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）*

—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—

内田裕之** 岩下平輔** 川合康夫** 長尾明彦** 佐久間一郎***

Study of the Moment of Inertia Ratio of Feed Axes of Machining Centers to Servo Motors (4th)
- Impact of the Moment of Inertia Ratio on the Fine Surface Machining of Machining Centers -

Hiroyuki UCHIDA, Yasusuke IWASHITA, Yasuo KAWAI, Akihiko NAGAO and Ichiro SAKUMA

In the former papers “Study of the Moment of Inertia Ratio of Feed Axes of Machining Centers to Servo Motors (2nd,3rd)”, the interrelation between the moment of inertia ratio of a machine feed axes to servo motors and actual cutting results by a machining center, and also machine feed axes movement driven by the servo motors is studied. The results of these trials show that the servo motors with relatively low moment of inertia contribute to high cycle machining, while those with relatively high moment of inertia contribute to high precision and fine surface machining.

Among those experiments, however, the ones about the fine surface machining were conducted with only one test workpiece. As the fine surface machining has been emerging as a key production technology for smart electronics devices as well as precision dies and molds, the experiments with actual workpieces machined in actual workshops are necessary to confirm the conclusion in the former papers. With this reason plural actual workpieces typically representing recent trend of the fine surface field are machined in this paper through the same process shown in the former ones.

Key words: servo motor, moment of rotor inertia, machining center, feed axis, smoothness of feed axis, fine surface machining, surface roughness, stripes on workpieces

1. 結 言

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が工作機械の加工性能に与える影響という観点からの文献、論文は多くない。そこで筆者らは、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研究第2報⁵⁾及び第3報⁶⁾で、慣性モーメントがマシニングセンタの加工性能と送り軸の挙動に与える影響を定量的に考察し、慣性モーメントの比較的小さいサーボモータ（送り軸との慣性モーメント比で1.5～5となる）は加工時間短縮に寄与し、大きいサーボモータ（送り軸との慣性モーメント比で0.5～1.5となる）は加工精度と面品位の向上に寄与するとの結論を得た。この結果は、同じく既報の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⁷⁾の結果とも合致した。

しかし、一連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⁸⁾が、高精度高品位加工では、図1に示す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ワークピースを使用しており、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、既報⁵⁾⁶⁾に於いて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検証を行う必要がある。

そこで本論文では、最近の高品位加工を代表する加工部品、或いはそれを模したワークピースを準備し、既報⁵⁾⁶⁾と同様の方法で実加工実験を実施する。具体的には、高精度銅電極金型、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既報⁵⁾⁶⁾と同様の方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

Fig.1 Workpiece for high precision and fine surface test machining

* 原稿受付 令和2年3月18日

掲載決定 令和2年6月15日

** 正会員 ファナック(株) (山梨県南都留郡忍野村)

*** 正会員 東京大学 (東京都文京区本郷 7-3-1)

Table 1 Specifications of installed servo motors

Motor group	Unit	#1	#2	#3
Outward appearance
		100mm	100mm	100mm
Maximum torque	Nm	35	32	32
Continuous rated torque	Nm	10	8	8
Moment of rotor inertia	$\times 10^{-3} \text{ kgm}^2$	0.68	1.17	2.57
Moment of rotor inertia with motor brake	$\times 10^{-3} \text{ kgm}^2$	0.75	1.24	2.64
Encoder resolution		24bit (1.6×10^7 /rev)

Fig.2 Overview of compact vertical machining center

Fig.3 Installed Servo motors in the machining center

これらの実加工実験により、既報⁵⁶⁾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が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、或いはそれに近い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は異なり、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、測定機器による加工面品位の測定に様々な制約と困難が伴う。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であればPCDボールエンドミル、アルミ材であればハール工具といった個別の準備が必要であり、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、この場合には工作機械の熱変位が加工結果に与える影響も考慮して検証する必要がある。以上の様な様々な課題、難題を克服して、筆者らは本研究を推進した。

