



# 複合加工機の基本構造設計の方法論と開発

中南, 成光

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2008-03-25

(Date of Publication)

2012-03-02

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲4356

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1004356>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博 士 論 文

複合加工機の基本構造設計の方法論と開発

平成20年1月

神戸大学大学院自然科学研究科

中 南 成 光

# 目 次

第1章 緒 論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 複合加工機が求められる背景	1
1.1.2 複合加工機の課題	2
1.1.3 複合加工機の開発経緯	7
1.1.4 工作機械における設計方法論	13
1.2 研究の目的	14
1.3 本論文の構成	15
第2章 複合加工機に求められる仕様と基本構造の検討	17
2.1 緒言	17
2.2 現在の複合加工機の課題の明確化	18
2.3 複合加工機の対象加工物	21
2.4 複合加工機に要求される生産性	24
2.5 生産性を実現するための仕様の検討	36
2.6 複合加工機の構造	40
2.6.1 工具台数の検討	40
2.6.2 移動軸の配置の検討	45
2.6.3 基本構造の検討	49
2.7 結言	55
第3章 複合加工機の基本構造の詳細検討	57
3.1 緒言	57
3.2 直交3軸移動部の構造の詳細検討	58
3.3 軸移動に伴う剛性値の変化の比較	64
3.4 共振周波数の比較	68
3.5 移動物重量の比較	70

3.6 駆動点から重心までの距離の比較	71
3.7 Box in box構造の詳細設計	73
3.8 結言	79
<b>第4章 複合加工機の開発とその性能評価</b>	<b>80</b>
4.1 緒言	80
4.2 最新の複合加工機	81
4.2.1 重心駆動	83
4.2.2 オクタゴナルラム	86
4.2.3 ビルトインモータ・ターレット	88
4.3 加工精度の検証	90
4.4 生産性の検証	94
4.5 電気エネルギー使用量と生産性	100
4.6 フロアスペースあたりの生産性	102
4.7 採算性の検証	105
4.8 結言	106
<b>第5章 結 論</b>	<b>107</b>
参考文献	111
謝辞	120

# 第1章

## 緒論

### 1.1 研究の背景

#### 1.1.1. 複合加工機が求められる背景

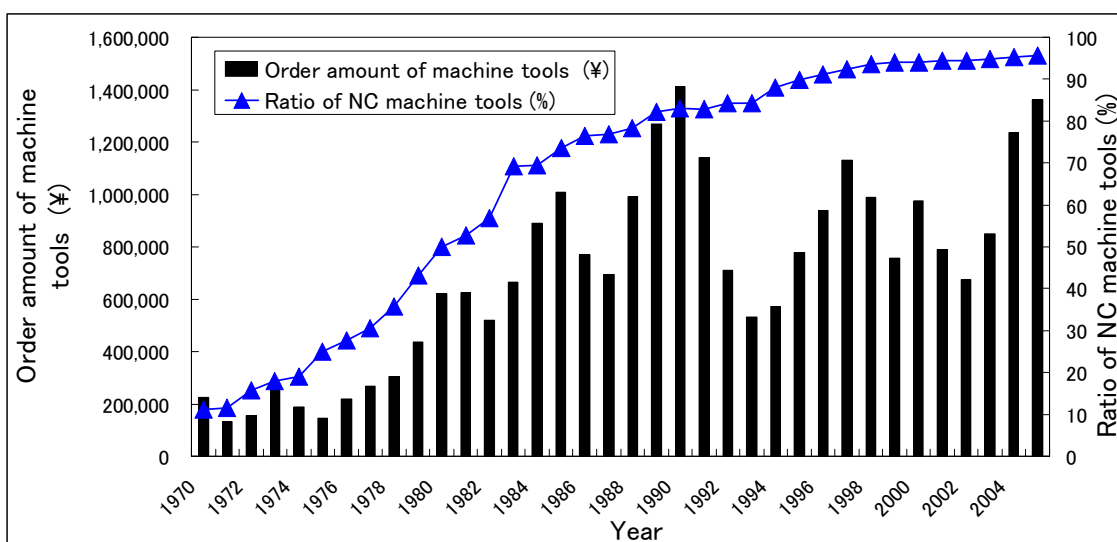
CNC装置（数値制御装置）の開発に伴い<sup>1)</sup>、NC旋盤とマシニングセンタが金属切削加工現場の機械設備として、その中心を占めるようになって久しく<sup>2)</sup>、生産性の向上、コストの低減を目的とした様々な研究・開発が行われてきた。世界的にも工業製品の中心を占める自動車産業を始め、建設、電気、IT、航空、宇宙など、ありとあらゆる分野の工業製品の生産を支え、発展させてきたのはNC旋盤であり、マシニングセンタであった。その研究開発の方向は、より高速・高精度を、そしてまたより多機能で自動化を目指したものであった<sup>3)、4)</sup>。

一方で、我が国やEU諸国を中心により高賃金でかつ高生産性を目指す工業先進国と、比較的安価な労働力を背景に大量生産財の低コスト化を達成しようとする中進国の二極の方向が顕著となり、前者の国々ではより付加価値の高い、また多様な需要に短期間で対応できる工作機械を開発することが要求され、後者の国々では更なる機能・性能の向上よりはむしろ、より低価格な工作機械を開発することが要求されるようになってきた<sup>5)、6)</sup>。

工業先進国における工作機械に求められる技術開発の方向性は、図1.1<sup>7)</sup>に示すように我が国における工作機械の受注高と、そのうちに占めるNC工作機械の比率が顕著に物語る。我が国における工作機械の受注高は1970年代より順調に拡大を続け、それを支える形でNC工作機械の占める割合も確実に上昇を続ける。しかし1991年のバブル崩壊を受けて工作機械の受注高は大きく伸び悩む時期を迎える一方で、工作機械に占めるNC化の比率は鈍化が見られるものの確実に上昇を続け、1990年台後半には90%を越えてほぼ飽和状態と

なる。1991年以前は工作機械の受注高とNC化比率が共に上昇を続けるが、1991年以降は相関関係を認めることができなくなる。すなわち我が国においてはバブル崩壊後の新たな成長の原動力となるべきNC化を越える新たな技術革新の必要性に迫られていることを示している。

このような背景の中で、我が国を典型とする工業先進国の要求に応えるために、NC旋盤、マシニングセンタを母体としてより高機能にかつ、加工工程を集約して自動化を図り、一品一様の生産が可能な工作機械を目指して研究開発されてきたのが現在の複合加工機である。<sup>8)、9)</sup>



**Fig.1.1 Trends in NC machine ratio and order amount of machine tools**

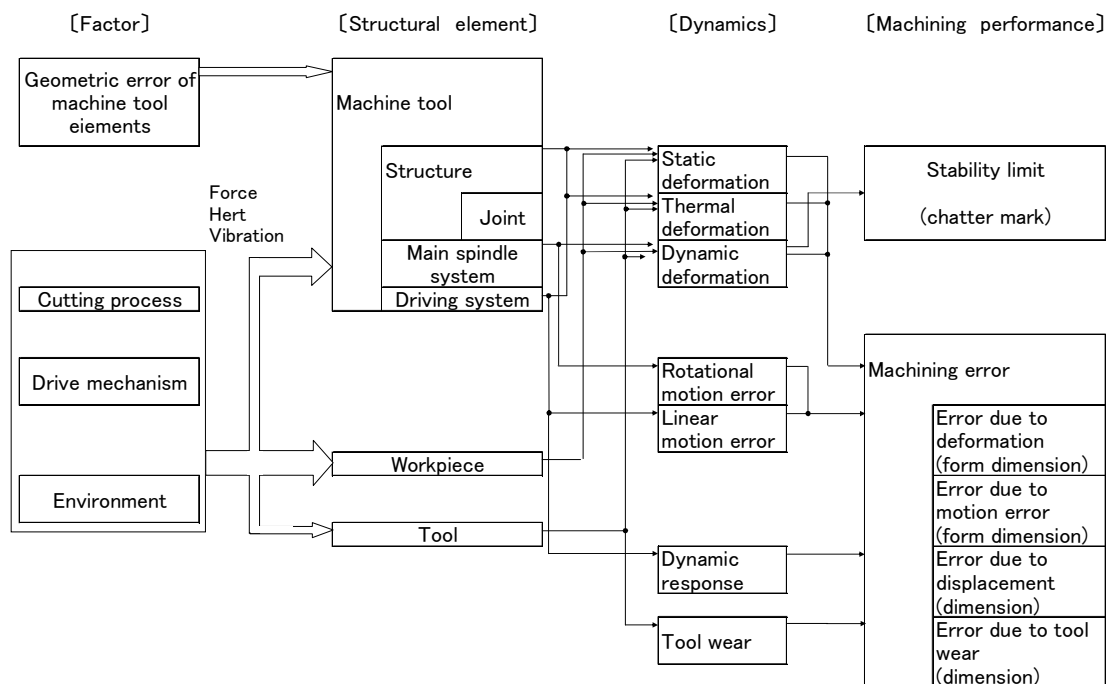
### 1.1.2. 複合加工機の課題

NC旋盤やマシニングセンタは同じ物を数多く作る「繰り返し生産」を前提として「補正」という考え方のもとに、1個目は試し削りを行ない、寸法を測定して、図1.2に示されるような加工物に表れる様々な誤差要因<sup>10)</sup>を修正

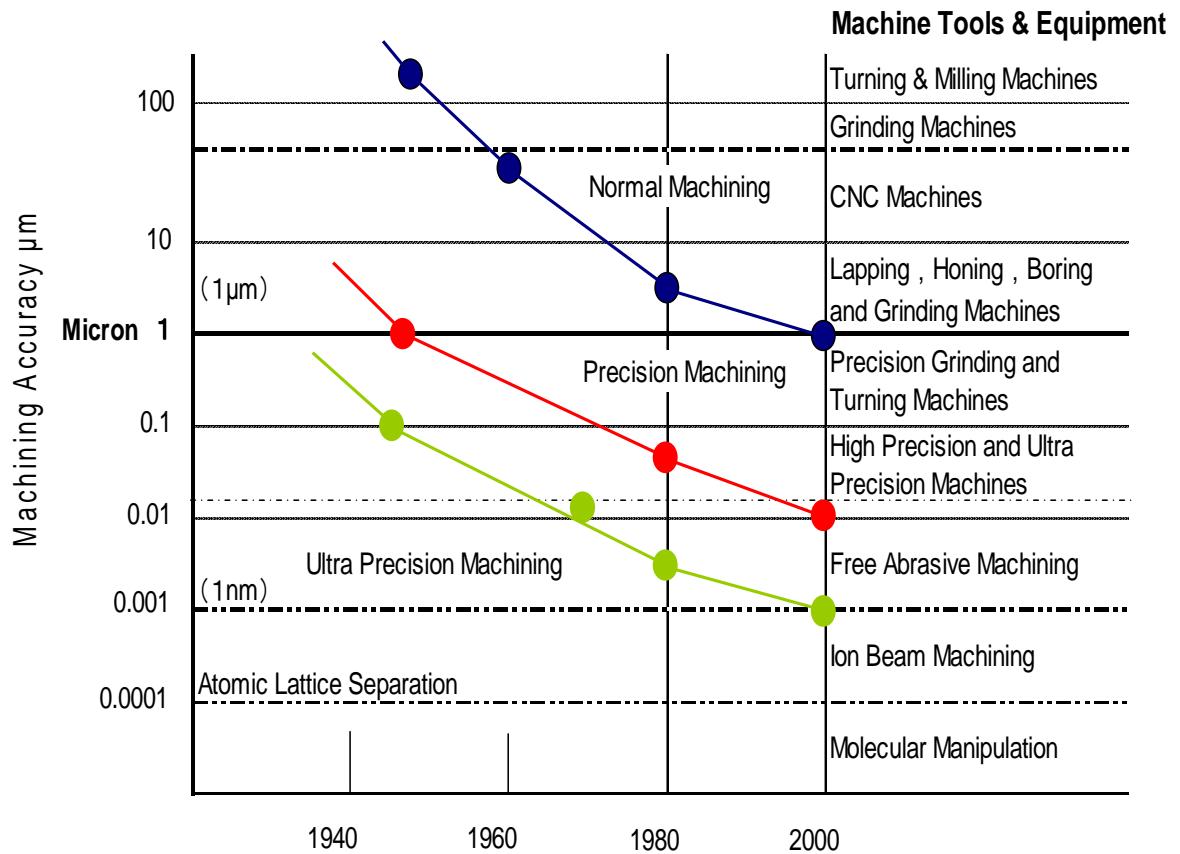
し、2個目以降から良品を生産するという繰り返し精度がある程度確保されていけば良いという考えが成り立った。しかし複合加工機は1個目から良品を作ることが要求されるため、1個目でもきちんと許容値内に寸法精度、幾何精度を収める高い精度が要求される。また図1.3<sup>11)</sup>に示すように工作物に求められる精度も年々高精度化していることも克服しなければならない。

また更には、多様な需要に対応した部品加工を従来と同じコストで実現するためには、複合加工機を用いた部品加工においても従来のNC旋盤やマシンングセンタと同等以上の生産性が確保される必要もある。

工作機械が産業革命を支えた時代から長らく、工作機械は1つ1つの加工方法を個々に実現する道具として開発されてきた。例えば旋盤は、ロクロ旋盤の時代からずっと変わらず、加工物を回転してそこに刃物を当てることにより円筒形の加工物を製作することを可能にしてきた工作機械である。また



**Fig.1.2 Factors which govern machining performance**



**Fig.1.3 Taniguchi equivalent for cutting processes**

工具を回転させて加工する工作機械としては、穴を開けるボール盤、面を作るフライス盤、円筒の穴を開ける中ぐり盤、溝を掘る型削り盤、表面を綺麗に仕上げる研削盤などが開発されてきた<sup>12)</sup>。このような工作機械の開発の歴史の過程で、いつの時代にも一度加工物を固定したらなるべく多くの加工を行う工程集約化（複合化）は、精度を高め、段取りの手間を省き、高効率生産の手法として常に要求され、その時代々の要素技術を用いて工程集約を実現する工作機械が具現化されてきた。

このような観点から、今までに最も工業的成果を残した工程集約機（複合加工機）はマシニングセンタと言える。前述のボール盤、フライス盤、中ぐり盤、型削り盤などを集約することに成功した。マシニングセンタの成功の背

景にはボール盤やフライス盤の基本構造に囚われることなくマシニングセンタとして要求される精度、機能に基づき基本構造やATC機能（自動工具交換機能）、APC機能（自動パレット交換機能）などを開発してきたことが大きな一因となっている。<sup>13), 14), 15)</sup>

複合加工機に求められる、多機能を実現しつつ従来のNC旋盤やマシニングセンタ以上の精度と生産性を両立させるという高い要求をクリアして、図1.4<sup>16)</sup>に示すように工作機械としての1つの分野を形成し得る製品としてその地位を確立するためには、マシニングセンタが開発されたときと同じ様に、NC旋盤やマシニングセンタの基本構造にとらわれることなく、複合加工機に求められる性能、仕様を明確にし、原理・原則に基づいて、その要求を満たすための複合加工機に最も適した基本構造を決定する必要がある。

尚、本研究では複合加工機とはNC旋盤の機能（加工物を回転させて旋削加工を行う機能）とマシニングセンタの機能（工具を回転させて多種のミーリング加工を行う機能）を併せ持つ加工機と定義する<sup>17), 18)</sup>。

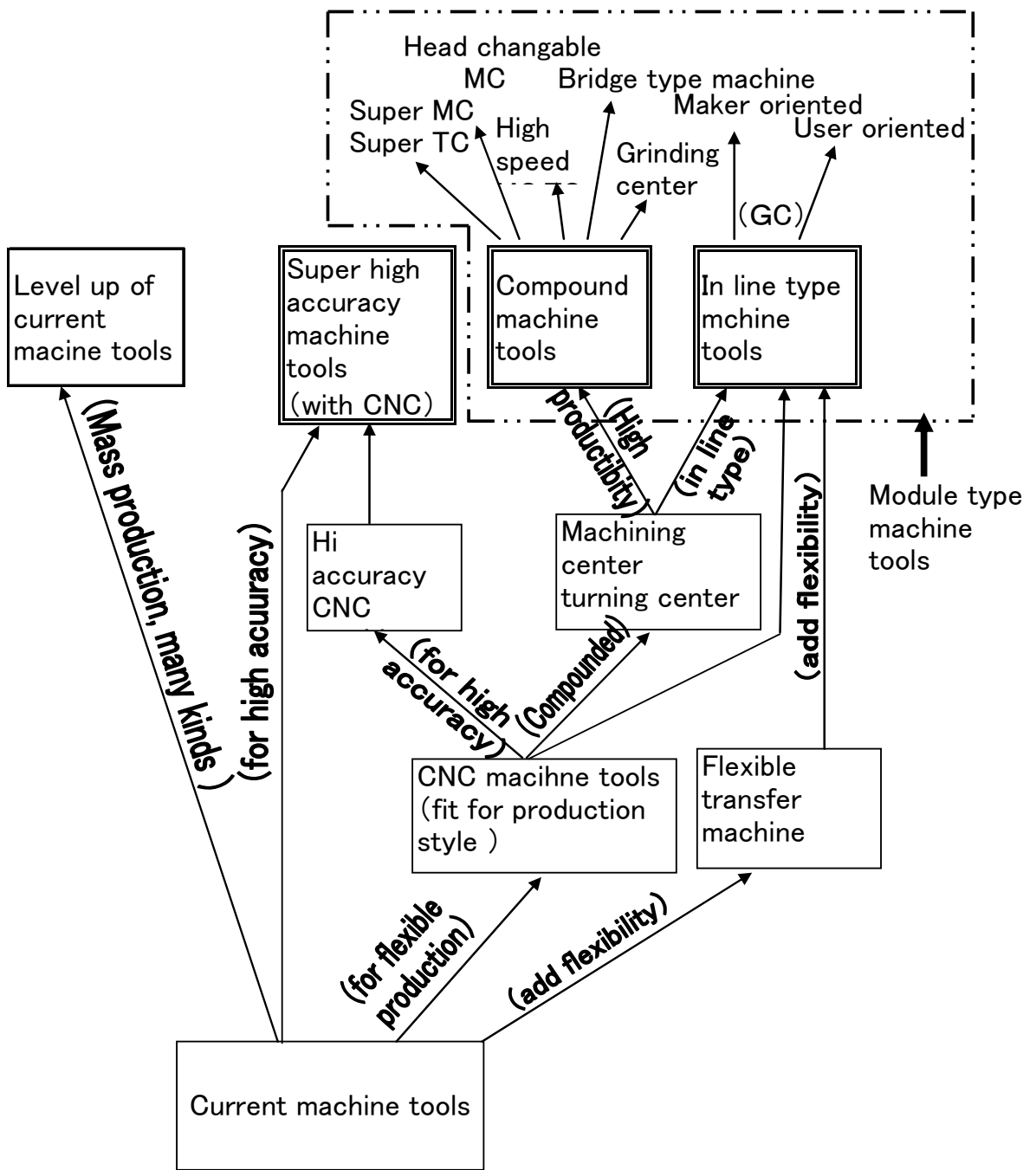


Fig.1.4 Trends of machine tools innovation

### 1.1.3. 複合加工機の開発経緯

現在の複合加工機は、図1.5に示すようにNC旋盤を基本に機能を追加する形で発展してきた。

X軸（直径方向の送り軸）とZ軸（軸心方向の送り軸）から構成される2軸のNC旋盤の生産性をより高くすることを目的として1つの旋削主軸（加工物）に対して2つの工具を用いて加工を行なうことを可能にしたのが4軸旋盤であり、XZ軸方向に移動可能な工具台を2個、すなわち4軸の制御軸を有し、比較的量産部品を加工する分野で多く導入された。また旋削主軸を2個配置して、どちらか一方の旋削主軸に自動で軸心方向（Z軸）に移動可能な構造を採り、2つの旋削主軸間で加工物の受け渡しを可能にした機械も開発されている。この機能を用いることによって第1工程の加工物取り付け面も含む全ての加工物表面を1台の機械の中で自動で加工することが可能となった（背面主軸付き旋盤、第2主軸付き旋盤）。

