満足な加工結果が得られない場合、これまでの経験に基づいて個別に対策を取っているのが実情であり、複数の構成要素が絡んだ場合では適切な対策が分からなくなる事例もある。

この様に、高品位加工の構成要素と加工結果との相関関係の究明は大変な難題だが、近年それに向けた具体策も講じられている。例えば、CAM、CNCではシミュレーション機能の開発が進み、数値制御に関する要素と加工結果との相関の一部が実加工を伴わずに把握されつつある。また、測定機器の高性能化やネットワーク対応に伴い、実加工実験の高効率化や無人化も進んでいる。数理的な検証を論拠とする前提で、機器の進化を活用してより多くのデータを取得出来れば、高品位加工分野の研究もまた急速に進展すると期待される。

高品位加工の加工結果の定量的評価指標

同じく第 5 章の後半部で述べた様に、高品位加工の加工結果の評価指標として、表面粗さ R_a , R_z が使用される事が多いが、最近では所定の幅に於ける表面粗さ S_a , S_z が使用される場合もある。いずれの評価指標も、加工面の粗さ、凹凸の深さを示す指標であり、見た目の加工面の綺麗さとは必ずしも一致しない。例えば、 R_a や S_a が $2\sim 3\mu\text{m}$ 未満の加工精度は、絶対精度としては一般的に高精度だが、仕上げ加工面では、仮に $2\sim 3\mu\text{m}$ 未満でも短周期の凹凸が存在すれば、目視では筋目があり面品位が悪いと評価される場合が多い。

加工面品位の定量的な評価指標として、第 5 章の図 5.13 で紹介した三次元可視化画像測定装置と、この装置が有する国際規格 ISO25178 に準拠した三次元表面性状を表現する様々なパラメータの算出機能は、本課題の有効な解決策となる可能性がある。但し、この方法は、加工面の状態をその凹凸も含めて可視化して観察出来るという点では画期的であるが、その加工面の状態と目視による官能検査の結果とを関連付けてはいない。可視化された加工面の状態と、目視による滑らかさ、筋目のなさなどとの関連付けが、次なる課題となる。

高品位加工の定量的評価の難易度を高めるもう一つの要因として、高品位加工を実施するワークピースの多くが三次元曲面形状である点が挙げられる。接触式の表面粗さ計は当然として、非接触の三次元可視化画像測定装置でさえ、曲率の大きな曲面や深い凹形状の曲面の測定は現時点では不可能である。第 5 章で言うなら、図 5.1 の銅電極、図 5.4 の高級腕時計のベゼルで、可視化画像の撮像が可能な加工面は、測定装置の仕様上の制約から全体の一部に限られる。これらの測定装置の、今後の更なる開発改良にも大いに期待したい。

参考文献

- 1) 大木創, 田中国昭: 電気機器論, 実教出版, (1984).
- 2) 杉本英彦, 小山正人, 玉井伸三: AC サーボシステムの理論と設計の実際, 総合電子出版, (1990).
- 3) T. Ohnishi, et al. : Optimal Design of Efficient IPM Motor Using Finite Element Method, IEEE Transactions on Magnetics, 36, 5 (2000) 3537-3539.
- 4) D. Kim, et al. : Optimal Shape Design of Iron Core to Reduce Cogging Torque of IPM Motor, IEEE Transactions on Magnetics, 39, 3 (2003) 1456-1459.
- 5) 松原厚: 精密位置決め・送り系設計のための制御工学, 森北出版, (2008).
- 6) 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),
-送り駆動機構のモデル化とパラメータの同定-, 60, 8 (1994) 1097.
- 7) 増田隆広, 有本卓, 宮崎文夫: 駆動要素の特性を考慮したロボットマニピュレータの動力学解析, 日本ロボット学会誌, 9, 3 (1991) 261-266.
- 8) 伊沢一康, 中山泰喜, 金子敏夫, 青木克巳: 高次サーボ系の応答特性に与える負荷の剛性と慣性の影響, 日本機械学会論文集 C 編, 55, 513 (1989) 1242-1247.
- 9) 根深鉄平, 田中秀岳, 柳和久: 小径エンドミルの回転振れ軌跡と切れ刃プロファイルに基づく加工面性状の推定 (第1報), 精密工学会誌, 75, 5 (2009) 645-649.
- 10) ニノ宮進一, 水越啓介, 金子俊朗, 萩原裕人, 高味寿光: PCD 回転工具による超硬合金製金型の直彫り加工面特性, 精密工学会春季大会学術講演会論文集, (2013) 251-252.
- 11) 細川匡彦, 佐野雅文, 岩下平輔, 豊沢雪雄, 前田和臣: 高生産性・高精度を実現する部品加工学習制御, FANUC Technical Review 18, 1 (2005).
- 12) 岩下平輔, 置田肇, 河村宏之, 猪飼聡史: 大型サーボモータ駆動用のサーボ制御, FANUC Technical Review 19, 1 (2006).