2. 高品位加工に関する新たな実加工実験の準備と手法

筆者らは、既報⁵⁶⁾に於いて、慣性モーメント比の違いがマシニングセンタの実加工と送り軸の挙動に与える影響を考察した。しかし、一連の考察の中で、高精度高品位加工に於いては、図1に示す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ワークピースのみを使用したため、この分野の実情を十分把握したとは言い難い。そこで本論文では、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、或いはそれを模したワークピースを複数準備し、既報⁵⁶⁾と同様の方法で実加工実験を実施する。一連の実加工実験の複数の測定結果により、既報⁵⁶⁾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裏付ける。

2.1 高品位加工に関する実加工実験の準備

既報⁵⁶⁾と同様に、まずは3つのグループのサーボモータとマシニングセンタを準備する。準備したサーボモータの外観と主な仕様を表1に示す。次に、小型立形マシニングセンタの外観とその機構部へのサーボモータの配置の例を図2、図3に示す。また、マシニングセンタの機構部の送り軸3軸の慣性モーメントを表2に、送り軸3軸の慣性モーメントと表1のサーボモータ

Table 2 Moment of inertia of feed axes of machining center

	Unit	X	Y	Z
Moment of axis inertia	$\times 10^{-3} \text{ kgm}^2$	0.58	0.97	0.94

Fig.4 Moment of inertia ratio of feed axes to servo motors

タ#1, #2, #3との慣性モーメント比を図4に示す。但し、ワークピースに関してのみ、既報⁵⁶⁾で使用したテスト加工用のワークピース(図1に示す)の代わりに、2.2節以降で開示する、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4種類のワークピースを使用する。

2.2 実加工実験に使用するワークピース群

本論文の実加工実験用に準備した、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、一覧表として表3に示す。具体的には、高精度銅電極金型、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4種類であり、いずれもその主要部位に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。表3には、これらのワークピースで高品位加工を行った際の、着目する加工箇所と評価ポイントも示す。

2.3 各ワークピースで使用する治具と工具

既報⁵⁶⁾では、高品位加工の実験のために、ワークピースをマシニングセンタに固定する治具とその加工に最適な工具を準備した。本実験でも同様に、各々のワークピースに最適な固定治具と加工工具の準備が必須である。図5~図8の各々に於いて、各ワークピースの写真に加えて、その右側に、各々に適した固定治具と加工工具も並べて示している。また、図5~図8に於いて、各々の場合のワークピースと治具を含むX, Y, Z各軸の慣性モーメント比を、各々表4に一覧表として示す。表4に於いて、ペットボトル用の金型以外では数値が同じだが、これはワークピースを固定する治具の重量が、他の3種類と比較して際立って重いためである。それを加味しても、総じて慣性モーメント比が小さい事が表4より読み取れる。高品位加工では、この様な小さい慣性モーメント比は一般的である。

2.4 各ワークピースの加工条件と評価方法

図5~図8に示した各々のワークピースを使用して、実加工実

Table 3 Evaluation viewpoints for each workpiece

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

験を実施する際の各々の加工条件を、表5に一覧表として示す。表5では、ワークピースの材質は銅、ステンレス、アルミニウムの3種類であり、各々の加工条件はそれらの材質に対して通常適用されるものである。また、加工結果の評価方法については、既報⁵⁶⁾にて実施した内容と同一とする。但し、図5～図8のワークピースは、既報⁵⁶⁾のワークピースと事なり、いずれも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・形状測定器で得た測定結果から表面粗さの直線データを算出し、これを以て表面粗さ計による測定結果の代替手段とする。

また、既報⁵⁶⁾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、本論文の4種類の各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部位で、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では、加工面が必ずしも単純な平面形状ではなく、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。高品位加工の面品位の評価方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。

3. 高品位加工に関する新たな実加工実験の結果

既報⁵⁶⁾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、本論文では既報⁵⁶⁾のテスト加工用のワークピースの代わりに、2章で開示した、実在する或いはそれに近い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、基本的には既報⁵⁶⁾と同様に表面粗さ計と非接触三次元表面粗さ・形状測定器、そして専用の測定システムを活用して実施した。但し、本論文のワークピースはいずれも単純形状ではなく、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・形状測定器によるデータからX軸方向の表面粗さデータを算出して代替手段としている。