これらの開発は1980年代に盛んに行なわれ、このころには2軸NC旋盤、4軸旋盤に限らず、旋削加工物の80%は有すると言われる穴あけ、タップ加工などの簡単な二次加工を集約化できるミーリング機能も追加されるようになってきた。

ミーリング加工が行なえるようになると旋削加工では必要としなかった3軸直交空間での加工が要求されるようになる。旋盤のX、Z軸に加えて、Y軸方向の移動軸を備えた機械である。更に多彩なミーリング加工に対応するために、また段取り替えの時間短縮を狙って、多くの工具を機械に搭載し、自動交換を行いたいという要求にとつながっていった（ATC機能付き）。

こうして多彩な機能の追加を実現してきたNC旋盤を基本とした複合加工機は1990年代後半には更に複雑な加工物を対象とするようになった。

図1.6に示すように、もともとは丸物加工物を主体にドリル、タップ程度の二次加工を対象としたものが、Y軸機能やATC機能の追加によって、よりミーリング加工の能力が高くなり、角物をベースに一部に旋削加工が存在するような加工物の加工に広がっていった<sup>18)</sup>。

そして2000年代に入って、斜め面への加工を可能にした現在の複合加工機が

登場してきた。

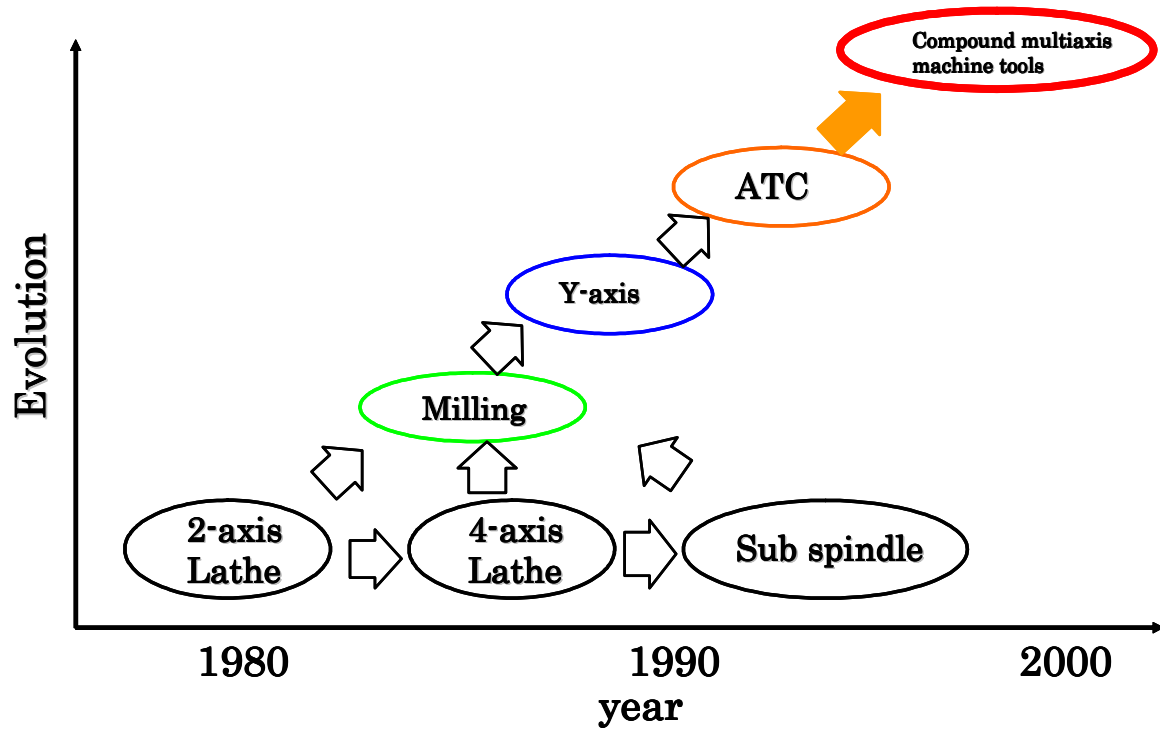
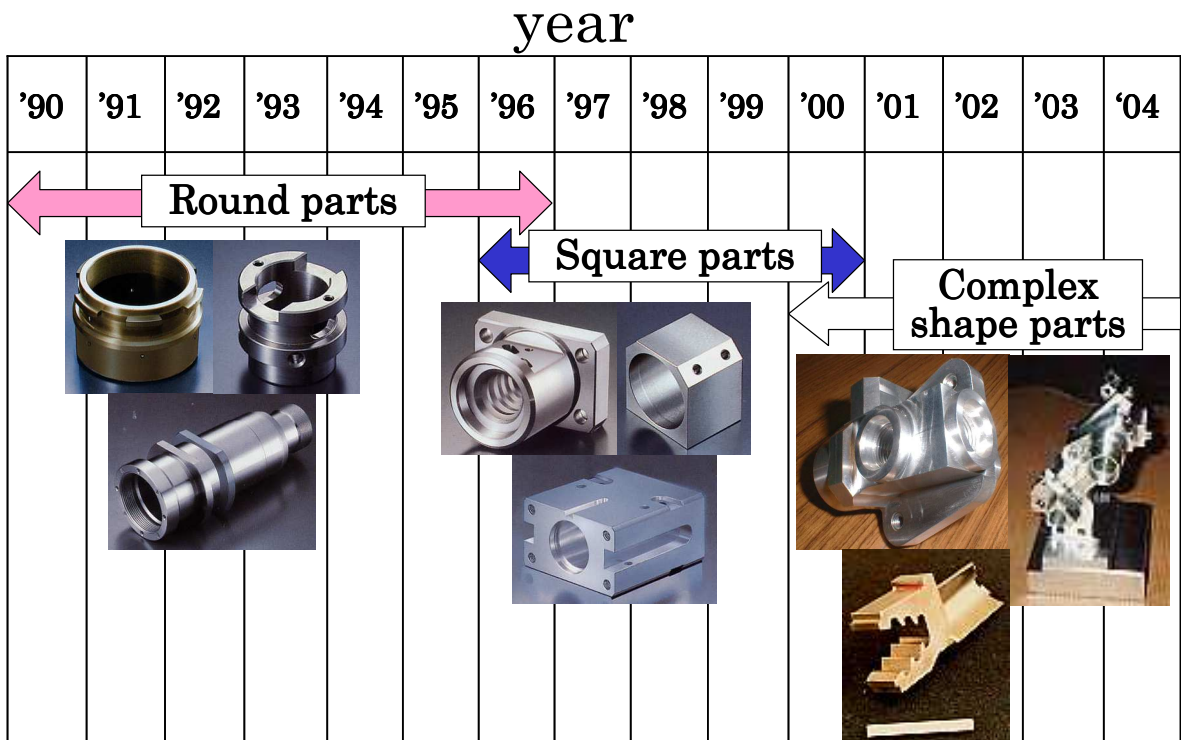


Fig.1.5 Compound multiaxis machine tool evolution



**Fig. 1.6 Machined parts evolution**

図1.7<sup>17)</sup>はNC旋盤をベースとして発展してきた現在の複合加工機の外観、構造例である。

加工物を回転させる主軸が2個、工具を回転させる主軸が2個、合計4個の主軸を有し、制御軸は1個目の工具をX、Y、Z、B（Y軸を軸心とする回転軸）に移動制御する4軸と、2個目の工具をX、Z軸移動制御する2軸、更に各々の加工物を回転方向に補間制御可能な2つのC軸（Z軸を軸心とする回転軸）、そして加工物を2つの旋削主軸間で受け渡し制御するための軸を有し、4主軸、9制御軸、ATC付きの複合加工機となっている。

これらの機能は1台の機械の中に2軸NC旋盤と回転2軸を有する5軸マシニングセンタが集約された機能に匹敵する。

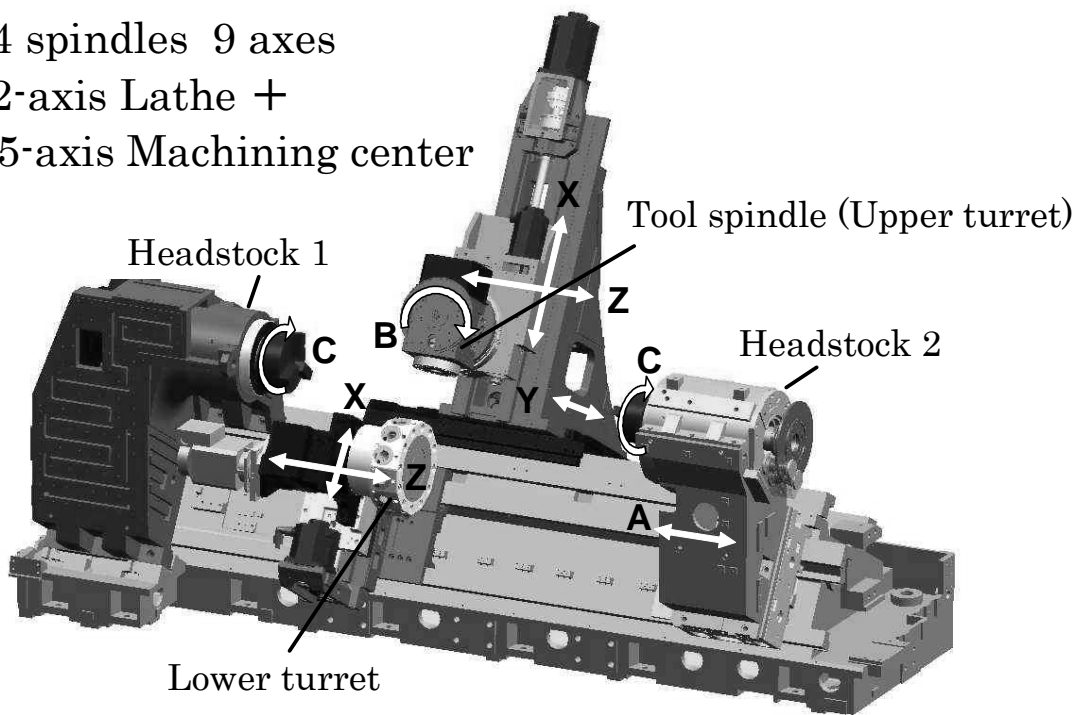
図1.8<sup>18)</sup>は同じくマシニングセンタをベースとした現在の複合加工機の外観、構造例である。

工具を回転させる主軸がX、Y、Zの直交3軸方向に移動するコラムY軸移動型の立形マシニングセンタをベースに、加工物を回転させる主軸がB軸およびA軸に回転移動するトラニオン構造テーブルを配置した直線3軸、回転2軸の5軸マシニングセンタと同じ構造となっている。



(a) Overview of typical compound multiaxis machine tool

- 4 spindles 9 axes
- 2-axis Lathe +  
5-axis Machining center

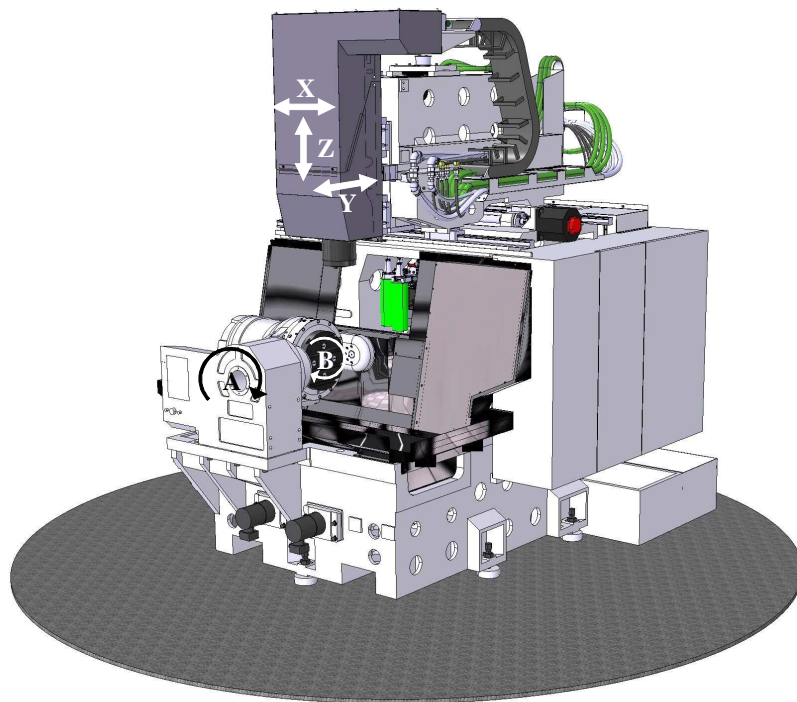


(b) Typical compound multiaxis machine tool configurations

Fig.1.7 Typical compound multiaxis machine tool based NC-lathe



(a) Overview of typical compound multiaxis machine tool



(b) Typical compound multiaxis machine tool configurations

Fig.1.8 Typical compound multiaxis machine tool based machining center

#### 1.1.4. 工作機械における設計方法論

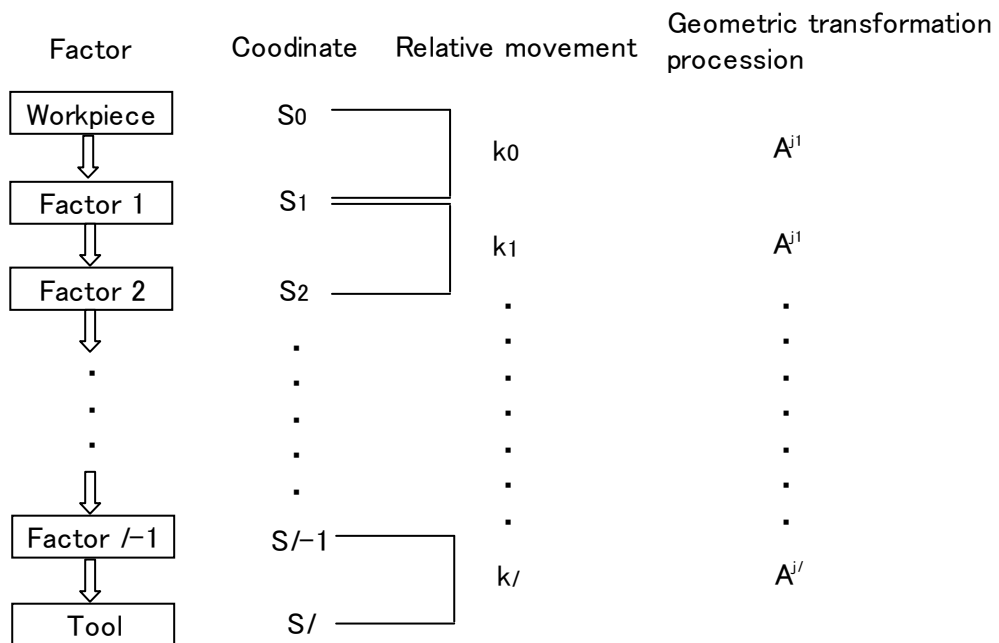
以上の様に、複合加工機は時代の要求に応える形でNC旋盤、マシニングセンタをベースとして順次機能を積み重ねる形で開発されてきたという経緯があり、現在の複合加工機に求められている機能や要求される精度などの全体をとらえて、その基本構造を工作機械の設計方法論に基づいて一から設計されたものにはまだなり得ていない。

一方、近年の複雑化する技術課題を解決していくための一つの手法として、設計プロセスを慎重に計画し、体系的に実行していくための設計方法論が提案されている。工学設計全般の設計方法論としてはG. ポール、W. バイツらが役割の明確化、概念設計、実体設計、詳細設計の4つのフェーズに分けた設計プロセス論を提案しており<sup>19)</sup>、また2002年には機械工学便覧においても設計工学<sup>20)</sup>が新設編されており、新たな工業製品を創造していくための設計方法論が整備されてきている。

さらに工作機械の分野においては、構造設計については伊東、新野らが構造記述方法<sup>21)</sup>を提案し、モジュールの組合せによって要求に応じた構造を自由に創成するバリエーションデザイン方式<sup>22)</sup>などの有用な提案を行なっている。また創成運動における誤差等の問題を定量的に扱うために工作機械形状創成運動の数学モデルを構築しようとする試みがPortman<sup>23)</sup>、杉村ら<sup>24)-28)</sup>によって始められ、有用な提案が行なわれている。また布引はマシニングセンタの基本構造設計過程を分析し、オブジェクト指向を用いた設計支援システムを提案しており<sup>29)</sup>、苗は加工対象品の要求精度に基づいて工作機械の精度設計を行なう方法論を提案している<sup>30)</sup>。さらに稲崎<sup>31)</sup>は工作機械における形状創成理論の体系化と応用を提案しており、図1.9に示すような工作機械の数学モデルを示して形状創成関数を提案しており、これらの研究が近年の5軸マシニングセンタや複合加工機の構造や形態の研究へと繋がっている<sup>32), 33)</sup>。

その一方で複合加工機が開発されてきた経緯も示している様に、実際の工作機械の設計・開発現場においては様々な工作機械の開発要求に応じていくために、このような設計方法論はあまり用いられず、従来から在る基本構造

を踏襲して機能を追加したり、仕様を変更したりするだけの設計者の経験則や感に頼った設計・開発が多く行なわれているという実態もある。これは、こうした設計方法論を実際に用いなくても工作機械において最も重要な要求の一つである加工精度を満たすということも含めて、市場の要求に合致した工作機械を設計・開発することが可能な技術範囲に留まっていたということが一つの理由であることと、これらの工作機械の設計方法論が論じているところが概念設計の範囲までに留まっているところがあり、実際の製品開発（実体設計、詳細設計）に用いた検証まではあまり行なわれていなかった、つまり実用できる設計方法論であることの確認があまり行われていなかったことが理由として挙げられる。