- 13) 岩下平輔, 置田 肇, 秋山隆洋, 杉山和之: サーボ調整ツール FANUC サーボガイド, FANUC Technical Review 20, 1 (2007).
- 14) 曾我部正豊, 志村孔史, 東條敬一郎, 岩下平輔, 豊沢雪雄, 園田直人: リニアモータ, DDモータへの学習制御の適用, FANUC Technical Review 20, 2 (2007).
- 15) 井出総一郎, 遠藤貴彦, 花岡修, 木下次郎, 手塚淳一: 高品位加工を実現する CNC 技術, FANUC Technical Review 23, 1 (2015).
- 16) 岩下平輔, 東條敬一郎, 鴻上弘, 山本致良, 高山賢一, 中村稔: 高品位加工を実現するサーボ技術, FANUC Technical Review 23, 1 (2015).
- 17) 奥田真司, 前川進, 長尾明彦, 政川高志: ロボドリルによる高品位加工, FANUC Technical Review 23, 1 (2015).
- 18) 山田雄基, 山本智之, 柿沼康弘, 飯島一憲, 岩下平輔, 須藤雅子: 工作機械用軽量化ステージにおける制御手法の検討, 生産加工・工作機械部門講演会, 生産と加工に関する学術講演会, 2016, 11, 日本機械学会, (2016).
- 19) 結城和明, 村上俊之, 大西公平: 共振比制御による 2 慣性共振系の振動抑制制御, 電学論 D, 113, 10 (1993) 1162.
- 20) 堀洋一: 共振比制御と真鍋多項式による 2 慣性系の制御, 電学論 D, 114, 10, (1994) 1038.
- 21) 章国光, 古荘純次, 梶谷誠: 反共振・共振特性によるサーボ制御系の設計, 日本機械学会論文集(C編), 64, 619 (1998 3) No.96-1861.
- 22) 松原厚, 茨木 創一, 垣野 義昭, 遠藤 雅也, 梅本 雅資: デュアルアクチュエーションによる NC 工作機械送り系の振動制御(第 1 報)ー相対速度フィードバックによる 2 慣性系の減衰制御ー, 精密工学会誌, 69, 3 (2003) 422.
- 23) 山田翔太, 藤本博, 堀洋一: 高分解能エンコーダの適用による駆動側情報を用いない 2 慣性系の制振制御法, 電学論 D, 135, 3 (2015) 212.
- 24) 曾我部正豊, 岩下平輔, 園田直人, 垣野義昭: リニアモータ駆動におけるタンDEM制御に関する研究, 精密工学会誌, 73, 5 (2007) 605.
- 25) 岩下平輔, 中邨勉, 猪飼聡史, 高山賢一: NC 工作機械の送り軸のための 2 慣性系モデルによる低周波振動抑制制御の研究, 精密工学会誌, 82, 8 (2016) 745.