3.1 高品位加工の実加工実験の結果と検証

図5～図8に示す各ワークピースを用いて、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高品位加工の実加工実験の結果を、

表6～表9に示す。各表の中段より下段に向かって、①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である。①②即ち加工面の測定は既報⁵⁾で、③④即ち送り軸の挙動の測定は既報⁶⁾で開示した方法とおおむね同一である。

ここで、2.4節に述べた様に、4種類のワークピースに於ける測定対象は、制御が難しく加工面に筋目が出やすい部位で、かつ見た目の滑らかさが要求される部位とした。具体的には、図5～図8で赤い枠で囲った部位が測定対象とした部位である。図5、図8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ため、送り軸の制御が難しい。また、図6、図7で赤い枠で囲った部位では、既報⁵⁶⁾の場合と同じく、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6～表9に於ける測定結果①②③④を俯瞰すると、全てのワークピースに於いて、程度の違いこそあれ、加工面の凹凸或いは筋目の深さの大小はモータグループ#3、#2、#1の順に良好である事が分かる。これは即ち、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、即ち慣性モーメント比が小さい場合に加工面が均一で筋目が小さい事を意味する。これら複数の実加工実験結果により、高品位加工に於ける既報⁵⁶⁾の考察が更に裏付けられた。

3.2 ワークピース間の実加工結果の相違点

本論文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、上述の通りその傾向は概ね一致した。しかし、モータグループの違いの影響の大きさは、4種類のワークピース間で、必ずしも同一ではない。表6～表9より、慣性モーメント比の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が、これは各ワークピースを加工する際に、その制御性、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6～表9各々の中段に示された①面粗さ曲線、②送り軸の挙動の二次元表示の欄のモータグループ#1、#2に対応するRa、Rz、Peak to Peakの減少率、即ち-%で示した値が挙げられる。4種類の表を比較すると、この減少率は4種類のワークピース間で異なるが、総じて言えば、加工面の急な変化により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。具体的には、図5

Fig.5 Actual workpiece example (Copper electrode die)

Fig.6 Actual workpiece example (Plastics mold for PET bottles)

Fig.7 Actual workpiece example (Mobile phone case)

Fig.8 Actual workpiece example (Luxury watch bezel)

の銅電極金型及び図8の高級腕時計のベゼルを模した部品に於いて、モータグループ#1に対するモータグループ#3の-%で示した値が特に大きくなっている。

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の表面性状の様相が各々異なる点について若干補足する。表8、即ち高性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、表面の細かな凹凸が極端に小さく、逆に形状誤差は他より大きい。これは、表8ではヘール加工を実施したためと考えられる。ヘール加工では、工具を回転させずカンナの様引き切りを行うため、所謂カッターマークが発生しない。一方、高速で加工するため、必然的に形状誤差自体は大きくなる。

また、表9、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の間の差異が読み取りづらい。これは、表9の実加工の

Table 4 Moment of inertia ratio of actual workpiece examples

Workpiece	Axis								
	X			Y			Z		
	#1	#2	#3	#1	#2	#3	#1	#2	#3
Copper electrode die	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

Table 5 Conditions for fine surface machining with actual workpiece examples

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

所要時間が他の3種類より長く、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。実際に、表9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、大型の金型を加工する際は、機構部の熱変位の影響にも留意する必要がある。

4. 本論文で実施した一連の実加工実験の考察

本章では、2章、3章で開示した4種類のワークピースに、既報⁵⁶⁾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、既報⁵⁶⁾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、表10に示す。これら5種類の実加工実験の結果を元に、3.2節で開示したモータグループ#1、#2に対応するワークピース毎のRa、Rz、Peak to Peakの減少率、即ち-%で示した値を抽出し、表11に一覧表で示す。表11より、既報⁵⁶⁾のテスト加工用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による影響の傾向は一致するがその影響の大きさは必ずしも同一でない事が分かる。