**Fig.1.9 Mathematics model of machine tools**

## 1.2 研究の目的

以上の様に、今までは工作機械の設計方法論に基づいた複合加工機の設計があまり行われていなかったことや、従来の工作機械の設計方法論そのもの

が実際の製品開発のステージまではあまり適用されていなかったという課題を解決するために、本研究では、第1.1.4章で述べたG. ポール、W. バイツらの設計方法論（体系的アプローチ手法）を用いて、複合加工機に要求される仕様を明確にすることから取組み、その仕様の要求値を満たすための概念設計、実体設計、詳細設計を行い、更には実際に設計された複合加工機を開発してその性能を評価することにより、現在の複合加工機の課題を解決した新しい複合加工機を開発すると同時に、工作機械の設計における実践的かつ体系的な設計方法論を確立することを目的としている。

### 1.3 本論文の構成

本論文は全5章より構成される。

第1章「緒論」では、今後ますます需要が高くなると考えられる複合加工機について、それらが開発されてきた背景、経緯を概観し、マシニングセンタが世に広く受け入れられる設備となっていた経緯を参考にしながら、複合加工機における原理・原則に基づいた基本構造開発の必要性について述べ、現在の複合加工機の基本構造を概説し、従来における工作機械の設計方法論を理解した上で、本研究の目的、本論文の構成について述べる。

第2章「複合加工機に求められる仕様と基本構造の検討」では、現在の複合加工機の課題を明確にし、その課題を解決するために、現在の複合加工機で加工される加工物の加工内容を分析し、それらの加工内容を従来の工作機械を用いて行う場合と、複合加工機を用いて行う場合とで比較することにより、複合加工機に求められる生産性を定義し、その生産性を満たす仕様を明確にする。

更には、その仕様を満たす代表的な基本構造の特徴を整理し、比較することによって複合加工機に適した基本構造を決定する。<sup>34)</sup>

第3章「複合加工機の基本構造の詳細検討」では、更に詳細な基本構造検討を行うために、代表的な基本構造例の簡易モデルを作成して数値解析を行うことにより、特性を比較検討し、最も適した基本構造の詳細を決定する。

更に、決定された最適モデルの詳細設計を行ない、そのモデルを用いて数値解析を行うことにより、最適モデルの妥当性を検証する。<sup>35)</sup>

第4章「複合加工機の開発とその性能評価」では、詳細検討された設計モデルに基づいて実際に複合加工機の開発を行い、実機を用いて性能を評価することによって、本研究で用いた設計方法論および、開発した新しい複合加工機の妥当性を検証する。<sup>36)</sup>

第5章「結論」では、本研究により得られた成果をまとめる。

## 第2章

# 複合加工機に求められる仕様と基本構造の検討

### 2.1 緒言

第1章で述べたように複合加工機はNC旋盤やマシニングセンタを基本にして機能を追加する形で開発されてきた。<sup>37),38),39)</sup>

その構造はNC旋盤と5軸マシニングセンタの機能を併せ持つに至り、傾斜面への加工はもちろん、歯切りや研削などの加工も複合加工機1台を用いることで可能となっている。<sup>40),41)</sup>

しかし、もともとはNC旋盤の基本構造を母体としてミーリング機能やY軸、ATCの機能を追加する形で開発されてきた経緯があり、精度や生産性についての課題も指摘されている。また投資額も高額となり、従来のNC旋盤やマシニングセンタに比べて加工費用も高くなり、採算性が低いという指摘もある。

本稿では、現在の複合加工機の課題を整理して明確にし、実際に複合加工機で加工される様々な加工物の加工内容を調査することによって複合加工機に求められる加工内容を定義し、投資額と利益の関係から求められる生産性の数式化を試みる。更に、定義された加工物を用いて要求される生産性を満たすための仕様を検討し、その仕様を実現するのに適した基本構造について、色々な基本構造の特徴を整理比較することによって検討する。

## 2.2 現在の複合加工機の課題の明確化

第1章で述べたように現在の複合加工機はNC旋盤やマシニングセンタをベースとして開発されてきており、機械の価格も高く、高価で複雑な加工を得意とする機械になっている。しかし複合加工機が本来目指しているところは、従来のNC旋盤やマシニングセンタで加工されている加工物の工程を集約して加工することによって、リードタイムを短縮し、より高い加工精度を得、省スペースで高効率な加工を行うことが出来る新しい加工システムを提供することである。図2.1に新しい複合加工機が目指す位置付けのイメージを示す。すなわち簡単で加工賃の低い加工物から複雑で加工賃の高い加工物までありとあらゆる加工物の加工が経済性も含めて可能な機械である。

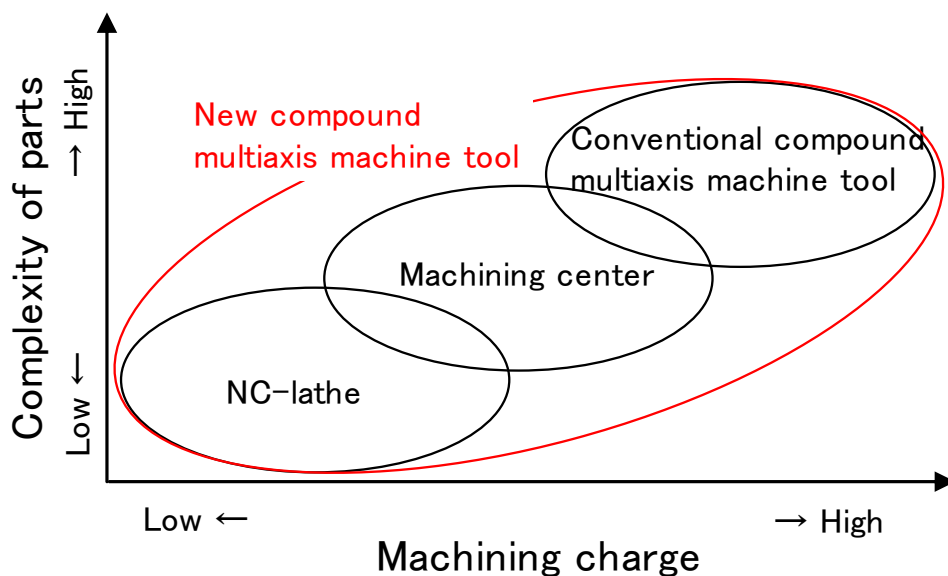


Fig. 2.1 Target market of new compound multi-axis machine tool

そこで現在の複合加工機の課題を明確にすることで、新しい複合加工機が克服すべき課題を明確にしておく。

現在の複合加工機が指摘されている課題を再度整理すると以下の通りである。

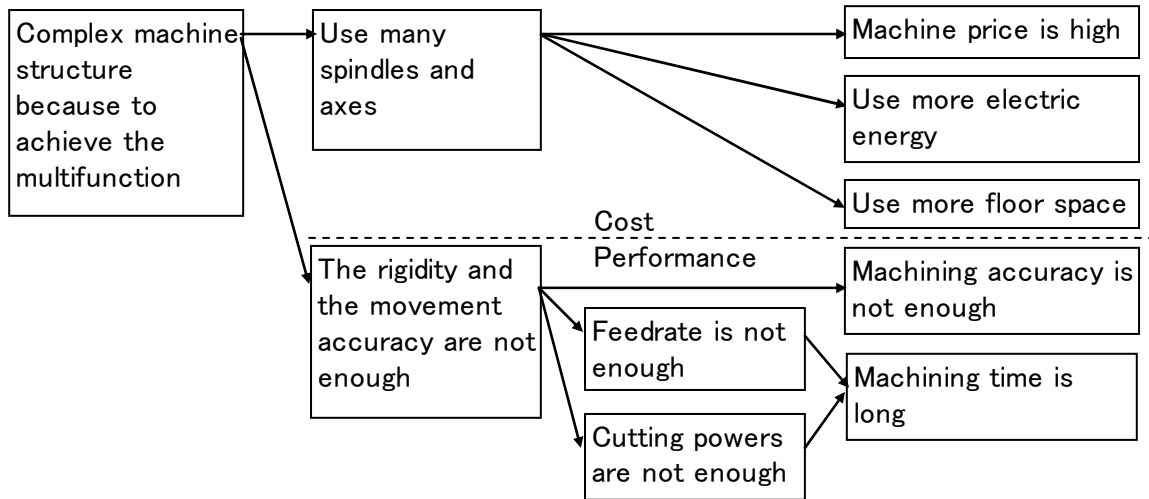
- 1) 多機能を実現するために機械構造が複雑になり、その結果、機械の剛性や運動精度が犠牲になっているため、加工物の加工精度が従来のNC旋盤やマシニングセンタに比べて劣る場合がある。
- 2) 同様に複雑な機械構造により機械の剛性や運動精度が犠牲になっているため、従来の加工機と同等の送り速度や切削力が得られず、同じ加工物を加工しても従来のNC旋盤やマシニングセンタに比べて加工時間が長くなる場合がある。
- 3) 多機能を実現するために多くの主軸、送り軸を装備しており、機械1台あたりの電気使用量が多く、ランニングコストが高い。
- 4) 従来のNC旋盤、マシニングセンタに比べて機械サイズが大きく、機械1台あたりに占めるフロアスペースが広がる。
- 5) 機械の価格が高いため、従来のNC旋盤やマシニングセンタで加工されている加工物を加工しても採算が合わない場合がある。

これらの課題を整理すると図2.2に示されるようにコストの側面と性能の側面に切り分けることができる。つまり、多機能を実現するために多くの主軸や送り軸を用い、その結果、機械の価格が高くなり、多くの電力を必要とし、多くのフロアスペースと必要とするというコストの側面と、複雑な構造により機械の剛性や運動精度が低くなり、その結果、加工精度が低くなり、また十分な切削能力や送り速度が得られずに加工時間が長くなるといった性能の側面である。

前者のコストの側面は必要な機能を実現するためには必要なコストであり、大きく改善することはできない。従って、後者の性能の側面を解決して複合加工機に求められる本来の性能を実現し費用対効果を高めることが現在の複合加工機の課題と言える。すなわち加工精度を高め、加工時間を短縮するために十分な機械の剛性と運動精度を確保することが現在の複合加工機の最大の課題であると言える。

この課題を解決することで、その結果としてコストの側面、つまり機械価格が高いことや、電気使用量が多いこと、フロアスペースを多く必要とするこ

とは、より高い費用効果が得られればおのずと解決されると考えられる。



**Fig. 2.2 Issues of the conventional compound multi-axis machine tool**

## 2.3 複合加工機の対象加工物

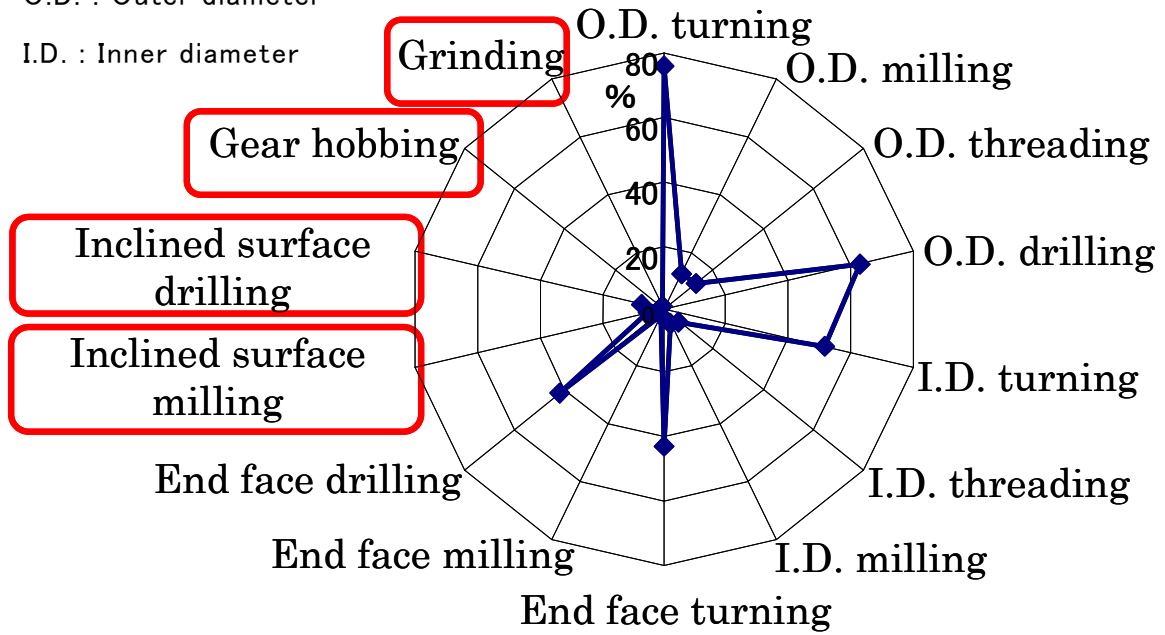
複合加工機はもとより多様な加工物を加工することが求められる機械であり、要求される加工精度や加工時間も様々である。従ってそれらを検証するためには複合加工機で加工される代表的な加工物を定義することが必要かつ重要となる。そこで複合加工機で加工されている加工物の加工内容を調べ、複合加工機で加工されている加工物の定義を試みしてみる。

図2.3は複合加工機で実際に加工されている107点440工程の加工物について、どのような加工工程が多く含まれているかを調査したものである。部品加工面を外径、内径、端面、傾斜面に分類し、更に旋削加工かフライス加工か、ドリル、ネジきりなどの工程かに分類している。また近年の複合加工機で行われる特徴的な加工である研削工程やホブ加工（歯切り加工）などに分類して調査を行った。尚、縦軸はその加工工程が含まれる率を示している。その結果、図に示されるように外径旋削加工や外径ドリル加工、内径旋削加工、端面旋削加工、端面ドリル加工などが多く含まれることが確認された。図中に□印で囲んだ複合加工機の特徴とされる傾斜面への加工や研削、ホブ加工などは特徴的ではあるものの多く行なわれている加工ではなく、複合加工機の加工における加工精度と加工時間を検証する上では重要ではないことが判る。

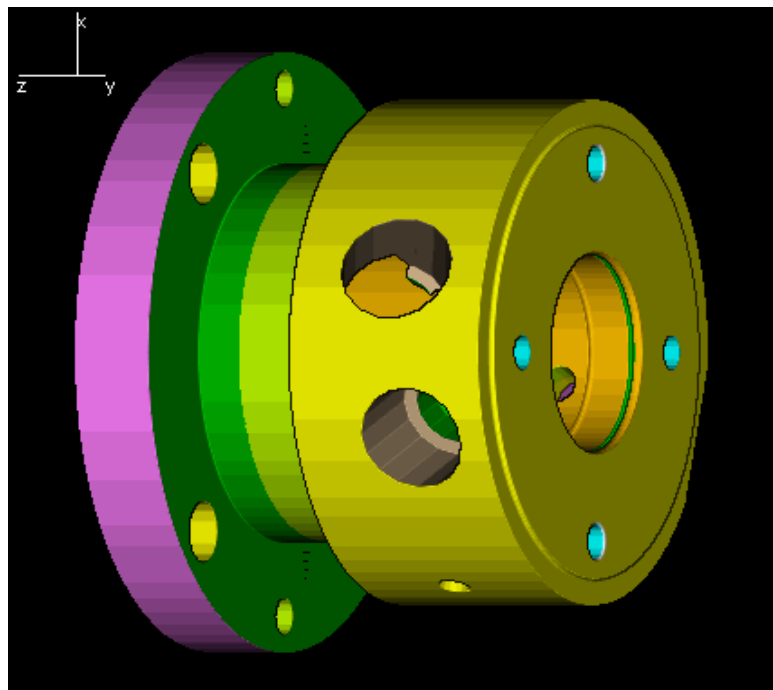
図2.4に、この加工内容の調査に基づきCAMソフト（㈱森精機製作所製『CAPS-L』）を用いてシミュレーションを繰り返し行いながら、加工内容とその加工時間を調査結果と一致させるようにして定義した現在の複合加工機で加工されている代表的な加工物の形状を示す。

O.D. : Outer diameter

I.D. : Inner diameter



**Fig. 2.3 Survey results of machining operations conducted by compound multi-axis machine tools**



**Fig.2.4 Sample part used for comparison**

図2.5には、更に加工内容の調査範囲を広げて2軸NC旋盤、複合旋盤、複合加工機で実際に加工されている加工物306点の直径と長さを調べた結果を示す。直径φ250mm×長さ1,000mm以下の大きさが95%を占めるが、直径がφ500mmを越える加工物や長さが3,000mmに及ぶ長尺加工物（シャフトワーク）も存在する。これらの全て大きさの加工物を1種類の機械で加工できるようにすることは通常は行われず、加工範囲ごとに機械の大きさ変えてサイズごとに数種類の機械を揃える方法が採られるが、旋削系の加工物の場合、長さ1mを越える長尺加工物への対応が必須となる。

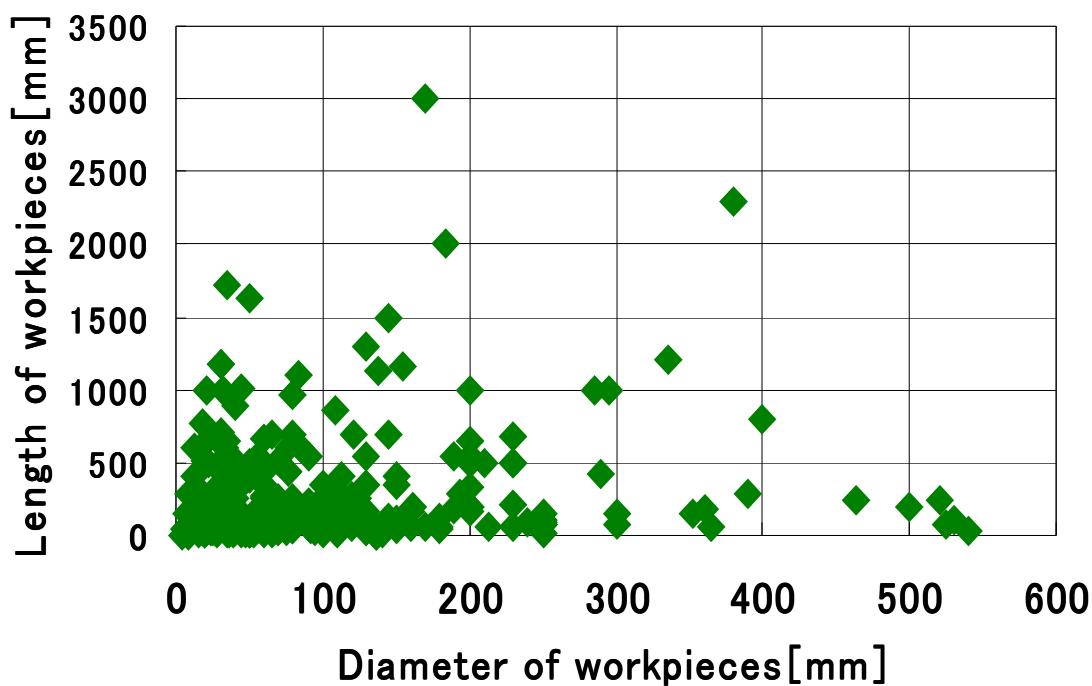


Fig.2.5 Survey results of size of workpieces

## 2.4 複合加工機に要求される生産性

前章までで、複合加工機で加工される加工物の加工精度や加工時間を検証するために旋削やドリル、タップなどの基本的な加工に着目する必要があることと、対象加工物として特徴的である長尺加工物への対応が必要であることが判った。次に必要な加工時間について検討してみる。