- 26) 岩下平輔, 飯島一憲: ボールねじの静特性に起因するロストモーション補償による工作機械テーブル駆動系の高精度軌跡制御, 精密工学会誌, 82, 9 (2016) 828.
- 27) 岩下平輔, 恒木亮太郎, 猪飼聡史, 飯島一憲, 園田直人: 永久磁石同期電動機の高精度駆動のための電圧飽和を回避し磁気飽和を考慮した電流制御パラメータ決定法, 精密工学会誌, 83, 7 (2017) 706.
- 28) 岩下平輔, 飯島一憲, 園田直人: 制御周期のナイキスト周波数を超える共振周波数を有する DD テーブル駆動系の振動モードの特定による連続軌跡制御の高精度化, 精密工学会誌, 83, 11 (2017) 1033.
- 29) 水門正良: 低慣性サーボモータとボールねじ駆動方式による超高速マシニングセンタの設計, 機械設計, 41, 9 (1997) 69-73.
- 30) 高橋和也, 崔成日, 堤正臣: ロータリエンコーダを用いたサーボ傾斜角度計の開発, 精密工学会学術講演会講演論文集, 精密工学会秋季大会, (2007) 17-18.
- 31) 中川平三郎, 角田優介, 垣野義昭, 松原厚: マシニングセンタを用いた切削抵抗・切削現象のモニタリング, 精密工学会学術講演会講演論文集, 精密工学会秋季大会, (2004) 205.
- 32) 内田裕之, 岩下平輔, 植松秀俊, 川合康夫, 佐久間一郎: サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関する研究, 精密工学会誌, 84, 4 (2018).
- 33) 内田裕之, 植松秀俊, 川合康夫, 長尾明彦, 佐久間一郎: サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関する研究 (第2報), 精密工学会誌, 85, 6 (2019).
- 34) 内田裕之, 岩下平輔, 手塚淳一, 川合康夫, 佐久間一郎: サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関する研究 (第3報), 精密工学会誌, 85, 11 (2019).
- 35) 内田裕之, 岩下平輔, 川合康夫, 長尾明彦, 佐久間一郎: サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関する研究 (第4報), 精密工学会誌, 86, 10 (2020).
- 36) Yuqing Zhou, et al. : Feed-axis gearbox condition monitoring using built-in position sensors and EEMD method, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 27, 4 (2011) 785-793.
- 37) Ryuta Sato : Sensor-less estimation of positioning reversal value for ball screw feed drives, Precision Engineering, 60 (2019) 116-120.

- 38) Y. Altintas : Manufacturing automation (Second edition), Cambridge university press, (2012) 250-251.
- 39) H. T. Wang, et al. : Application of Taguchi Method to Robust Design of BLDC Motor Performance, IEEE Transactions Magnetics, 35, 5 (1999) 3700-3702.
- 40) Guoguang Zhang, et al. : Speed Control of Two-Inertia System by PI/PID Control, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 47, 3 (2000) 603-609.
- 41) H. C. Lai, et al. : Transient Analysis of an Electromagnetic Actuator Using an Overlapping Finite Element Scheme, IEEE Transactions on Magnetics, 36, 4 (2000) 1462-1467.
- 42) X. Gao, et al. : Structural Robust Design for Torque Optimization of BLDC Spindle Motor Using Response Surface Methodology, IEEE Transactions on Magnetics, 37, 4 (2001) 2814-2817.
- 43) Krzysztof Szabat, et al. : Vibration Suppression in a Two-Mass Drive System Using PI Speed Controller and Additional Feedbacks - Comparative Study, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 54, 2 (2007) 1193-1206.
- 44) Hai-Hua Mu, et al. : Calibration and compensation of cogging effect in a permanent magnet linear motor, Mechatronics, 19, 4 (2009) 577-585.
- 45) R. J. E. Merry, et al. : Velocity and acceleration estimation for optical incremental encoders, Mechatronics, 20, 1 (2010) 20-26.
- 46) Hongzhong Zhu, et al. : Velocity Estimation of Motion Systems Based on Low-Resolution Encoder, Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 135, 1 (2013).
- 47) J. Y. Kao, et al. : A STUDY OF BACKLASH ON THE MOTION ACCURACY OF CNC LATHES, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 36, 5 (1996) 539-550.
- 48) Hyuk Lim, et al. : Torsional displacement compensation in position control for machining centers, Control Engineering Practice, 9, 1 (2001) 79-87.
- 49) G. Holroyd, et al. : Modelling the dynamic behaviour of a ball-screw system taking into account the changing position of the ball-screw nut, Transactions on Engineering Sciences, 44 (2003).