4.1 本論文のワークピース群と既報のワークピースとの関係の考察

3.2節で述べた通り、本論文で使用したワークピース毎に、慣

Table 6 Moment of inertia of X axis and measured data of fine surface machining(Copper electrode die)

Motor group	#1	#2	#3
Moment of rotor inertia	$0.68 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$	$1.17 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$	$2.57 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$
Moment of inertia ratio	2.38	1.80	1.36
Work piece mass (including fixtures)	100kg		
Photograph of machining surface
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

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、表 11 からは、既報⁵⁶⁾で使用したテスト加工用ワークピースの場合と比較して、慣性モーメント比の与える影響が読み取り辛く、傾向を把握し辛い事も分かる。逆に言えば、既報⁵⁶⁾のテスト加工用のワークピースが、単純な形状であるために、慣性モーメント比の与える影響を顕著に反映する典型的なワークピースの一つであると言える。

言い換えれば、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際に、その変更が加工面品位に与える影響の検証方法として、既報⁵⁶⁾のテスト加工用のワークピースが、単純で扱いやすい形状でありながら効果的、という事になる。いずれにしても、サーボモータが大き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

比較の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、3.2 節で、ヘール加工に代表される工具と工法の違い、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述べたが、実際に各ワークピースの加工に於いても、使用する工具や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。既報⁵⁶⁾のテスト加工用ワークピースは、特殊な工具と工法を必要とせず、加工も 10 分未満で終わるため、サーボモータが加工結果に与える影響を他の要素の影響を比較的影響を受けずに評価出来る点にも特長がある。

4.2 本論文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って慣性モーメント比が加工面品位に与える影響に差異がある要因として、テーパ角度や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

Table 7 Moment of inertia of X axis and measured data of fine surface machining (Plastics mold for PET bottles)

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

さい、即ち片方の軸の移動量が小さい程、制御性の差異は位置偏差には出辛く、テーパ角が 0°なら、移動側の送り軸の位置偏差は加工結果に反映されない。逆に、45°テーパの場合は、各軸の位置偏差が加工結果に大きく反映され、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。

また、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が小さくなる、即ちサーボモータが位置指令に追従しやすくなるため、制御性の差異が加工結果に出辛くなる。逆に、曲面の曲率変化が大きいと位置指令に対してサーボモータ

は追従しづらく、慣性モーメント比に起因する制御性の差が加工面品位に影響しやすくなる。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は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より高くなる。

図5～図8の各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分は、各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分、即ち角度変化や曲率半径の比較的小さな部分と比較して、表面の凹凸や縞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、今回の実加工実験に於い

Table 8 Moment of inertia of X axis and measured data of fine surface machining(Mobile phone case)

Motor group	#1	#2	#3
Moment of rotor inertia	$0.68 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$	$1.17 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$	$2.57 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$
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

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。

4.3 サーボモータの挙動を測定する測定装置の有用性の考察

3.1 節で、実在する、或いはそれに近い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はないため、加工面の測定評価が簡単ではない点を指摘した。この点は、高品位加工分野で、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、3.2 節で、ヘール加工が加工結果に与える影響、及び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、工作機械の特性など、サーボモータ以外の様々な要素も加工結果に影響を与える点を指摘した。サーボモータが加工結果に与える影響のみを評価したい場合に、この点もまた一つの課題である。

この2つの課題に対して、既報⁶⁾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測定装置の活用が、一つの解決手段となる。何故なら、この測定装置は加工面の形状に依存

せずサーボモータの挙動の定量的な測定が可能で、測定データを二次元或いは三次元のデータとして見やすく加工する事も可能だからである。そして、サーボモータが加工結果に与える影響に絞って測定と分析を行い、その他の要素を排除したい場合にも、既報⁶⁾の測定装置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だが、それが簡単ではない場合の補完手段、代替手段として、既報⁶⁾の測定装置の有効性が裏付けられた。