複合加工機は2軸NC旋盤やマシニングセンタよりは価格の高い機械であり、そのことから例えば従来2軸NC旋盤で加工していた加工物を複合加工機で加工した場合に、複合加工機は2軸NC旋盤より速く加工し、より多くの売上を上げることができなければ同じ利益を売ることはできない。その観点から、複合加工機に求められる加工時間は単に加工時間を論じるだけではなく、費用対効果、すなわち生産性の観点で検討する必要がある。つまり、従来の2軸NC旋盤やマシニングセンタと同等の生産性（費用対効果）を実現することができるように、外径旋削加工や外径ドリル加工、内径旋削加工、端面旋削加工、端面ドリル加工などの基本的な加工の加工時間を速くする必要があると言える。

そこで以下のように要求される生産性を定義し、複合加工機に求められる生産性を算出してみる。

ここで用いるパラメータを以下のように定義する。

$T_h$ : 1日あたりの稼働時間(hour)

$T_d$ : 1ヶ月間の稼働日数(day)

$T_y$ : 利益が同等になるのに要する期間(year)

$R$ : 機械の稼働率(%)

$C_j$ : 機械の価格(円)

$C_c$ : 加工に必要な費用の単価(円/min)

$T_w$ : 加工物一個あたりの平均的な加工時間(sec)

$C_w$ : 加工物一個あたりの加工賃(円)

$N$ : 考慮する期間内の加工物の総生産個数(個)

$P_o$ : 考慮する期間内に得られる利益(円)

$C_e$ : 考慮する期間内の総費用(円)

$C_o$ : 考慮する期間内の運転費用(円)

$T_m$ : 考慮する期間内の総加工時間(min)

$S_t$ : 考慮する期間内の総売上(円)

これより  $C_e$ 、 $C_o$ は

$$C_e = C_i + C_o \quad (2.1)$$

$$C_o = C_c \times 60 \times T_h \times T_d \times 12 \times T_y \times \frac{R}{100} \quad (2.2)$$

また  $T_m$ は以下の式で表され、

$$T_m = 60 \times T_h \times T_d \times 12 \times T_y \times \frac{R}{100} \quad (2.3)$$

$T_m$ を用いると  $C_e$ は以下の式で表される。

$$C_e = C_i + C_c \times T_m \quad (2.4)$$

さらに  $S_t$ は、

$$S_t = C_w \times N \quad (2.5)$$

ここで  $N$  は次式より得られる。

$$N = 60 \times \frac{T_m}{T_w} \quad (2.6)$$

したがって  $P_o$  は以下のようになる。

$$\begin{aligned} P_o &= S_i - C_e \\ &= C_w \times N - C_i - C_c \times T_m \end{aligned} \quad (2.7)$$

また添字として2軸NC旋盤等の従来機種には  $l$  を、複合加工機には  $m$  をつけるものとするれば、

$$\left. \begin{aligned} P_{ol} &= C_w \times N_l - C_{il} - C_c \times T_m \\ P_{om} &= C_w \times N_m - C_{im} - C_c \times T_m \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

と表される。

ここで、 $T_m$  は一定と仮定する。また  $C_c$  (加工費用の単価) は機械の運転に必要な経費 (固定費及び変動費) より構成される。固定費 (人件費や工場経費など) については、機械の種類ではなく自動化の度合いや工場環境に依存する費用であるため、従来の加工機でも複合加工機でも一定と仮定する。

変動費（電気代や工具代など）については同じ加工物を加工するのに必要なエネルギー費用と考え、加工物が同じ場合はこれも一定と仮定する。

従って、 $C_c$ も一定とみなし、 $P_{ol} = P_{om}$ となる加工時間を求める。

$$C_w \times N_l - C_{il} = C_w \times N_m - C_{im} \quad (2.9)$$

これに式(2.6)を代入すると、

$$T_{wm} = \frac{T_{wl}}{1 + T_{wl} (C_{im} - C_{il}) / C_w \times 60 \times T_m} \quad (2.10)$$

上式から複合加工機に求められるサンプル加工物に対する加工時間が求められる。

ここで  $T_h=8$ 、 $R=85$ 、 $T_d=21$ 、 $T_y=5$  とすると、

$$T_{wm} = \frac{T_{wl}}{1 + 3.24 \times 10^{-8} T_{wl} (C_{im} - C_{il}) / C_w} \quad (2.11)$$

となる。

各パラメータ  $T_h$ 、 $R$ 、 $T_d$ 、 $T_y$  は、一般的な機械加工工場の稼働条件を想定して決定している。すなわち1日1直8時間の勤務時間、段取り替えや機械の故障による停止を考慮して85%の機械稼働率、1ヶ月当たり21日出勤（週休2日）、機械償却期間10年の半分5年を目処に利益を同等にすること、を基準

に設定している。

式(2.11)を用いて現在市場で使用されている様々な加工機のサンプル加工物の加工時間 ( $T_{wj}$ ) をもとに複合加工機に要求される加工時間 ( $T_{wm}$ ) を算出すると表2.1のようになる。

すなわち、2軸旋盤では188秒で加工されている加工物を複合加工機では1.5倍速く123秒で加工する必要があり、同様に複合旋盤の場合は727秒を559秒に(1.3倍)、4軸旋盤の場合は970秒を843秒に(1.15倍)短縮する必要があると算出される。

ただし、複合加工機の機械価格 ( $C_{im}$ ) は比較対象とする従来機種と同等の仕様を持つ従来の複合加工機の価格を参考に、2軸旋盤同等仕様機は工具台、主軸台が1個の仕様機の価格1980万円、複合旋盤同等仕様機は工具台、主軸台が2個の仕様機の価格2570万円、4軸旋盤同等仕様機は工具台、主軸台は2個であるが2個目の工具台(下刃物台)には回転工具機能を持たない仕様機の価格2300万円を用いている。また、2軸NC旋盤、複合旋盤、4軸旋盤の機械価格 ( $C_{ij}$ ) は現在市販されている同タイプの製品価格を参照した。

サンプル加工物は、実際に加工された加工物を調査して各々の機種の対象加工物ごとにどのような加工工程が多く含まれるかの率と加工時間を調べ、その結果に基づいてCAMソフト(株森精機製作所製『CAPS-L』)を用いてシミュレーションを繰り返し行い形状を定義する方法を用いた。

表2.2にサンプル加工物の一例とその加工時間を、図2.6にサンプル加工物の加工工程調査結果を示す。2軸NC旋盤の加工物は図2.6(a)に示されるように内外径、端面の旋削加工および外径のねじ切り加工が主となっており、表2.2に示されるように加工時間は150秒から250秒程度の加工物となっている。複合旋盤の加工物は同じく図2.6(b)に示されるように内外径、端面の旋削加工に加えて外径や端面方向からの穴あけ加工が多くなり加工時間は300秒から1500秒と長くなっている。4軸旋盤の加工物は図2.6(c)に示されるように外径、端面の旋削加工が多くなり他の加工工程もまんべんなく含まれ加工時間は600秒から1300秒となっている。

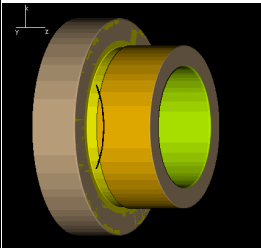
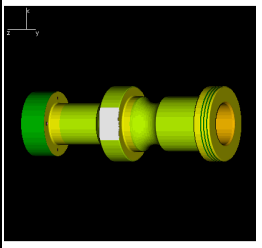
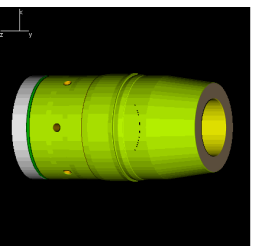
式(2.10)は、ある部品を加工する際の稼働条件(稼働時間、稼働率)と稼

動に要する単位費用（固定費、変動費）が同じであれば（元来同じ条件下で比較すべきもの）、もともと加工している機械での加工賃と加工時間、その機械の価格、そして新たに導入する機械の価格が分かれば、その加工物を新たに導入する機械で加工するときの要求加工時間が算出されるという重要な原則を示している。

つまり、式(2.10)を用いることで、従来は設計的な制約や特定の仕様の数値を競う形でのみ決められることが多かった工作機械に求められる仕様を、新たに導入すれば実際に利益を生み出す仕様として適切に決定することが可能となる。このような取組みは、現在までほとんど行われていない。、本研究での新規的・独創的試みである。

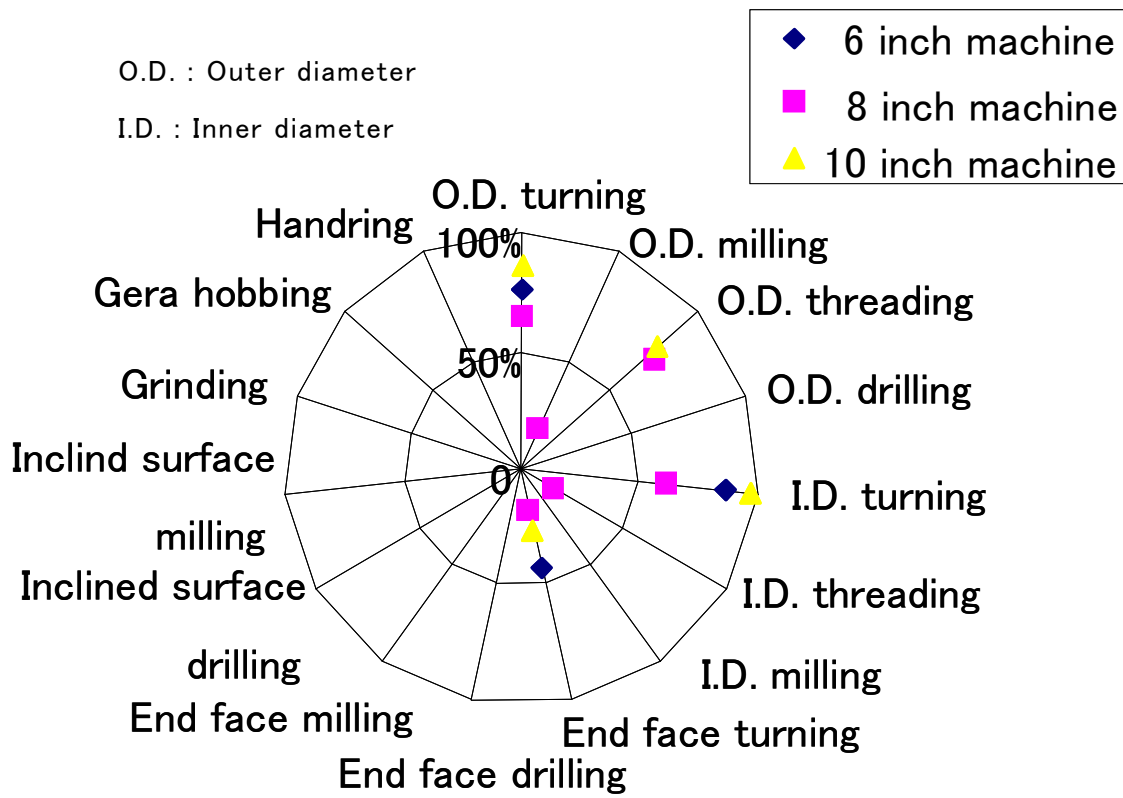
表2.1では $T_y$ ：利益が同等になるのに要する期間を5年、 $C_c$ ：加工に必要な費用の単価を50円/分として試算しているが、図2.7(a)に $T_y$ を5年、7年、10年とした場合の必要な生産性の向上率( $T_{w1}/T_{wm}$ )を、図2.7(b)に $C_c$ を50円/分、80円/分、120円/分とした場合の必要な生産性の向上率( $T_{w1}/T_{wm}$ )を、それぞれ示す。利益が同等になるのに要する期間が長くなればなるほど、また加工に必要な費用の単価が高くなればなるほど、生産性の向上率は小さくて済むことが分かる。現在の市場では利益が同等になるのに要する期間5年は比較的短期間と言え、また加工に要する費用の単価50円/分は比較的安価である。よって表2.1に示される生産性向上率( $T_{w1}/T_{wm}$ )を満たすことで複合加工機に要求される生産性は満足できるものと判断できる。

**Table2.1 Sample part machining time different machines  
and time required for new compound multiaxis machine tool**

Machine	2-axis lathe	Multiaxis turning machine	4-axis lathe
Machine price (million yen)	6.5	18	19.25
Workpiece			
Machining time( $T_{wl}$ ) (sec)	188	727	970
Required time for new compound multiaxis machine tool( $T_{wm}$ ) (sec)	123	559	843
Productivity increase( $T_{wl}/ T_{wm}$ ) (times)	1.5	1.3	1.15

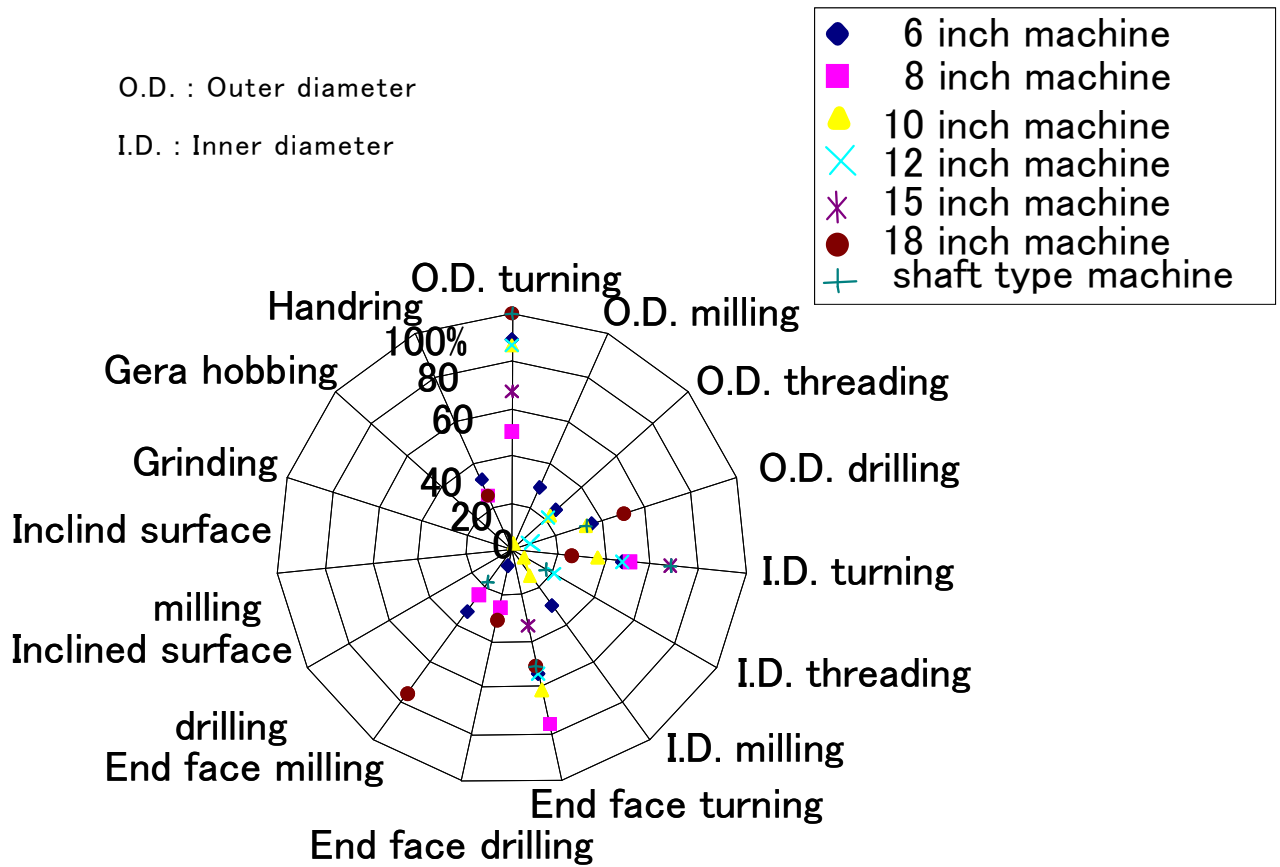
**Table2.2 Example of survey parts and machining cycle time**

Machine type	Name of part	Size of workpiece	Material	Machining time(sec)
2-axis latne	Gear	$\phi 130 \times 55$	S45C	157
2-axis latne	Holder	$\phi 28 \times 15$	SUS303	183
2-axis latne	Shaft	$\phi 36 \times 300$	SCM420	240
2-axis latne	Gear	$\phi 90 \times 70$	CAE5160	182
2-axis latne	Fan	$\phi 150 \times 100$	FC250	170
2-axis latne	Valve	$\phi 28.4 \times 55.5$	Brass	180
Multiaxis turning machine	Gear	$\phi 36 \times 15$	A6061	433
Multiaxis turning machine	Cam	$\phi 20 \times 100$	S45C	364
Multiaxis turning machine	Tool	$\phi 30 \times 270$	SK3	853
Multiaxis turning machine	Adapter	$\phi 114 \times 131$	SCR-20	307
Multiaxis turning machine	Flange	$\phi 46 \times 44$	SKD61	1585
Multiaxis turning machine	Case	$\phi 62.5 \times 235$	A6061	1396
4-axis lathe	Cam	$\phi 80 \times 250$	Cr420H	642
4-axis lathe	Cam	$\phi 60 \times 270$	Cr420H	976
4-axis lathe	Pipe	$\phi 18 \times 765$	SCM435	780
4-axis lathe	Shaft	$\phi 44 \times 342$	SCM440H	1255
4-axis lathe	Nut	$\phi 65 \times 45$	SCM420	895
4-axis lathe	Sleeve	$\phi 160 \times 170$	SKD61	1302