- 50) Jozef Vörös : Modeling and identification of systems with backlash, *Automatica*, 46, 2 (2010) 369-374.
- 51) Y. Altintas, et al. : Machine tool feed drives, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60, 2 (2011) 779-796.
- 52) Jerzy Z. Sobolewski : Vibration of the ball screw drive, *Engineering Failure Analysis*, 24 (2012) 1-8.
- 53) Hans-Christian Möhring, et al. : Materials in machine tool structures, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 64, 2 (2015) 725-748.
- 54) Nannan Xu, et al. : Modeling analysis and experimental study for the friction of a ball screw, *Mechanism and Machine Theory*, 87 (2015) 57-69.
- 55) Chao Sun, et al. : Chatter free tool orientations in 5-axis ball-end milling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 106 (2016) 89-97.
- 56) Philipp Esch, et al. : Methodic development of laser micro structured cutting tools with microscale textures for AW7075 aluminum alloy using a Plackett-Burman screening design, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 32 (2021) 188-195.
- 57) Peter de Groot, et al. : Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain, *Journal of Modern Optics*, 42.2 (1995) 389-401.
- 58) Felix Kühn, et al. : Model for the calculation of kinematic roughness in the tooth root, *Procedia CIRP*, 79 (2019) 15-20.
- 59) Tingting Zhang, et al. : Investigation on the load-inertia ratio of machine tools working in high speed and high acceleration processes, *Mechanism and Machine Theory*, 155 (2021) 104093.
- 60) Jeff Moscrop, et al. : AN ANALYSIS OF MOTOR/LOAD INERTIA MISMATCH IN MACHINE TOOL SERVO SYSTEMS, *IFAC Proceedings*, 33 , 26 (2000) 229-234.
- 61) ファナック : FANUC AC SERVO MOTOR α i-B series 仕様説明書 B-65262JA/09, (2014).
- 62) ファナック : FANUC AC SERVO MOTOR β i-B series 仕様説明書 B-65302JA/07, (2014).

- 63) 三菱電機：三菱汎用 AC サーボ MELSERVO-J3, (2012).
- 64) 三菱電機：三菱数値制御装置 MDS-D/DH シリーズ 仕様説明書 IB-1500874-D.
- 65) SIEMENS : SINAMICS S120 1FT7 synchronous motors (PFT7S)
01/20096SN1197-0AD13-0BP2.
- 66) SIEMENS : SINUMERIK & SINAMICS Equipment for Machine Tools, Catalog News
NC 61 N - August 2012.
- 67) ファナック：FANUC ROBODRILL α -DiB5 series 取扱説明書 B-85444JA/01, (2017).
- 68) ファナック：FANUC ROBODRILL α -DiB5 Plus series 取扱説明書 B-85524JA/01,
(2020).
- 69) 牧野フライス：立形マシニングセンタ V33i, M-388-2b 1208/3(V-D).
- 70) DMG 森精機：立形マシニングセンタ CMX V Series, CMXV-JA03D, (2017).
- 71) 牧野フライス：微細 精密 加工機 iQ300, M-415g 1405/1(V-D).
- 72) 東芝機械：超精密マシニングセンタ UVM series, UVM0014-CJD-03.
- 73) 安田工業：YASDA MICRO CENTER YMC 430, YMC430 V2-J-07-N4, (2014).
- 74) 碌々産業：超高精度高速微細加工機 Vision, Vision-JPN1.0.
- 75) 青戸智浩：白色干渉技術による非接触粗さ・形状測定, 型技術, 32,10 (2017)51-53.
- 76) 石井耕一, 佐藤敦：3次元光学プロファイルによる表面測定技術--Zygo NewView に
よる表面粗さ測定事例の紹介,計測技術, 35, 13 (2007) 24.
- 77) 高谷裕浩：金型加工技術の最新潮流をさぐる金型づくりの高度化と光計測活用技術,
機械技術, 68, 8, (2015) 26-31.
- 78) 小野田有吾：走査型白色干渉顕微鏡”VS1000”シリーズによる先進材料の表面形状・
層断面計測, SCIENTIFIC INSTRUMENT NEWS, 59, 2 (2016).
- 79) キーエンス：表面粗さ測定入門 面粗さ編, K3625AS-1073-3 (2012).
- 80) 島津製作所：走査型レーザー顕微鏡の技術と応用, 九州大学中央分析センターニュース
122, 32 (2013).