5. 高品位加工に関する更なる考察と今後の課題

これまで、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、高品位加工に的を絞って詳しく論じて来た。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普及に伴って部品加工にも適用範囲が広がり脚光を浴びた分野である。従って、未だ学術的、技術的に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しばしば混同され、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、両者の違いを明確にする必要がある。そして、

Table 9 Moment of inertia of X axis and measured data of fine surface machining (Luxury watch bezel)

Motor group	#1	#2	#3
Moment of rotor inertia	$0.68 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$	$1.17 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$	$2.57 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$
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>Cutting path</p>	<p>Ra 0.047μm(-25%) Rz 0.32μm(-9%)</p> <p>Cutting path</p>	<p>Ra 0.030μm(-52%) Rz 0.25μm(-29%)</p> <p>Cutting path</p>
② 2D display of feed axis operation	<p>Peak to Peak 0.35μm</p> <p>Cutting path</p>	<p>Peak to Peak 0.35μm(0%)</p> <p>Cutting path</p>	<p>Peak to Peak 0.23μm(-34%)</p> <p>Cutting path</p>
③ 3D visualization image of machined surface	<p>0.3mm</p> <p>1mm</p> <p>0.5μm</p> <p>-0.5μm</p>	<p>0.3mm</p> <p>1mm</p> <p>0.5μm</p> <p>-0.5μm</p>	<p>0.3mm</p> <p>1mm</p> <p>0.5μm</p> <p>-0.5μm</p>
④ 3D display of feed axis operation	<p>0.3mm</p> <p>1mm</p> <p>0.5μm</p> <p>-0.5μm</p>	<p>0.3mm</p> <p>1mm</p> <p>0.5μm</p> <p>-0.5μm</p>	<p>0.3mm</p> <p>1mm</p> <p>0.5μm</p> <p>-0.5μm</p>

高品位加工を実現する要素全体の把握，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である。

5.1 高精度加工と高品位加工

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，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。

後者について，高精度と高品位は一見同じである様に思えるが，要求される機能要件は幾つかの点で異なる。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，

Table 10 Moment of inertia of X axis and measured data of fine surface machining (Workpiece for high precision and fine surface test machining)

Motor group	#1	#2	#3
Moment of rotor inertia	$0.68 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$	$1.17 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$	$2.57 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$
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

ドリルやタップの位置など、組み付けられる機械要素の相手方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 ～ 自動車や電子機器の高精度樹脂金型、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。一方、②に分類される金型や部品は、通常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。しかし、③の光学部品では、加工精度は撮像画像全体の形状に影響し加工面品位は局部的な歪みに影響するため、その両方が必要とされる。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。

5.2 高品位加工に適したサーボモータ

高精度金型以外に近年急速に急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。この市場に共通した特徴は、要求精度は一般的だが、外

Table 11 Interrelation between actual workpiece examples and effect of moment of inertia ratio

		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	0.063 μ m	0.37 μ m
	#2:	0.23 μ m (-32%)	0.5 μ m (-6%)	1.99 μ m (-10%)	0.047 μ m (-25%)	0.36 μ m (-3%)
	#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 (-6%)	11.26 μ m (-4%)	0.32 μ m (-9%)	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 (-6%)	2.89 μ m (-3%)	16.38 μ m (-1%)	0.35 μ m (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%)

視の美しさ、表面の滑らかさなどに対する要求が極めて高い点である。慣性モーメントの大きなサーボモータはサイクルタイムの点で近年分が悪かったが、高品位加工の市場拡大に伴い、その重要性が見直されている。サーボモータのコギングトルクの大小やサーボ系の制御性についても、全く同様である。

既報⁷⁾で開示した通り、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、金型加工機、高精度高品位加工機分野では、それら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様なサーボモータを搭載している。今後は、サイクルタイムを重視する用途、面品位を重視する用途、その中間を狙う汎用機といった具合に、対象とする市場及びワークピースを明確に想定した上で慣性モーメント比の設計を行うべきと、筆者らは考える。