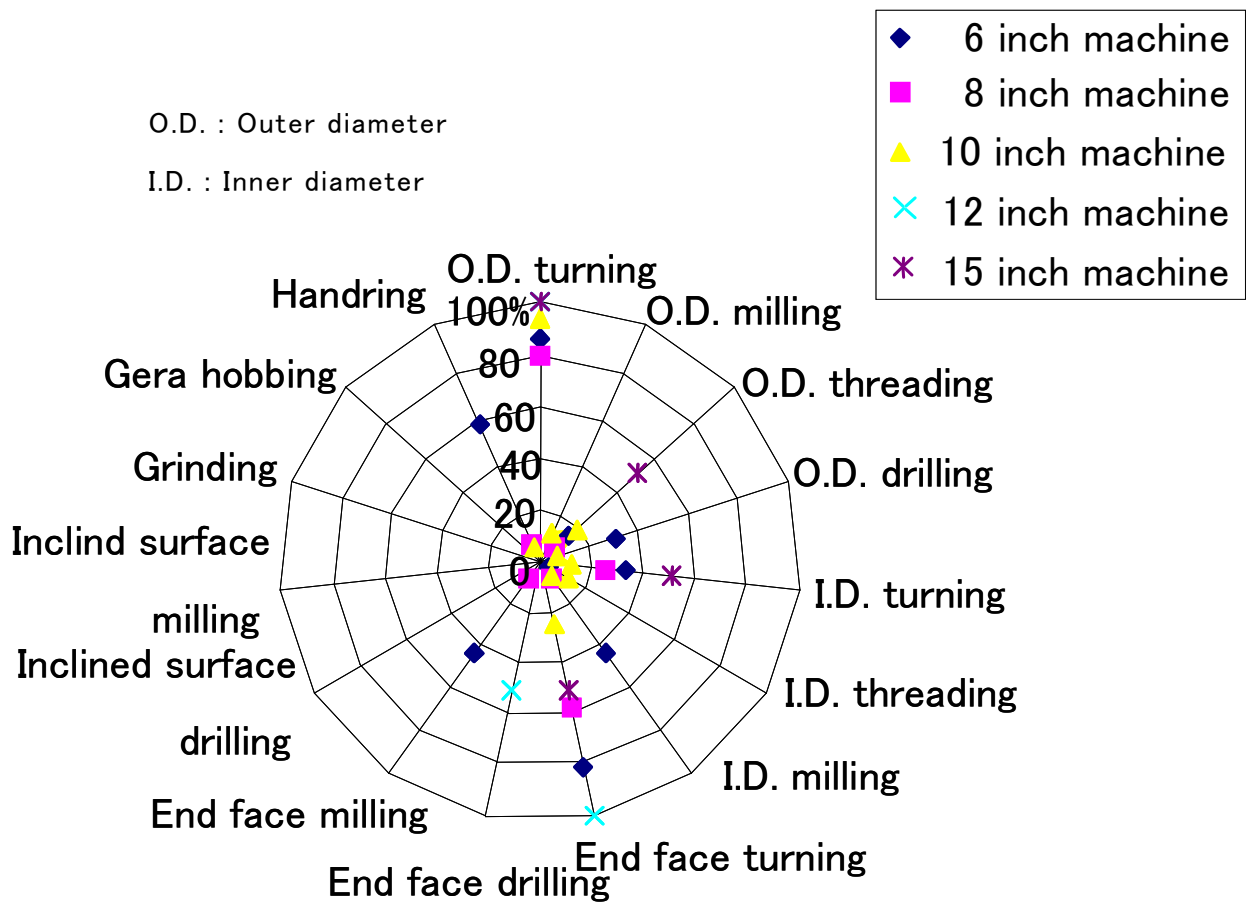
(a) 2-axis lathe

Fig.2.6 Survey results of machining operations



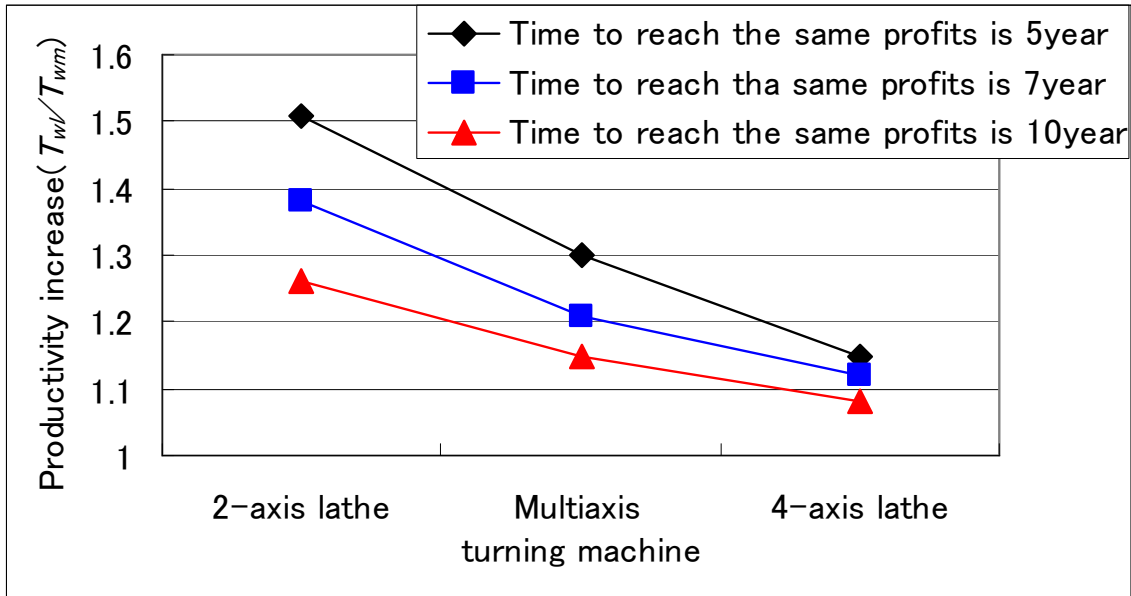
(b) Multiaxis turning machine

Fig.2.6 Survey results of machining operations (continued)

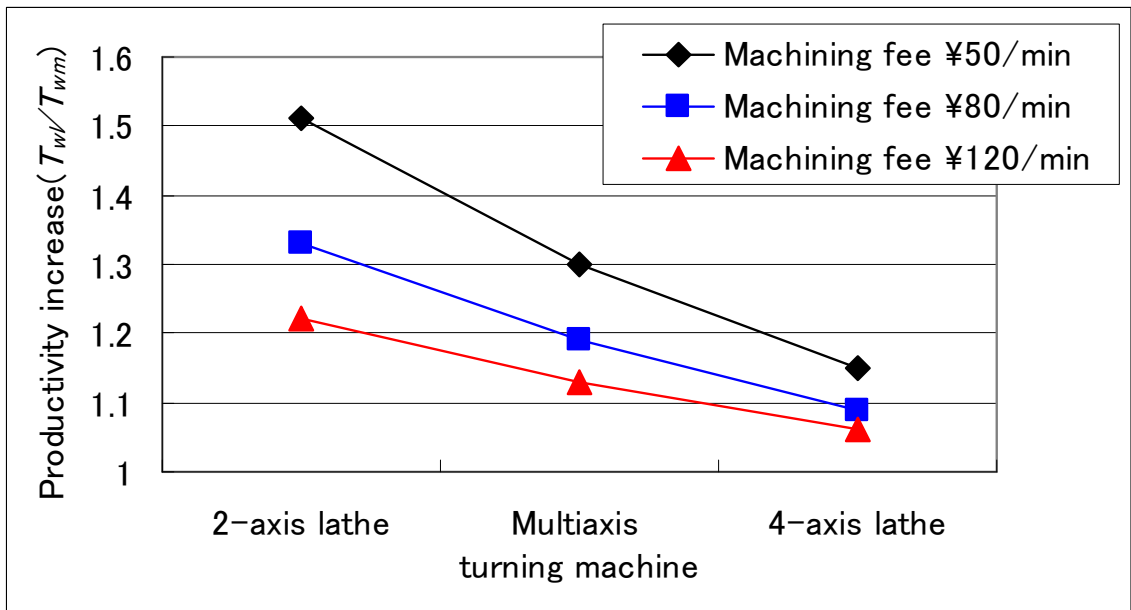


(c) 4-axis lathe

Fig.2.6 Survey results of machining operations (continued)



(a) Comparison of productivity increase by time to reach the same profits



(b) Comparison of productivity increase by machining fee

Fig.2.7 Comparison of productivity increase

## 2.5 生産性を実現するための仕様の検討

次に要求される生産性（加工時間）を実現するための仕様を検討する。

ここで使用するパラメータを以下のように定義する。

- $T_w$ : 加工物1個あたりの加工時間 (min)
- $T_s$ : 加工物1個あたりの段取り時間 (min)
- $T_i$ : 加工物1個あたりの非切削時間 (min)
- $T_c$ : 加工物1個あたりの実切削時間 (min)
- $T_r$ : 加工物1個あたりの早送り移動時間 (min)
- $T_t$ : 加工物1個あたりの工具交換時間 (min)
- $D_r$ : 加工物1個あたりの早送り移動距離 (mm)
- $F_r$ : 機械の早送り速度 (mm/min)
- $T_{atc}$ : 1回あたりの工具交換時間 (min)
- $N_{atc}$ : 加工物1個あたりの工具交換回数 (回)
- $A_c$ : 加工物1個あたりの切削断面積 (mm<sup>2</sup>)
- $D_c$ : 切込み量 (mm)
- $F_f$ : 切削送り速度 (mm/min)

これより  $T_w$  は

$$T_w = T_s + T_i + T_c \quad (2.12)$$

また  $T_i$ 、 $T_c$  は以下のように表される。

$$T_i = T_r + T_t$$

$$= \frac{D_r}{F_r} + T_{atc} \times N_{atc} \quad (2.13)$$

$$T_c = \frac{A_c}{D_c \times F_f} \quad (2.14)$$

よって式(2.12)は、次式で表すことができる。

$$T_m = T_s + \frac{D_r}{F_r} + T_{atc} \times N_{atc} + \frac{A_c}{D_c \times F_f} \quad (2.15)$$

段取り時間を含めて加工物によって変わる要因は従来の加工機でも最新の複合加工機でも同等であるとする、加工時間を短縮するために工作機械(加工法)に要求される要因としては、

- A. 早送り速度( $F_r$ )の増加
- B. 切込み量( $D_c$ )の増加(工作機械の剛性を上げる)
- C. 切削送り速度( $F_f$ )の増加(同上)
- D. 工具交換時間( $T_{atc}$ )の短縮

の4要因が考えられる。

これらの要因を変化させて表2.1のサンプル加工物について複合加工機での加工時間短縮効果を加工時間シミュレーションソフトを用いて検証した結果が表2.3である。なお、このシミュレーションには(株)森精機製作所製の複合加工機用CAMソフトウェア『CAPS-MT』を用いた。

例えば2軸NC旋盤を用いて188秒で加工されているサンプル加工物を現在の複合加工機で加工すると204秒の加工時間と計算されるものを、要求される加工時間である123秒に短縮するために、上記の4要因を変化させて短縮効果を確認している。

Aの早送り速度( $F_r$ )を24m/minから42m/minに増加させた場合、加工時間は204

秒から199秒に短縮される。更にBの切込み量 ( $D_c$ ) を5~7mmから9mmに増加させた場合は時間短縮効果は得られていない。2軸NC旋盤の場合に、切込みを増加させても短縮効果が現れていないのは、切込み量  $t$  の値が、切込み量を増やしても荒加工のパスが削減できない下式の条件に当てはまるためである。

$$t < 5mm \quad (2.16)$$

または、

$$9mm < t \leq 5mm \times 2 \quad (2.17)$$

つまり、1回目の切込み量が従来の加工機での切込み量である5mm以下であるか、もしくは2回目の切込み量が9mmより大きく10mm以下となる素材、完成品形状になっており、切削移動距離が短縮できないためである。

更に、Cの切削送り速度 ( $F_p$ ) を0.18~0.25mm/revから0.22~0.45mm/revに増加させた場合は162秒まで短縮される。そしてDの工具交換時間 ( $T_{atc}$ ) を1.6秒から1.0秒に短縮して160秒まで短縮されるが、要求の加工時間である123秒は達成できていない。この結果から、4要因を現実に採用可能な範囲で変化させても要求される加工時間は達成できないことが明らかになった。しかし、同時に2個の工具を用いて加工することによって要求の加工時間を達成できることが分かった。この場合の加工時間短縮結果を表2.3の最下段(E)に示す。

同様に複合旋盤の場合の加工時間は現在の複合加工機で加工した場合の加工時間である827秒が559秒に、4軸旋盤の場合は1229秒が799秒に短縮され、いずれも要求の加工時間を達成することができる。

**Table2.3 Specifications and cycle time required**

**for new compound multiaxis machine tool**

Machine		2-axis lathe	Multiaxis turning machine	4-axis machine
Sample workpiece machining time(sec)		188	727	970
Required machining cycle time for new compound multiaxis machine tool		123	559	843
Machining time of conventional compound multiaxis machine tool with one tool spindle(sec)		204	827	1229
Cycle time reduction(sec)		Time (Reduction time)(sec)		
With one tool spindle	A. Rapid travel ( $F_r$ ) (24→42m/min)	199(5)	800(27)	1203(26)
	B. Depth of cut ( $D_c$ ) (5~7→9mm)	199(0)	797(3)	1192(11)
	C. Feed rate ( $F_f$ ) (0.18~0.25→0.22~0.45mm/rev)	162(37)	684(113)	963(229)
	D. ATC ( $T_{atc}$ ) (1.6→1.0sec)	160(2)	674(10)	954(9)
E. With 2 tool spindles		123(37)	559(115)	799(155)

## 2.6 複合加工機の構造

ここまでの過程で、複合加工機の課題を明確にし、求められる生産性を数式で表し、それを実現するための仕様を決定してきた。以上を基に本章では複合加工機の基本構造の検討を行なう。

### 2.6.1 工具台数の検討

前章で述べたように、複合加工機に要求される加工時間を満たすためには工具台をもう1個追加する必要があることがわかった。すなわち1個の加工物に対して同時に2個以上の工具を用いて加工する方法である。

ここで1個の加工物にいったい何個の工具台を用いることが最も効果的かを考えてみる。

第2.3章で定義したサンプル加工物（図2.4）を用いて実際に工具台が1個から4個の場合の加工時間をシミュレーションすると表2.4のようになる。ここで、主軸が2個で工具台が1個を配置する構造を2S1T(2Spindle 1Turret (=1Tool post))と表し、同じく2S2T、2S3T、2S4Tと表している。

このサンプル加工物は全45工程で加工される。工具台が1個の場合は、合計1650秒の加工時間を要する。工具台が2個になると表中に数値が記載されている工程が2個目の工具台で同時に加工することが可能となり、その結果加工時間は600秒短縮されて1050秒となる。数値が記載されていない工程は工具台が2個になっても同時加工はできない工程である。同じように3個目の工具台が追加されると加工時間は654秒短縮されて996秒となる。4個目の工具台が追加されても更に同時加工できる工程は増えず、3個目の工具台追加以上の時間短縮効果は得られていない。

当然のことながら、主軸数、工具台数が増加すればコストが増え、それに見合う生産性の向上が得られなければならないが、1つの加工物を加工するにあたっては同時に加工できる箇所は工具同士の干渉や加工順序により制約を受ける。

例えば、下穴を加工した後でないとタップは加工できない。従って無制限に

工具台数を増やしても比例的に生産性を向上させることはできない。

2S2Tと2S4Tの加工時間を比較すると、工具台は2倍の4個になっても加工時間は決して1/2にはならないことが分かる。

次に各構造の機械価格と、加工時間の算出結果をもとにいかに早く投資を回収し利益につながるかを比較する。

ここで、以下のように定義する。

$Tb$ : 投資回収期間 (min)

$Cb$ : 単位時間あたりの売上 (円/min)

$Tb$ は機械の価格  $P$ を用いると次式で表すことができる。

$$Tb = \frac{P}{Cb} \quad (2.18)$$

単位時間当たりの売上は、2S1T機を用いた場合に得られる1個当たりの売上を基に2S2T機、2S3T機、2S4T機の値を算出する。ただし2S1T機の単位時間当たり売上 ( $Cb$ )は50円/minとしている。ここで、添字として2S1T機は1T、2S2T機は2Tとする。

2S1T機の加工賃  $G$ は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} G_{1T} &= T_{1T} \times Cb_{1T} \\ &= 1650 (\text{sec}) \times 50 (\text{円/min}) / 60 \\ &= 1375 (\text{円}) \end{aligned} \quad (2.19)$$

2S1T機と同じ加工賃を得るものとして、2S1T機で求められた加工賃を2S2T機の加工時間で割り、2S2T機の単位時間当たりの売上とする。

$$\begin{aligned}
 Cb_{2T} &= \frac{G_{1T}}{T_{2T}} \\
 &= 1375(\text{円})/1050(\text{sec}) \times 60 \\
 &= 79(\text{円}/\text{min}) \qquad (2.20)
 \end{aligned}$$

同様に2S3Tは83円/min、2S4Tも83円/minとなり、各々の機械の投資回収期間は表2.5の通りとなる。

投資回収期間の比較を図2.8に示す。

尚、ここで2S(2 Spindles)構造を採用している理由は、複合加工機は少なくとも2工程以上の加工を行い、1工程の加工物把握面も加工して、1台の機械で完成品を加工することを目的としているためである。また3S以上の構造は2S構造のように主軸を対向に配置して加工物を自動で受け渡しできる構造が複雑になることと、2S構造でも繰り返し加工物を受け渡しすることで3工程以上の加工は実現できるために採用していない。

以上より2S2T構造がもっとも投資効果が高いことが判る。

**Table2.4 Machining time reduction by using additional tool post**

No.	Machining Process	Machining time (sec)	Machining process by using two tool post (sec)	Machining process by using three tool post (sec)	Machining process by using four tool post (sec)
N00001	End face turning	60			
N00002	O.D. turning	59		59	59
N00003	O.D. turning	29		29	29
N00004	I.D. turning	61	61		
N00005	O.D. grooving	85		85	85
N00006	End face grooving	38			
N00007	I.D. grooving	66	66		
N00008	Threading	40			
N00009	Centering	9	9	9	9
N00010	Centering	17			
N00011	Drilling	25	25	22	22
N00012	Drilling	67			
N00013	Handring	15			
N00014	End face turning	51			
N00015	O.D. turning	34	34	34	34
N00016	I.D. turning	25			
N00017	I.D. grooving	17			
N00018	O.D. milling	254			
N00019	O.D. milling	207	207	207	207
N00020	Tapping	16			
N00021	Tapping	9	9	9	9
N00022	Drilling	7			
N00023	Drilling	6	6	6	6
N00024	Drilling	6			
N00025	Tapping	6			
N00026	Drilling	6	6	6	6
N00027	Tapping	6	6	6	6
N00028	Tapping	10			
N00029	Tapping	11			
N00030	Tapping	18	18	18	18
N00031	Drilling	11		11	11
N00032	Drilling	17			
N00033	Drilling	24	24	24	24
N00034	Tapping	21			
N00035	Drilling	25			
N00036	Tapping	33			
N00037	Tapping	42			
N00038	Tapping	9	9	9	9
N00039	Tapping	23	23	23	23
N00040	Tapping	25			
N00041	Tapping	15			
N00042	Tapping	27	27	27	27
N00043	Tapping	35	35	35	35
N00044	Grooving	48			
N00045	Grooving	35	35	35	35
Reducing time by using additional tool post(sec)		0	600	654	654
Total machining time(sec)		1650	1050	996	996