- 81) 佐藤敦：非接触による三次元表面性状の測定の現状－三次元規格の意義とものづくりへの活用－，精密工学会誌, 81, 10 (2015) 922-925.
- 82) 石下雅史：超解像顕微鏡技術(WLI/SIM)を用いた微細 3D 形状測定，精密工学会誌, 86, 7 (2020) 520-523.
- 83) JIS B 0651 : 2001, 製品の幾何特性仕様 (GPS) - 表面形状：輪郭曲線方式-接触式表面粗さ測定機の特性.
- 84) ISO/DIS 25178-1 : 2013, Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture : Areal - Part 1 : Indication of surface texture.
- 85) ISO 25178-2 : 2012, Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture : Areal - Part 2 : Terms, definitions and surface texture parameters.
- 86) ISO 25178-3 : 2012, Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture : Areal - Part 3 : Specification operators.
- 87) ISO 25178-6 : 2010, Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture : Areal - Part 6 : Classification of methods for measuring surface texture.
- 88) ISO 25178-70 : 2014, Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture : Areal - Part 70 : Material measures.

研究業績

学術誌論文（査読あり）

- 1) 内田裕之, 岩下平輔, 植松秀俊, 川合康夫, 佐久間一郎：サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関する研究, 精密工学会誌, 84, 4 (2018).
- 2) 内田裕之, 植松秀俊, 川合康夫, 長尾明彦, 佐久間一郎：サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関する研究（第2報）, 精密工学会誌, 85, 6 (2019).
- 3) 内田裕之, 岩下平輔, 手塚淳一, 川合康夫, 佐久間一郎：サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関する研究（第3報）, 精密工学会誌, 85, 11 (2019).
- 4) 内田裕之, 岩下平輔, 川合康夫, 長尾明彦, 佐久間一郎：サーボモータとマシニングセンタの送り軸の慣性モーメント比に関する研究（第4報）, 精密工学会誌, 86, 10 (2020).

学術誌寄稿（査読なし）

- 1) Hiroyuki Uchida, Youichi Amemiya : FANUC-the planning and development of a highly advanced robotized production system for servo motors, Assembly Automation, 18.4 (1998) 270.
- 2) 雨宮洋一, 内田裕之, 福田好朗：精密工学の最前線 ロボット化の最先端工場, 精密工学会誌, 65, 5 (1999) 633.
- 3) 稲葉善治, 宮田光人, 内田裕之, 二瓶亮：CNC, サーボ, ロボット, ロボショットの技術開発の歩み, 精密工学会誌 75.1 (2009) 117.
- 4) 内田裕之, 曾我部正豊：精密工学におけるリニアモータ, 精密工学会誌, 75, 2 (2009) 242.
- 5) 内田裕之, 野田浩, 岩下平輔, 菱川哲夫：ファナックが提供する先進パワーモーションコントロール技術, 精密工学会誌 77, 5 (2011) 457.

学会表彰（査読なし）

- 1) 内田裕之, 藤元明彦, 小嶋邦夫, 修正, 前川進：日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門一般表彰, 部門先端技術表彰, 技術名「小型切削加工機ロボドリル」(2019).

会議発表（査読なし）

- 1) H. Uchida, M. Sogabe and H. Kougami：High-speed, high-precision servo system, 8th ICPE (International Conference on Precision Engineering) (1997).
- 2) 内田裕之：電動プレス, 射出成形機用大容量サーボモータ, モータ技術シンポジウム (2004).
- 3) 内田裕之：大容量サーボモータの動向と適用事例, モータ技術シンポジウム (2005).
- 4) 内田裕之：大容量サーボシステムの動向と適用事例, モータ技術シンポジウム (2006).
- 5) 内田裕之：大容量サーボの最新の技術動向と今後の展開, モータ技術シンポジウム (2007).
- 6) 内田裕之：大容量サーボの最新の技術動向と応用分野の広がり, モータ技術シンポジウム (2008).
- 7) 内田裕之：独創的なファナックのもの創り, 高度なロボット化・自動化の推進, モータ技術シンポジウム (2011)

技報（査読なし）

- 1) 曾我部正豊, 内田裕之, 山本致良, 岡本敬：高速位置決め用低慣性 AC サーボモータ FANUC AC SERVO MOTOR L series, FANUC Technical Review, 6, 1 (1993)
- 2) 曾我部正豊, 内田裕之, 岡本敬, 植松秀俊：工作機械の軸送り用 AC サーボモータ FANUC AC SERVO MOTOR α series, FANUC Technical Review, 7, 2 (1994)
- 3) 内田裕之, 松原俊介, 遠藤裕一, 武田栄海, 稲葉樹一：パワーモーション用コントロールモータ FANUC CONTROL MOTOR β series, FANUC Technical Review, 9, 1 (1996)