5.3 高品位加工に影響を与える要素の全体像

既報^{5)~7)}及び本論文を通して、筆者らは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行った。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、特に高品位加工性能に大きく影響する事が、経験的に知られてはいるが、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。当然ながら、慣性モーメント以外の要素もその加工性能、特に高品位加工に影響を及ぼすが、その研究も未だ多くはない。

加工面の面品位に影響を及ぼす可能性のある要素として、サーボモータやサーボ制御の他に、加工プログラムとCNC機能、機械剛性と主軸バランス、工具と工具ホルダ、主軸回転数や送り量などの加工条件が挙げられる。これらを整理した高品位加工の構成要素の全体像を、図9に示す。図9に於いて、各構成要素と加工面との相関関係は、現時点では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定量的把握もまた、この分野の発展に寄与すると考えられる。

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、実際の高精度金型や高級腕時計部品の加工現場では、表面粗さの値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、未だ目視による官能検査が中心である。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、この面での研究も今後の課題である。この解決策として、

Fig.9 Factors affecting fine surface machining

既報⁵⁾⁶⁾及び本論文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は、一つの可能性を占める。三次元可視化画像測定装置及びその測定評価の流れを、図10に示す。文献8)9)によれば、図10の測定装置は、三次元表面粗さの国際規格である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を有している。これらの中から高品位加工の評価指標の候補を選択する方法も、本課題の解決策となる可能性がある。

6. 結 言

本論文では、既報⁵⁾及び既報⁶⁾で開示した、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り更に詳しく論じた。既報⁵⁾⁶⁾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マシニングセンタに搭載し実加工を行ったが、本論文では実在する、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実験を実施し、その加工面品位を既報⁵⁾⁶⁾と同様の方法で測定評価し比較検証した。

本論文の中心の2章~4章では、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がテーパ面や曲面の高品位加工に及ぼす影響を、現実に近い実加工実験を通して考察した。この結果、既報⁵⁾⁶⁾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、高品位加工に於いては、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するサーボモータの選定が有効との結論が、更に明確になった。

続く5章では、既報^{5)~7)}と本論文で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、全体を総括した。また、慣性モーメント比の議論に加えて、近年盛り上がりを見せる高品位加工市場の動向とその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、サーボモータも含めた高品位加工の結果に影響を与える構成要素の全体像の提示、その加工面品位の客観的、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開示した。

Fig.10 Evaluation method example for machined fine surface

既報^{5)~7)}及び本論文が、ハイスサイクル加工或いは高精度高品位加工用のマシニングセンタの設計と、そのサーボモータ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主流の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方法として有効活用されれば幸いである。しかし、高品位加工に関する研究はスタート地点に着いたばかりである。筆者らは、この研究を今後も継続し、加工現場で役立つ研究を進めて行きたいと考える。

参考文献

- 1) 大木創：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例，総合電子出版，(2005).
- 3) T. Ohnishi and N. Takahashi: Optimal design of efficient IPM motor using finite element method, IEEE Transactions on Magnetics, **36**, 5 (2000) 3537.
- 4) D. Kim, I. Park, J. Lee and C. Kim: Optimal shape design of iron core to reduce cogging torque of IPM motor, IEEE Transactions on Magnetics, **39**, 3 (2003) 1456.
- 5) 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).
- 6) 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).
- 7) 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).
- 8) 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).
- 9) 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.
- 10) 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，(2013).
- 11) 垣野義昭，松原厚，黎子椰，上田大介，中川秀夫，竹下虎男，丸山寿一：NC 工作機械における送り駆動系のトータルチューニングに関する研究(第1報)，精密工学会誌，**60**, 8 (1994) 1097.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 二ノ宮進一，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，2013 年度 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 251.
- 16) 岩下平輔：サーボ調整ツール FANUC サーボガイド，FANUC Technical Review, **20**, 1 (2007).
- 17) 岩下平輔：高品位加工を実現するサーボ技術，FANUC Technical Review, **23**, 1 (2015).
- 18) Y. Altintas: Manufacturing automation, Cambridge university press, (2012) 191.
- 19) 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.
- 20) 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.