O.D.: Outer diameter I.D.: Inner diameter

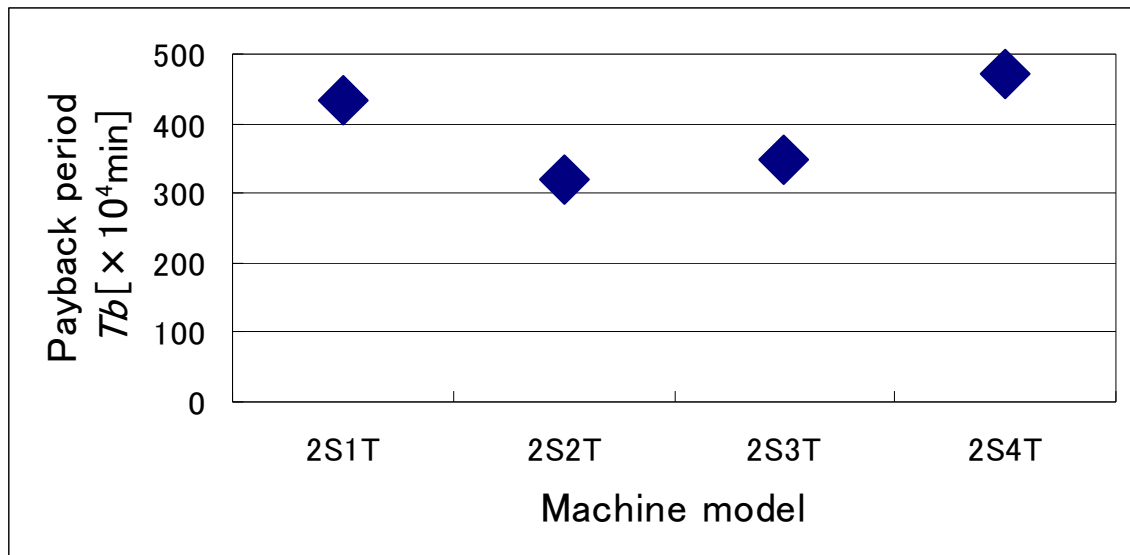
**Table2.5 Relation between number of turrets**

**and payback period**

Structure	2S1T	2S2T	2S3T	2S4T
Machining time $T(\text{sec})$	1650	1050	996	996
Machine Price $P(\times 10^4 \text{ yen})$	2150	2500	2900	3900
Sales per minutes $Cb(\text{yen}/\text{min})$	50	79	83	83
Payback period $Tb(\times 10^4 \text{min})$	432	320	349	470
Comparison index (2S1T=100)	100	74	81	109

S:spindle; T:turret; 2S2T:2spindles and 2turrets;

2S3T:2spindles and 3turrets; 2S4T:2spindles and 4turrets



**Fig.2.8 Comparison of payback period**

## 2.6.2 移動軸の配置の検討

次に、移動軸を加工物（ワーク）側に配置するか工具（刃物）側に配置するかを検討する<sup>42), 43)</sup>。まずはX、Y、Z、B、Cの5軸の移動軸を加工物側に配置するか、1個目の工具側に配置するかについて検討する。

第2.3章の図2.5に示したように旋削工程を含む複合加工を行なう場合は、加工物が長尺物となる場合がある。長尺加工物を加工するために多くの旋盤は加工物軸心を水平に配置する横主軸構造を採用している。更に加工物軸心を中心に回転軸制御を行なうC軸制御を行なってミーリング加工を行なう構造が主として採用されている。

ここでも長尺加工物の加工を想定し、加工物回転にC軸を採用する構造を採用することを前提に、残りのX、Y、Z、B軸について配置を検証してみることにする。

すべての組合せは表2.6に示す通りの16種類となる。加工物（ワーク）をX、Y、Z、B軸方向すべてに移動させる構造がパターン1、同様に工具（刃物）をX、Y、Z、B軸方向すべてに移動させる構造がパターン16である。

先にも述べたように複合加工機では長尺加工物（シャフトワーク）も加工できなければならない。長尺加工物に傾斜面加工を行う場合、加工物もしくは刃物を斜めに割り出す必要があるが、1mを超える長さになる長尺加工物では、加工物を傾斜させるよりは刃物を傾斜させる方が安価で精度の高い機械構造となる。従って傾斜面加工を行うためのB軸は刃物側に配置する構造が有利となり、候補は表2.6中で網掛けで示した8パターンに絞られる。図2.9に長尺加工物（シャフトワーク）に対応した複合加工機の事例をそのサンプル加工物を示す。

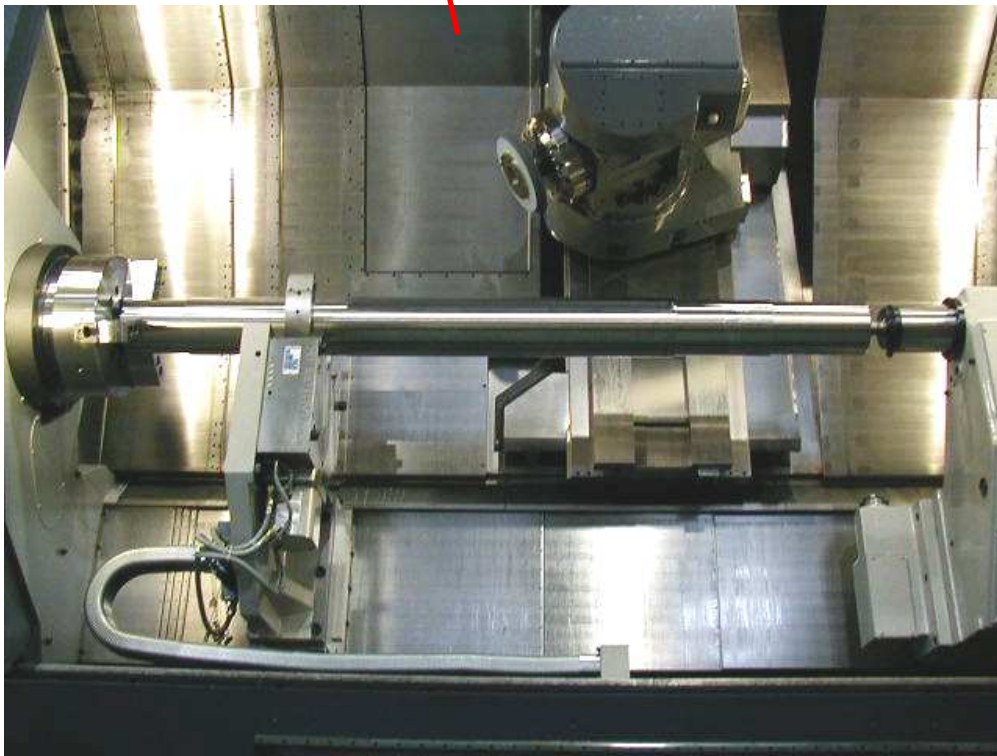
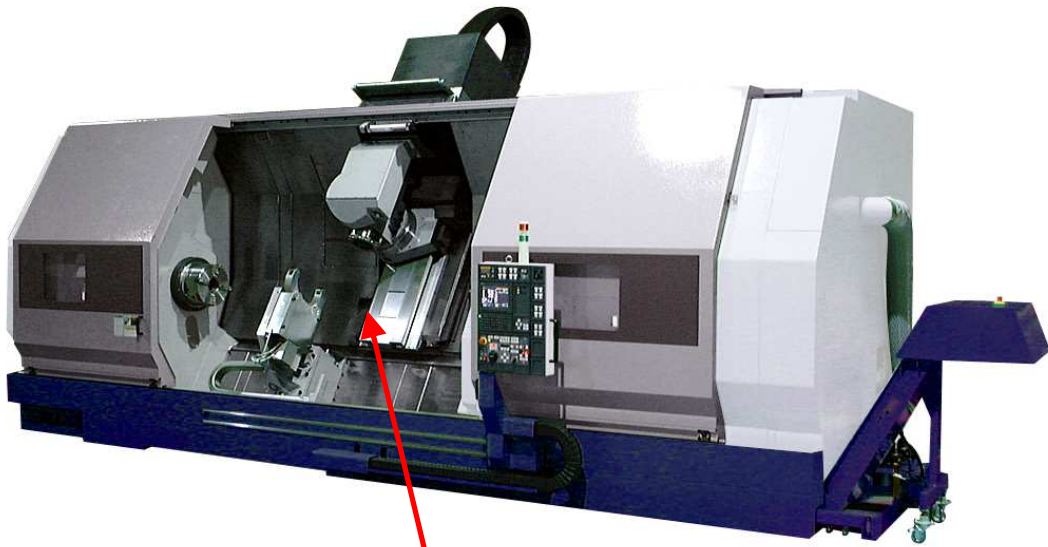
投資効果を高くするためには刃物を2個用いる2S2T構造が有利であることは先に述べた。この構造を採用するためには加工物を動かさずに2個の刃物が動く構造が適している。仮に加工物をX、Y、Zのいずれかに移動させる構造を採用すると、どちらか一方の刃物は他方の刃物に対する加工物の動きに追従する動作を行った上で自身の動きを構成する必要が生じて複雑となり、さらに余分なコストを生じる。よってパターン16のX、Y、Z、B軸は工具（刃

物) 側に配置した構造が最適となり、その結果2個目の工具台を移動させるための移動軸も工具側に配置する構造を採ることになる。図2.10に2S2T構造を持つ複合加工機の事例を示す。左右に向かい合う形で固定に配置された2つの主軸台に加工物が把持され、この2つの主軸の中心線を結ぶ軸を対称として上下に配置された各々独立して軸移動が可能な工具台が左右どちらの主軸台にも自在にアクセスできる構造となっている。

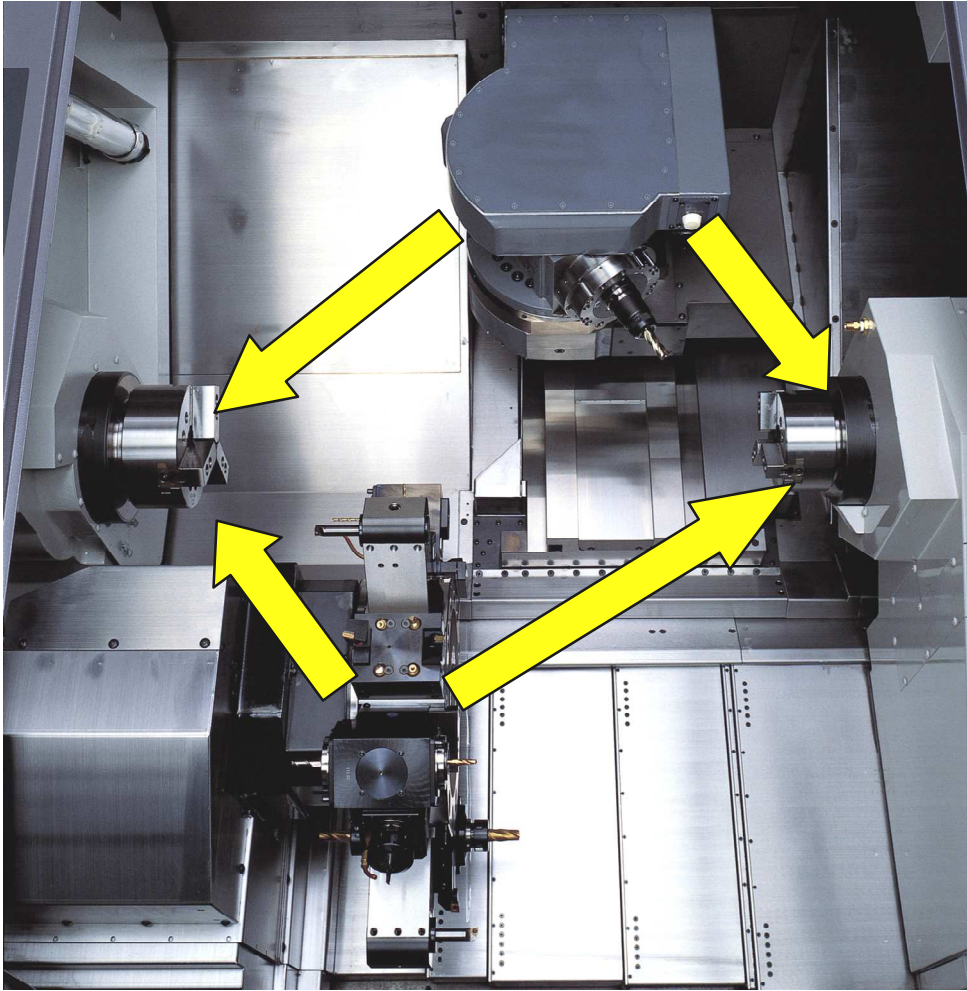
以上より、加工物側にC軸、工具側にX、Y、Z、B軸を配置した5軸構造がより多くの加工物、特に長尺加工物に対応でき、かつ経済性の高い構造と言える。

**Table2.6 Different combinations of layout of axes**

Pattern	Xaxis	Yaxis	Zaxis	Baxis	Caxis
1	workpiece	workpiece	workpiece	workpiece	workpiece
2	workpiece	workpiece	workpiece	<u>tool spindle</u>	workpiece
3	workpiece	workpiece	tool spindle	workpiece	workpiece
4	workpiece	tool spindle	workpiece	workpiece	workpiece
5	tool spindle	workpiece	workpiece	workpiece	workpiece
6	workpiece	workpiece	tool spindle	<u>tool spindle</u>	workpiece
7	workpiece	tool spindle	workpiece	<u>tool spindle</u>	workpiece
8	tool spindle	workpiece	workpiece	<u>tool spindle</u>	workpiece
9	workpiece	tool spindle	tool spindle	workpiece	workpiece
10	tool spindle	tool spindle	workpiece	workpiece	workpiece
11	tool spindle	workpiece	tool spindle	workpiece	workpiece
12	tool spindle	tool spindle	tool spindle	workpiece	workpiece
13	tool spindle	tool spindle	workpiece	<u>tool spindle</u>	workpiece
14	tool spindle	workpiece	tool spindle	<u>tool spindle</u>	workpiece
15	workpiece	tool spindle	tool spindle	<u>tool spindle</u>	workpiece
16	tool spindle	tool spindle	tool spindle	<u>tool spindle</u>	workpiece



**Fig.2.9 Compound multiaxis machine tool for shaft workpiece**



**Fig.2.10 Structure of 2 spindles 2 turrets**

### 2.6.3 基本構造の検討

次に決定した主軸、送り軸の個数、移動軸の配置を実際に実現できる構造を検討する。

基本の構造としては先に述べた通り、加工物軸心を水平に配置しC軸制御を行なう構造を採用し、更に1個目の工具（刃物）をX、Y、Z、B軸方向に移動制御する構造を採用する。2個目の工具はX、Z軸方向に2軸移動するだけの単純な構造であるため、ここでは1個目の工具を移動させるための構造について検討する。また1個目の工具を移動させる4軸のうち、回転移動軸であるB軸については、旋回径を出来る限り小さくして機械をコンパクトにするために4軸の中で最上段に配置するいわゆる首振り主軸の構造を採用する。よって残る直交3軸移動部について構造の検討を行う。

工具を移動させる機械構造としては工具主軸の姿勢から、

- ・ 工具主軸を水平に配置する : 横形構造
- ・ 工具主軸を垂直に配置する : 立形構造
- ・ 工具主軸を斜めに配置する : スラント形構造

が考えられる。

また基台をなすベッドの上にコラムを構成し、更に送り台を積み重ねていく構造となるが、移動軸の基台となるコラムの構成から、

- ・ コラムを1本で構成する : シングルコラム構造
- ・ コラムを2本で構成する : ダブルコラム構造（門形構造）

が考えられ、更に、

- ・ コラムを移動させる構造 : コラム移動軸形
- ・ コラムを移動させない構造 : クイル移動軸形

などが考えられる。

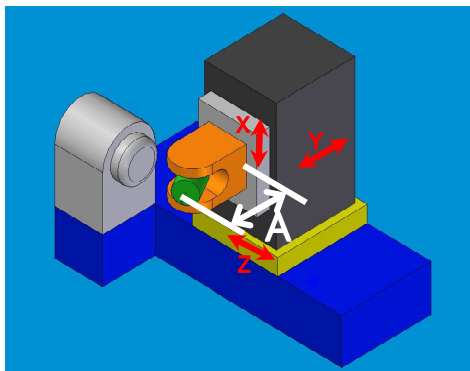
これらの組み合わせの中から実際に採用可能な構造である下記の8種類の構造について検証する<sup>44), 45), 46), 47)</sup>。

- 1) 横形 コラムY軸移動構造
- 2) 横形 クイルY軸移動構造
- 3) 立形 コラムY軸移動構造

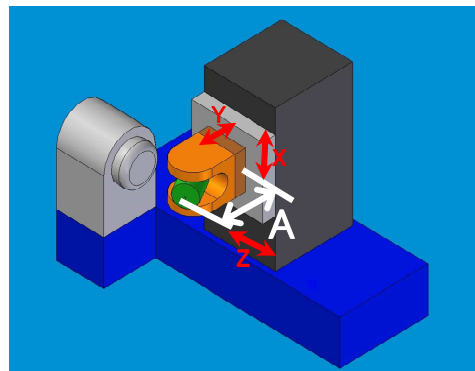
- 4) 立形 クイルY軸移動構造
- 5) スラント形 コラムY軸移動構造
- 6) スラント形 クイルY軸移動構造
- 7) 門形 スライダX軸移動構造
- 8) 門形 レールX軸移動構造