- 4) 内田裕之, 松原俊介, 勝沢幸男, 岩下平輔, 河野新一, 谷口満幸: 高速, 高精度, 高効率の AI ナノ制御 FANUC SERVO MOTOR α i series, FANUC Technical Review, 14, 1 (2001)
- 5) 内田裕之, 松原俊介, 堀越眞一, 山田裕一, 岡本敬: 世界最大の超大型サーボモータ α 2000HViS, α 3000HViS, FANUC Technical Review, 17, 2 (2004)

国内特許

- 1) 竹腰吉孝, 内田裕之: 磁気式パルスコーダ, 特許第 1446444 号, 1988/6
- 2) 内田裕之: 耐雑音形光学式エンコーダ, 特許第 1687102 号, 1992/8
- 3) 竹腰吉孝, 内田裕之: 磁気パルスエンコーダ用の磁気抵抗効果素子が装着された回路板, 特許第 1693824 号, 1992/9
- 4) 竹腰吉孝, 内田裕之: 磁気式パルスエンコーダ, 特許第 1693832 号, 1992/9
- 5) 内田裕之: 同期電動機のラジアルタイプロータ, 特許第 1944712 号, 1994/10
- 6) 内田裕之: パルスエンコーダを有するデジタルサーボシステムの速度制御装置, 特許第 1941269 号, 1995/6
- 7) 内田裕之: 光学式ロータリエンコーダ, 特許第 1950964 号, 1995/7
- 8) 田上潔, 内田裕之: 同期電動機のロータ, 特許第 02574007 号, 1996/10
- 9) 内田裕之: 異常電流に対するサーボシステム保護装置, 特許第 02575164 号, 1996/10
- 10) 曾我部正豊, 奥田兼正, 内田裕之, 仁科雅司, 山本致良: 一体成形コネクタを有したモータの構造, 特許第 02598130 号, 1997/1
- 11) 内田裕之: 過電流に対するサーボモータ保護制御装置, 特許第 02617963 号, 1997/3
- 12) 奥田兼正, 内田裕之: ラジアルタイプのロータ構造, 特許第 02619572 号, 1997/3
- 13) 内田裕之: 電磁ブレーキ, 特許第 02669748 号, 1997/7
- 14) 内田裕之, 山本致良, 岡本敬: 同期電動機のロータ構造, 特許第 02672178 号, 1997/7
- 15) 内田裕之: 電動機の液冷手段とその製造方法, 特許第 02718581 号, 1997/11
- 16) 内田裕之: コギングトルクを低減可能な同期電動機, 特許第 02721061 号, 1997/11

- 17) 内田裕之, 山本致良, 岡本敬: 同期機のロータとその製造方法, 特許第 02732740 号, 1997/12
- 18) 岩松登, 内田裕之: 同期式モータのステータ巻線配置方法, 特許第 02765764 号, 1998/4
- 19) 内田裕之, 岡本敬: 永久磁石形同期電動機, 特許第 02786059 号, 1998/5
- 20) 内田裕之, 岡本敬: 同期機のロータとその製造方法, 特許第 02795572 号, 1998/6
- 21) 内田裕之: 同期電動機のロータ, 特許第 02795576 号, 1998/6
- 22) 内田裕之, 山本致良, 岡本敬: 同期電動機のラジアルタイプローター, 特許第 02851731 号, 1998/11
- 23) 内田裕之, 山本致良, 田巻毅: 電動機の鉄心の絶縁部材, 特許第 02894967 号, 1999/3
- 24) 内田裕之, 仮屋功: 電動機の巻線温度検出素子の取付け方法および取付け具, 特許第 02921752 号, 1999/4
- 25) 内田裕之, 岡本敬, 山本致良: 同期電動機の機種拡張方法及び該拡張方法により製造される同期電動機, 特許第 02930556 号, 1999/5
- 26) 内田裕之, 勝沢幸男, 中澤康之: 空冷式モータ, 特許第 02966799 号, 1999/8
- 27) 内田裕之, 岡本敬, 植松秀俊: 同期電動機のロータ, 特許第 03224890 号, 2001/8
- 28) 内田裕之: 交流電動機の電流制御装置, 特許第 03313139 号, 2002/5
- 29) 内田裕之, 勝沢幸男, 中澤康之: 機械側の軸とモータシャフト間の心出し構造, 特許第 03335550 号, 2002/8
- 30) 内田裕之, 山本致良, 田巻毅: 電動機用ケーブルクランプ, 特許第 03340212 号, 2002/8
- 31) 内田裕之, 植松秀俊: 同期電動機のステータ, 特許第 03432326 号, 2003/5
- 32) 内田裕之, 遠藤裕一: 同期電動機のステータの製造方法, 特許第 03569336 号, 2004/6
- 33) 内田裕之, 遠藤裕一, 武田栄海, 鴻上弘: 同期電動機のロータ, 特許第 03576295 号, 2004/7
- 34) 稲葉善治, 内田裕之, トウセイ, 黒濟泰彦, 伊藤正則: 工作機械システム, 特許第 06412185 号, 2018/10

業務経歴

1982年4月～ 株式会社富士通ファナック入社，サーボ技術部に配属

- ・アブソリュートパルスコーダを開発
- ・ACサーボモータSシリーズを開発
- ・ACサーボモータ α シリーズを開発

1996年6月～ サーボ研究所を担当

- ・大型サーボモータ α シリーズを開発
- ・リニアモータLシリーズを開発
- ・DDモータDシリーズを開発
- ・ACサーボモータ αi シリーズを開発

2012年6月～ ロボマシン研究所を担当

- ・ロボドリル α -DiA/ α -DiB/ α -DiB Plus シリーズを開発
- ・ロボショット α -SiA/ α -SiB シリーズを開発
- ・ロボカット α -CiA/ α -CiB/ α -CiC シリーズを開発
- ・ロボナノ α -NMiA/ α -NTiA を開発

2016年6月～2021年6月 CTOを兼務

- ・信頼性評価棟の建設と商品評価センターの設立を企画
- ・ロボマシンとロボットのQSSRコンセプトを企画
- ・CNCとロボットコントローラのQSSRコンセプトを企画

(注) QSSR=Quick and Simple Start-up of Robotization

謝辞

本研究を推進するにあたり、常に誠心誠意のご指導とご高見を賜りました東京大学大学院工学系研究科 精密工学専攻 佐久間 一郎 教授に、心より感謝申し上げます。

また、本論文を執筆するにあたり、様々な観点から貴重なご意見とご指導を頂きました、東京大学大学院工学系研究科 精密工学専攻 浅間 一 教授、予備審査及び本審査に於いて、豊かな知見、経験を元に様々なご助言を頂きました國枝 正典 教授、山本 晃生 教授、東京大学大学院工学系研究科 機械工学専攻 杉田 直彦 教授に、深く感謝申し上げます。

皆様の広い見識と深い考察により、本論文の全体を通してその論旨が一貫し、また各章に於いて理論的或いは定量的な裏付けが不足している点が明確になり、更に本論文の後半で、高品位加工という今後の有望な研究分野に於いて、より深い検証を重ねる事が出来たため、本研究全体の学術性、先進性、有用性を高める事が出来ました。

本研究の着手をご推奨頂いた、ファナック株式会社代表取締役会長 稲葉 善治 工学博士、後押し頂いた代表取締役社長 兼 CEO 山口 賢治 氏に、心より感謝申し上げます。

博士論文の作成に際して、先駆者として様々な知見と経験をご教示頂いた、ソフトウェア研究開発本部 岩下 平輔 工学博士、ロボマシン事業本部 高次 聡 工学博士、サーボ制御と機械加工の観点から多彩なご助言を頂いた、サーボ研究開発本部 置田 肇 氏、鴻上 弘 氏、ロボドリル研究開発本部 佟 正 氏、奥田 真司 氏に、深く感謝申し上げます。

また、様々な実験、測定、計算、調査に際してご支援頂いた川合 康夫 氏、長尾 明彦 氏、植松 秀俊 氏、手塚 淳一 氏、そして、中邨 勉 氏、渡邊 一裕 氏を始めとするサーボ研究開発本部、ロボドリル研究開発本部の皆様にも、深く感謝申し上げます。本論文が、両研究開発本部に於ける今後のこの分野での商品開発の一助となれば幸いです。

最後に、本研究を推進し本論文を執筆するにあたり、常に温かく見守り、時に折れそうになる筆者を力強く支えてくれた妻に感謝の意を表して謝辞とします。

2021 年吉日

内田 裕之