図2.11に8種類の構造を示す。

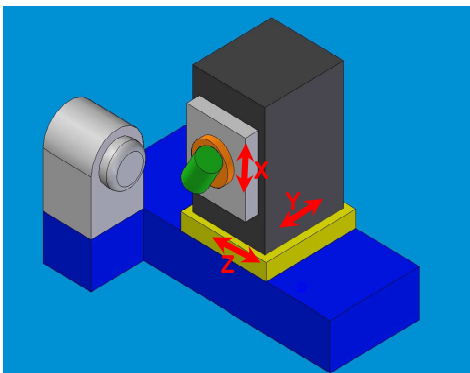
また表2.7に特徴の比較を示す。



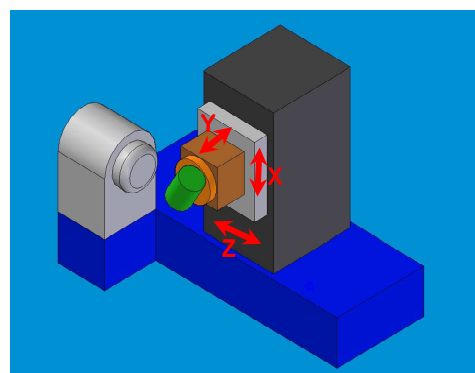
1) Horizontal : Column movable



2) Horizontal : Quill movable

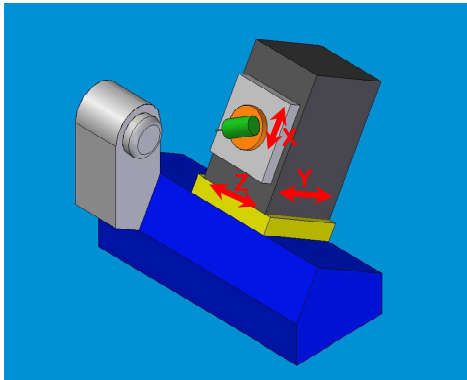


3) Vertical : Column movable

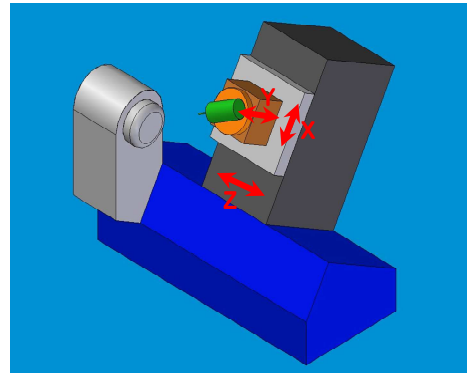


4) Vertical : Quill movable

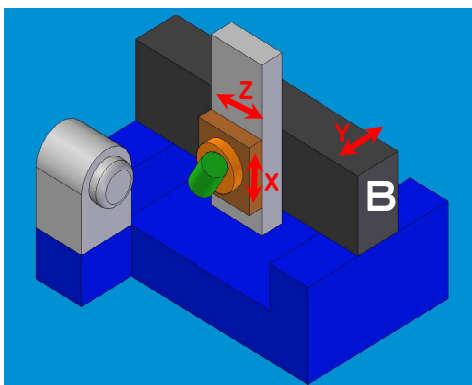
**Fig.2.11 Eight types of confiuretions**



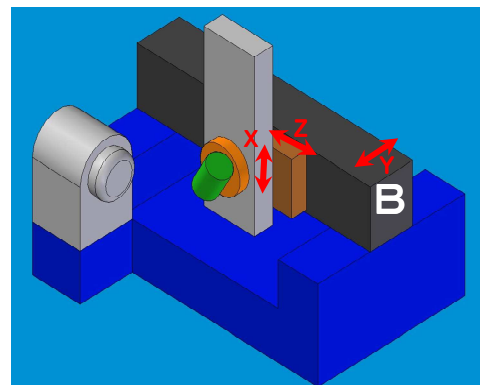
5) Slanted : Column movable



6) Slanted : Quill movable



7) Bridge : Linear slider movable configuration along X axis



8) Bridge : Linear rail movable configuration along X axis

**Fig.2.11 Eight types of configurations (continued)**

**Table2.7 Comparison of 8 configurations**

	1)	2)	3)	4)	5)	6)	7)	8)
Effect on tool positioning change due to axis movement		×	○	×	○	×		
Moving mass				○		○	×	×
Reaction force to cutting force	×	×	○		○			
Force loop							×	×
Thermal symmetry					×	×		
Chip removal	○	○			×	×		
Machining envelope/installation floor area	×	×			○	○		
Ease of precision adjustment	○	○	○	○	×	×		
Ease of making machine parts	○	○	○	○	×	×		
Numbers of components							×	×
Interference		○		○		○		○
Cutting area visibility	×	×	○	○			○	○
Ease of setup	×	×	○	○			○	○
Overall evaluation	△	△	○	○	△	△	△	△

○: Acceptable, △: Possible, ×: Unacceptable empty: no feature

各々の構造の主な特徴は以下の通りである。尚、○印は長所を、×印は短所を示す。

1)の横形コラムY軸移動構造は以下の特徴を持つ。

- コラム移動のため軸移動に伴う姿勢変化が少ない。
- 加工点の真下に切粉ポケットが有り、切粉の排出性が良い。
- 構造物が方形で部品の製作が容易でかつ、精度が出し易い。
- ×工具主軸の旋回機構を配置するためのスペースが工具刃先から案内面までの距離を遠くする。(図2.11の1)のA寸法部)
- ×その結果、広いフロアスペースが必要となる。
- ×加工ポイントが作業者の裏側になるため見え難い。
- ×加工ポイントが作業者から離れているため、工具や加工物の段取り替え作業が困難。

2)の横形クイルY軸移動構造は以下の特徴を持つ。

- 加工点の真下に切粉ポケットが有り、切粉の排出性が良い。
- 構造物が方形で部品の製作が容易でかつ、精度が出し易い。

- クイル構造のため、懐が深く加工の際に治具などとの干渉が少なくできる。
  - クイル構造のため、Y軸の移動物重量が小さくできる。
  - ×工具主軸の旋回機構を配置するためのスペースが工具刃先から案内面までの距離を遠くする。（図2.11の2）のA寸法部）
  - ×その結果、広いフロアスペースが必要となる。
  - ×加工ポイントが作業者の裏側になるため見え難い。
  - ×加工ポイントが作業者から離れているため、工具や加工物の段取り替え作業が困難。
  - ×クイル軸の出入りに伴う片持ち支持重量の変化による刃先の姿勢変化が生じ易い。
- 3)の立形コラムY軸移動構造は以下の特徴を持つ。
- コラム移動のため軸移動に伴う姿勢変化が少ない。
  - 刃先から案内面までの距離も短くできる。
  - 構造物が方形で部品の製作が容易でかつ、精度が出し易い。
  - 加工点が作業者側にあり、視認性が良い。
  - 同様に、加工点が作業者側にあり、段取り替えなどの作業性も良い。
- 4)の立形クイルY軸移動構造は以下の特徴を持つ。
- クイル構造のため、懐が深く加工の際に治具などとの干渉が少なくできる。
  - クイル構造のため、Y軸の移動物重量が小さくできる。
  - 構造物が方形で部品の製作が容易でかつ、精度が出し易い。
  - 加工点が作業者側にあり、視認性が良い。
  - 同様に、加工点が作業者側にあり、段取り替えなどの作業性も良い。
  - ×クイル軸の出入りに伴う片持ち支持重量の変化による刃先の姿勢変化が生じ易い。
- 5)のスラント形コラムY軸移動構造は以下の特徴を持つ。
- コラム移動のため軸移動に伴う姿勢変化が少ない。
  - 刃先から案内面までの距離も短くできる。

- スラント構造のため軸の移動距離を斜め空間上に配置でき、フロアスペースあたりの加工容積が大きい。
  - ×主軸台やその他の構造物が綺麗な対称構造とならず熱変位が大きい。
  - ×同様に部品の製作が難しく、精度も出し難い。
  - ×スラント構造のため精度調整が困難。
  - ×加工点の真下に案内部が配置されるため切粉が堆積し易い。
- 6)のクイル形コラムY軸移動構造は以下の特徴を持つ。
- クイル構造のため、懐が深く加工の際に治具などとの干渉が少なくできる。
  - クイル構造のため、Y軸の移動物重量が小さくできる。
  - スラント構造のため軸の移動距離を斜め空間上に配置でき、フロアスペースあたりの加工容積が大きい。
  - ×クイル軸の出入りに伴う片持ち支持重量の変化による刃先の姿勢変化が生じ易い。
  - ×主軸台やその他の構造物が綺麗な対称構造とならず熱変位が大きい。
  - ×同様に部品の製作が難しく、精度も出し難い。
  - ×スラント構造のため精度調整が困難。
  - ×加工点の真下に案内部が配置されるため切粉が堆積し易い。
- 7)の門形スライダX軸移動構造は以下の特徴を持つ。
- 加工点が作業側側にあり、視認性が良い。
  - 同様に、加工点が作業側側にあり、段取り替えなどの作業性も良い。
  - ×梁などの構造物が大きく、移動物に重量も重くなる。(図2.11の7)の部品B)
  - ×同様に部品点数も多くなる。
  - ×力のループが大きくなってしまう。
- 8)の門形レールX軸移動構造は以下の特徴を持つ。
- 加工点が作業側側にあり、視認性が良い。
  - 同様に、加工点が作業側側にあり、段取り替えなどの作業性も良い。
  - 加工エリアに案内面が突き出さない構造のため干渉が少ない。

×梁などの構造物が大きく、移動物に重量も重くなる。（図2.11の8）の部品B）

×同様に部品点数も多くなる。

×力のループが大きくなってしまう。

以上の結果、立形構造が全般に高い評価を示すことが明らかになった。

立形構造は際立った欠点が無いこと、重力に逆らわない立方体の構造物を基本としているため精度、剛性が確保し易いこと、加工ポイントへの接近性が良いことなどが高い評価につながっている。

横形構造やスラント形構造は立形構造をベースに自動化への対応を容易にするために考案されてきた構造である。また門形構造はどちらかと言えば大型の加工物を対象に考案されてきた構造である。

第2.2章で明らかになったように複合加工機は加工精度を高くすることが要求されており、そのためには機械精度や剛性を確保するための素質に優れた構造を選ぶ必要がある。その観点から、機械の基本構造としては古典的ともいえる立形の構造が原理的には優れていることが確認された。

## 2.7 結言

複合加工機に要求される加工精度と加工時間を実現するための仕様と基本構造を検討するにあたり、複合加工機で加工されている加工物107点440工程を分析した結果、外径旋削加工や外径ドリル加工、内径旋削加工、端面旋削加工、端面ドリル加工などの基本的な加工に着目する必要があることが明らかになった。そこで、求められる加工時間を実現するための仕様を採算性を考慮して従来のNC工作機械と比較しながら検討し、またその加工時間を実現しかつ高い加工精度を得るための基本構造の検討を行った結果、次の結論を得た。

(1) 複合加工機を用いて従来の加工機械（NC旋盤や複合旋盤）で加工されていた加工物を加工する場合は、投資を一定の期間で回収して利益を従来の加工機と同等にするという観点から、従来の加工機に比べて1.15倍～1.5倍速く加工できなければ従来の加工機と同等の採算を得ることができない。

また、式(2.10)を用いることよって、ある部品を加工する際の稼働条件（稼働時間、稼働率）と稼働に要する単位費用（固定費、変動費）が同じであれば、もともと加工している機械での加工賃と加工時間、その機械の価格、そして新たに導入する機械の価格が分かれば、その加工物を新たに導入する機械で加工するときの要求加工時間の算出が可能となった。

(2) 複合加工機で加工される代表的な加工物を最も投資効果が高く加工できる機械構造は、加工物主軸を2個、工具台を2個配置した構造であることが明らかになった。

(3) 複合加工機の基本構造として実際に採用し得る構造を比較検討した結果、最も有用な構造は工具を4軸移動させ、加工物を回転移動させる機構を持つ、構造としては古典的とも言える立形構造が有利であることが明らかになった。

## 第3章

# 複合加工機の基本構造の詳細検討

### 3.1 緒言

第2章では複合加工機で加工される加工物と加工工程を分析し、投資金額から必要とされる生産性を定義し、それに基づいて仕様を決定し、実際に実現し得る構造を検討した結果、加工物主軸を2個、工具台を2個配置し、1個目の工具を4軸移動させ、2個目の工具を2軸移動させ、加工物を回転移動させる構造を持ち、1個目の工具を4軸移動させる構造としては古典的とも言える立形構造が有利であることが明らかになった。<sup>48)</sup>

本章では、更に詳細に複合加工機に求められる詳細構造の検討を行う。具体的には、加工物側にC軸移動の1軸を配置し、工具側にX、Y、Z、B軸の4軸移動を配置する5軸移動の立形構造について検討する。<sup>49)</sup>

直線3軸(X、Y、Z)、回転2軸(B、C)の構造を持つ5軸加工機については<sup>50), 51)</sup>、ダイレクトドライブモータの開発<sup>52), 53)</sup>や高機能な制御装置の開発<sup>54)</sup>を背景として近年盛んに研究事例が報告されている。その内容は、1つは5軸加工機を用いた加工方法、加工技術<sup>55)</sup>つまり5軸加工機の利用技術<sup>56)</sup>、そして5軸加工機の空間精度の評価技術<sup>57), 58)</sup>、および5軸加工機の基本構造などであるが<sup>59), 60), 61)</sup>、いずれも5軸制御のマシニングセンタをベースとしたものであり、旋削加工も行うこと前提とした5軸構造を持つ複合加工機に要求される基本構造についての報告事例はあまり行われていない。<sup>62), 63), 64), 65), 66), 67)</sup>

そこで本章では、複合加工機で採用し得る構造を前提として、直線3軸、回転2軸を持つ5軸移動構造の中から複合加工機に要求される剛性と運動精度を最も高くできる構造について検討を行う。<sup>68), 69), 70), 71), 72), 73)</sup>

### 3.2 直交 3 軸移動部の構造の詳細検討

加工物を回転移動させる C 軸については第 2 章でも述べたように、NC 旋盤と同様シャフト状の長尺加工物にも対応するために、横向きで、軸移動を行わない固定された構造を採用する必要がある。また同様に工具を移動させる 4 軸のうち、回転移動軸である B 軸については、旋回径を出来る限り小さくして機械をコンパクトにするために 4 軸の中で最上段に配置するいわゆる首振り主軸の構造を採用する必要があることを述べた。従って本章では、残る直交 3 軸移動部について構造の詳細検討を行う。首振り主軸の構造を持つ複合加工機の基本構造の事例を図 3.1 に示す。

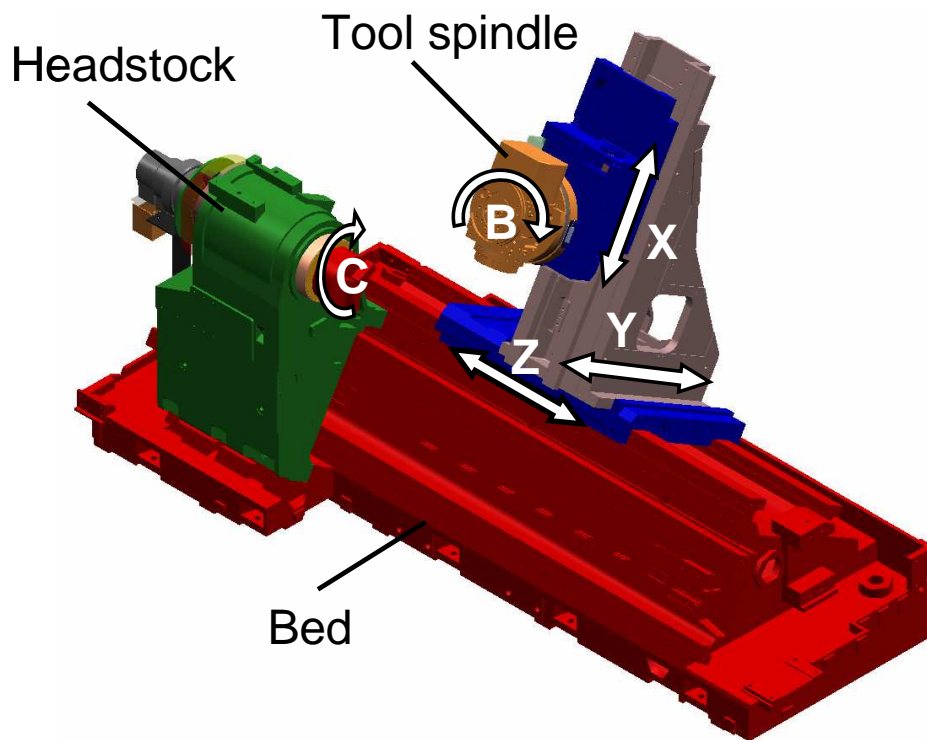
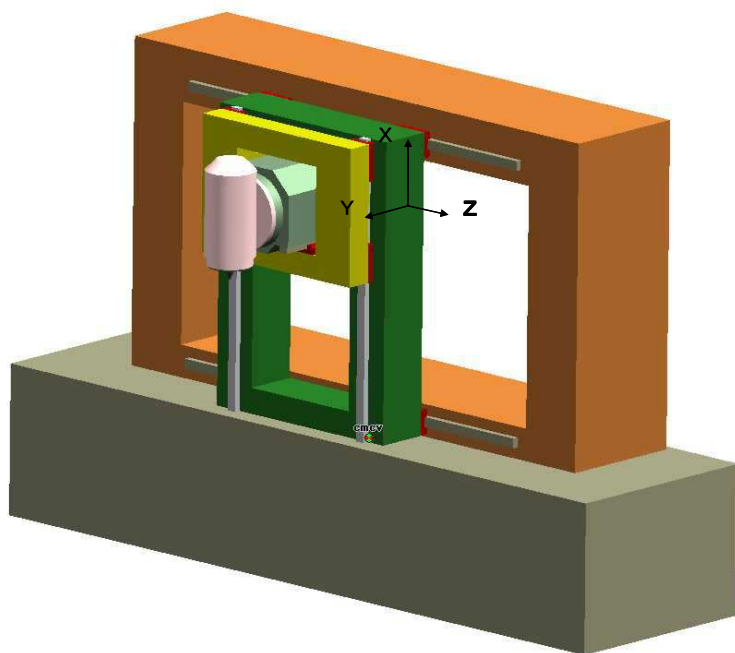


Fig.3.1 Sample structure of 5-axis compound multiaxis machine tool

工作機械の基本構造を決定するための手法についてはモジュール構成の概念などを基に様々な手法が提案されているが<sup>74), 75), 76), 77), 78), 79)</sup>、X、Y、Zの3軸移動部を決定する方法としては、基本的な形態差であるコラムの構成の違い（シングルコラム構造か、ダブルコラム構造か）、もしくは構造物の支え方の違い（片持ち構造か、両持ち構造か）により考えられる構造を総当りに組合せてみる方法が考えられる。しかし、現実には明らかに実現できない構造や結果的に他の構造と同じになってしまうものがあり、結局は従来からよく用いられている構造が多頻度に用いられる組合せであり<sup>80)</sup>、その中から基本形としての特徴が異なる以下の3種類の構造について考察する。

#### (1) Box in box 構造

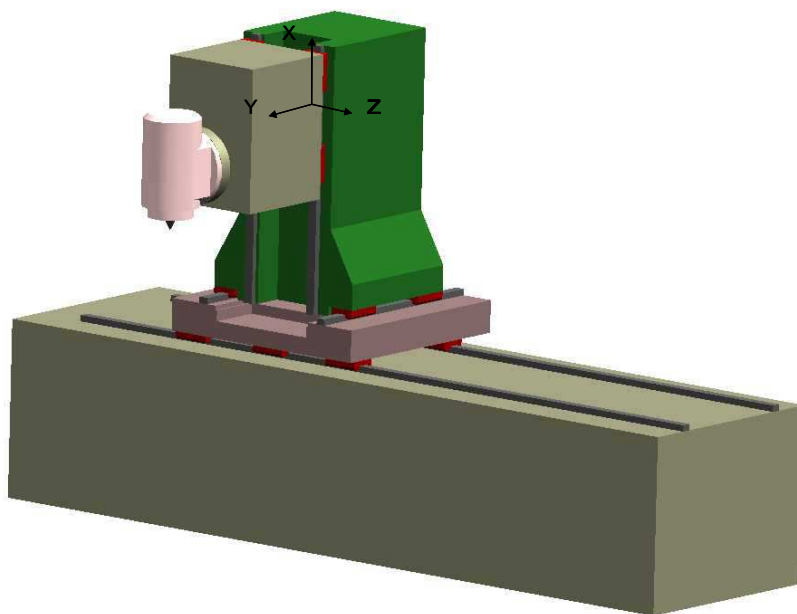


**Fig.3.2 Box in box structure**

大きな箱構造の内側で小さな箱構造の移動物が移動する構造を積み重ねて構成される構造で、古くは精密ジグボウなどに多く採用されていた。案内

部、駆動部を左右線対象に配置することで等価的に移動物の重心を駆動することが可能となり、アッベ誤差を最小に抑えることができる反面、駆動機構が2倍必要である、総じて大きな構造物が必要となる、などの欠点もある。

## (2) コラム Y 軸移動構造

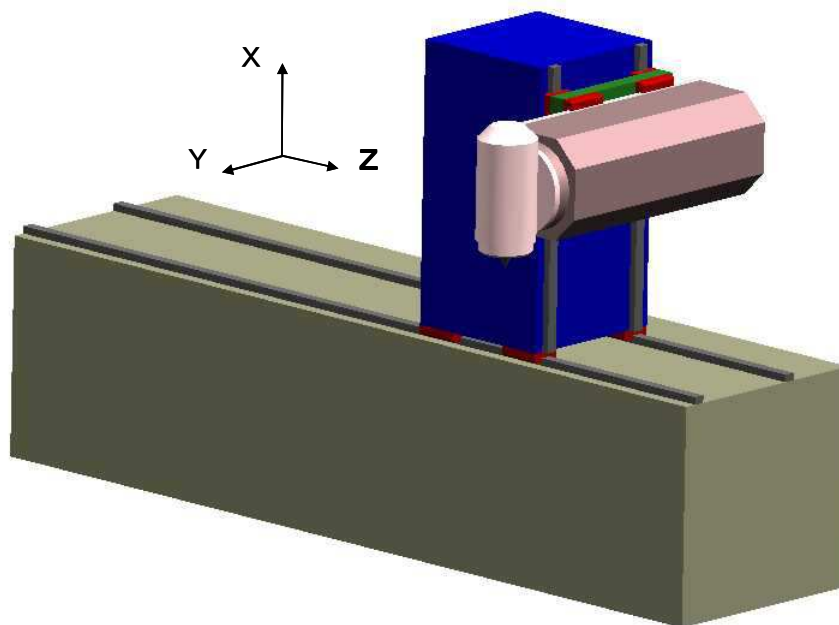


**Fig.3.3 Movable column Y-axis structure**

工具を水平前後方向（Y方向）に移動させる軸をコラムの前後移動により構成する構造。

工具3軸移動形のマシニングセンタで多く用いられている構造で、各軸の移動体が立方体構造で成り立つため、コンパクトで剛性を高めることができる。反面、案内面から工具先端までの距離が遠く、アッベ誤差を生じ易いといった欠点もある。

### (3) 中ぐり盤構造



**Fig.3.4 Boring machine structure**

工具を水平前後方向（Y方向）に移動させる軸をコラムの側面からクイル（筒状構造物）が突き出すように構成する構造で、内径ボーリング加工を得意とする中ぐり盤で多く採用されていた構造で、水平軸であるY軸の真直性に優れ、コンパクトでかつ付帯ケーブルなどの処理が容易な構造である。その反面、コラムY軸移動構造と同様に案内面から工具先端までの距離が遠い、非線対称構造のため力、熱挙動にアンバランスが生じ易いなどの欠点がある。

以上の3構造について各々、図3.2、図3.3、図3.4に示すような簡易モデルを用いて、複合加工機に要求される精度、生産性を満たすのに適した特性を比較検討する。<sup>81),82),83)</sup>

比較する項目は、剛性と運動精度を高めるために考慮すべき以下の4要素

である。<sup>84), 85)</sup>

- 1) 軸移動に伴う剛性値の変化
- 2) 共振周波数
- 3) 移動物重量
- 4) 駆動点から重心までの距離（アッペ誤差の生じ難さ）

ただし同じ条件下での比較を行うために共通とする項目とその内容について表 3.1 に示す。

**Table3.1 Same pre-conditions of three sstructure**

Cutting tool spindle	
Dimension	$\phi$ 270×500 mm
Mass	180 kg
Structure	Typical cutting tool, tool spindle unit as well as joints of tool spindle with column are adopted to be rigid bodies.
B axis (tool spindle rotational axis)	
Dimension	$\phi$ 290×150 mm
Mass	150 kg
Structure	B axis unit and joint components of B axis are assumed to be rigid bodies.
Bed	
Dimension	800×800×3000 mm
Mass	3500 kg
Material	Cast iron FC300 (JIS)
Structure	Ribs and panels without partition
Other structure	
Material	Cast iron FC300 (JIS)
Structure	Ribs, panels without partition
Thickness	25 mm
Stroke	
X axis	600 mm
Y axis	250 mm
Z axis	1500 mm
Linear guide type and installation	
Equivalent to type	45mm size for X, Y and Z axis
Distance between the guide rails for X axis	500 mm
Distance between the guide rails for Y axis	700 mm
Distance between the guide rails for Z axis	1000 mm
Note	The distance between the guide rails for Y axis and that for Z axis are 500 mm and 1800 mm apart respectively for the box in box structure.

### 3.3 軸移動に伴う剛性値の変化の比較

図 3.6 は、X 軸、Y 軸が図 3.5 で示す位置に停止している時の刃先位置における各々の軸方向の静剛性値を図 3.2、図 3.3、図 3.4 で示すモデルを用いて解析した結果である。尚、本研究では解析ソフトに SolidEdge および UGSPLM I-Deas を使用している。<sup>86)</sup>

グラフは各々、下記を示す。

Box  $\delta$  : Box in box 構造の静剛性値

Column  $\delta$  : コラム Y 軸移動構造の静剛性値

Bore  $\delta$  : 中ぐり盤構造の静剛性値

X 軸方向は旋削加工を行う場合の背分力を受ける方向、Y 軸方向は主分力を受ける方向、Z 軸方向は送り分力を受ける方向に相当する。

Z 軸位置は一定として、X、Y の位置が変わることによって各々の構造体の静剛性がどのように変化するかを比較したものであるが以下のことが判る。

①X 軸方向の剛性値の比較において、Box in box 構造は Y 軸がマイナス側の場合に（Y 軸の突き出しが短い場合に）相対的に高い剛性値を示し、Y 軸の位置によって剛性値が大きく変化する。

②Z 軸方向の剛性値比較において同様に、Box in box 構造、中ぐり盤構造は Y 軸の位置によって大きく剛性値が変化し、Y 軸マイナス側で剛性値が相対的に高くなる。

③コラム Y 軸移動構造は相対的に剛性値が低いですが、X、Y の位置のよる剛性値の変化が小さく、安定している。

この解析結果は重要な指標となる。もとより製品設計を行う際の最終的な剛性の設計値は実際の製品モデルを詳細に設計し、剛性の設計値をクリアできる構造を決定していく必要があるが、基本構造を決める段階で上記のような簡易モデルを用いて各構造ごとの剛性値の変化の特性、その差異を把握することは製品開発の初期のステップで重要である。

上記の解析結果は同じ容積内においてできるかぎり高い剛性値を得るためには Box in box 構造もしくは中ぐり盤構造を採用した方が有利であるこ

とが判るが、その一方で複合加工機のように多彩な加工物を加工する機械では、切削反力を受ける方向や位置が様々に変化するため、剛性値の変化や軸間のアンバランスは極力小さくしたいが、この点ではコラム Y 軸移動構造が基本構造としては有利であることが判る。

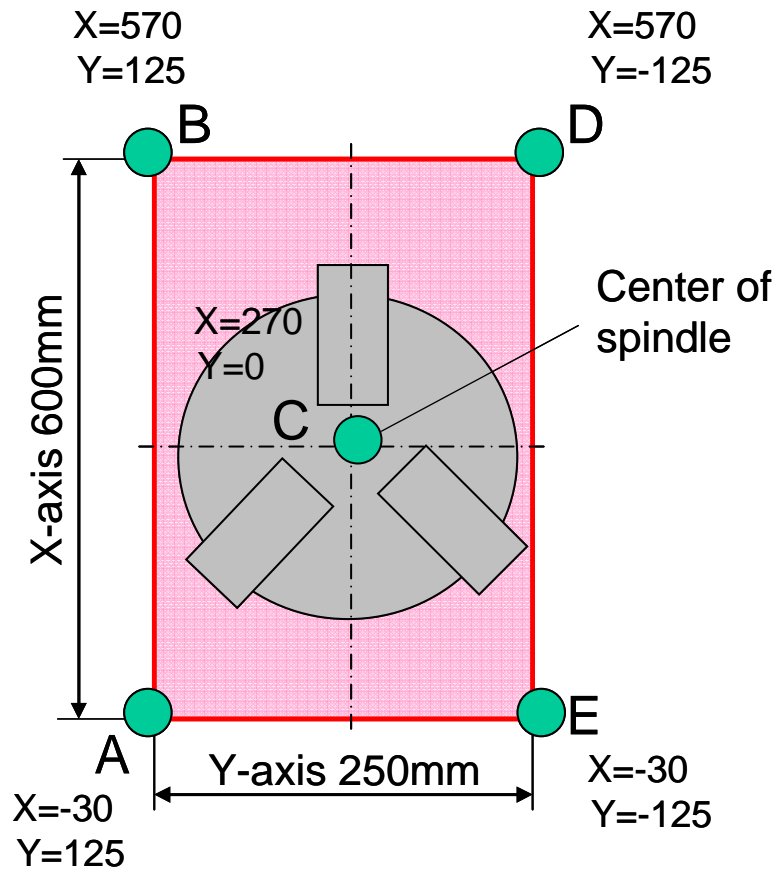
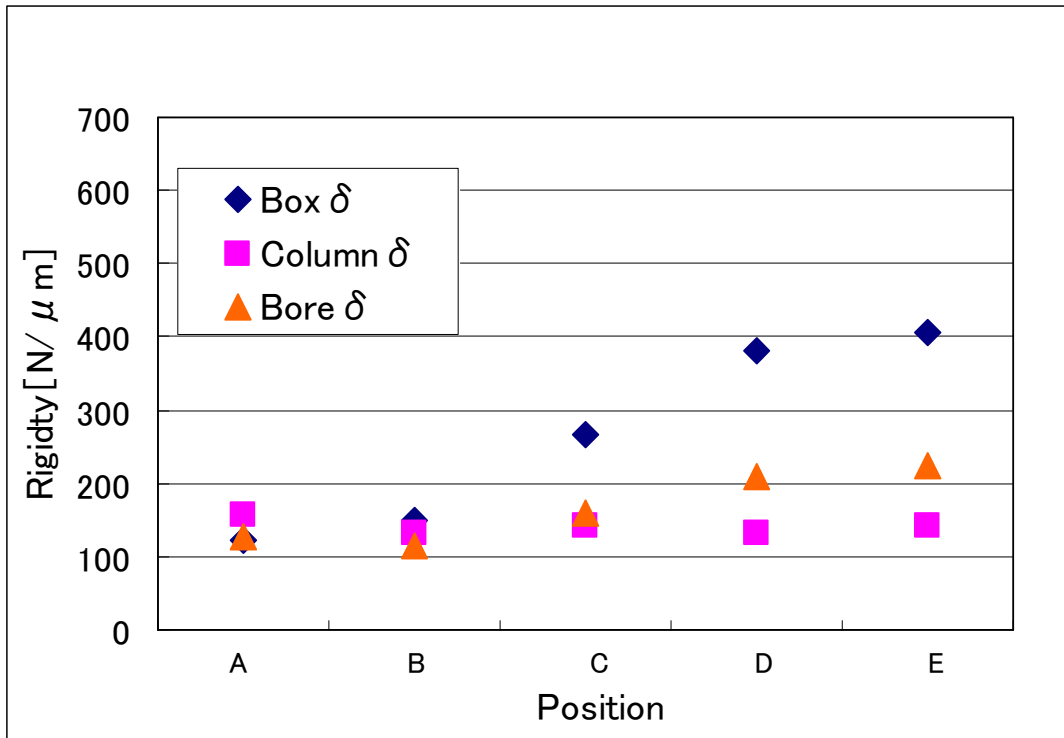
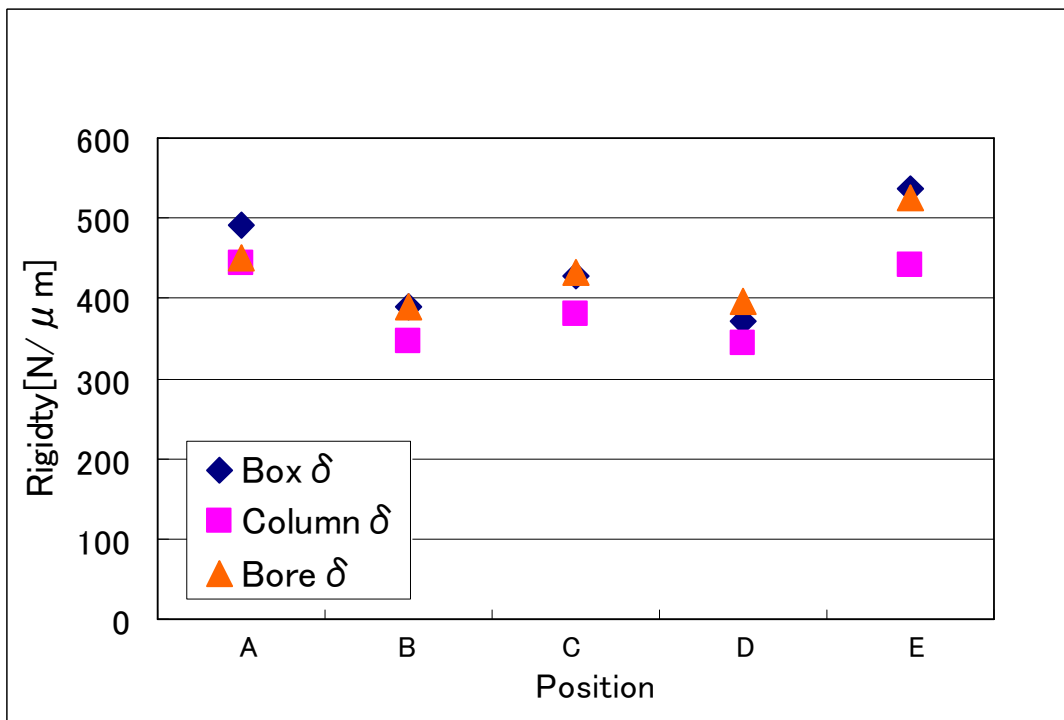


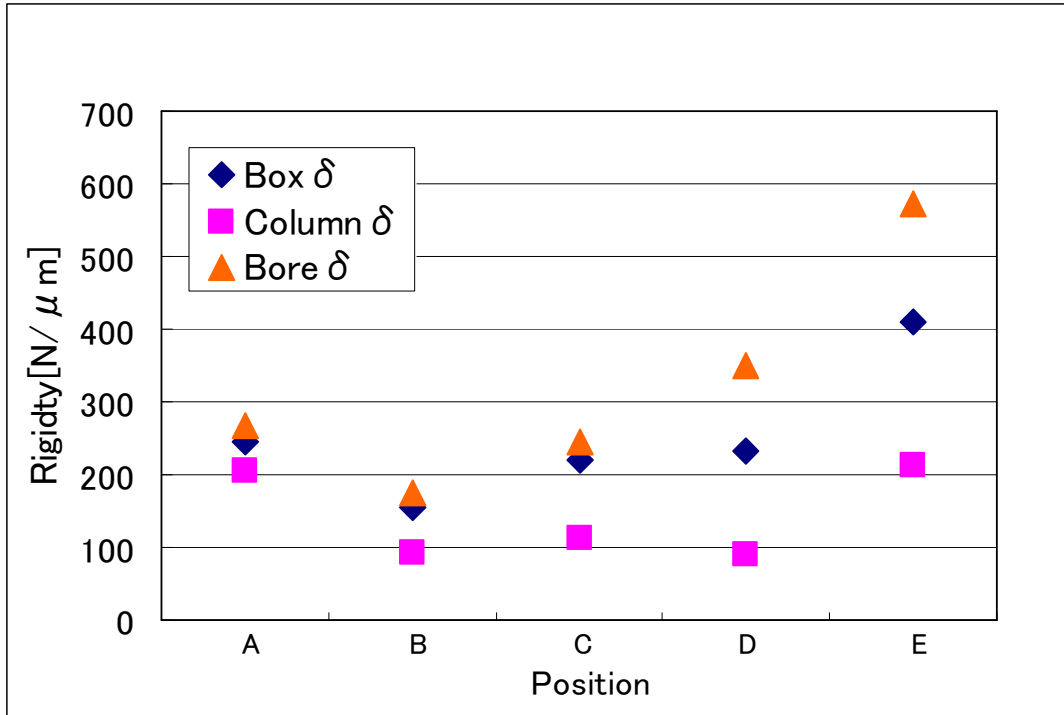
Fig.3.5 Location of tool where rigidity is analyzed



(a) X direction



(b) Y direction



(c) Z direction

Fig.3.6 Comparison of rigidity

### 3.4 共振周波数の比較

次に共振周波数の比較を行う。<sup>87)</sup>

図 3.7 中の棒グラフ名称は以下の通りである。

Box : Box in box 構造の共振周波数

column : コラム Y 軸移動構造の共振周波数

bore : 中ぐり盤構造の共振周波数

図 3.7 より Box in box 構造は他の 2 つの構造に比べて低い共振周波数を持つことが分かる。

これは図 3.8 に示すように Box in box 構造の特徴である箱構造のコラムの固有値が相対的に低いことが要因となっている。

一般的に工作機械は共振周波数が高い方が応答性が良くなり、高速での軸移動や短時間での加減速運転に適している。Box in box 構造は他の 2 つの構造に比べて共振周波数、特にコラムの剛性値に留意した設計が必要となる。

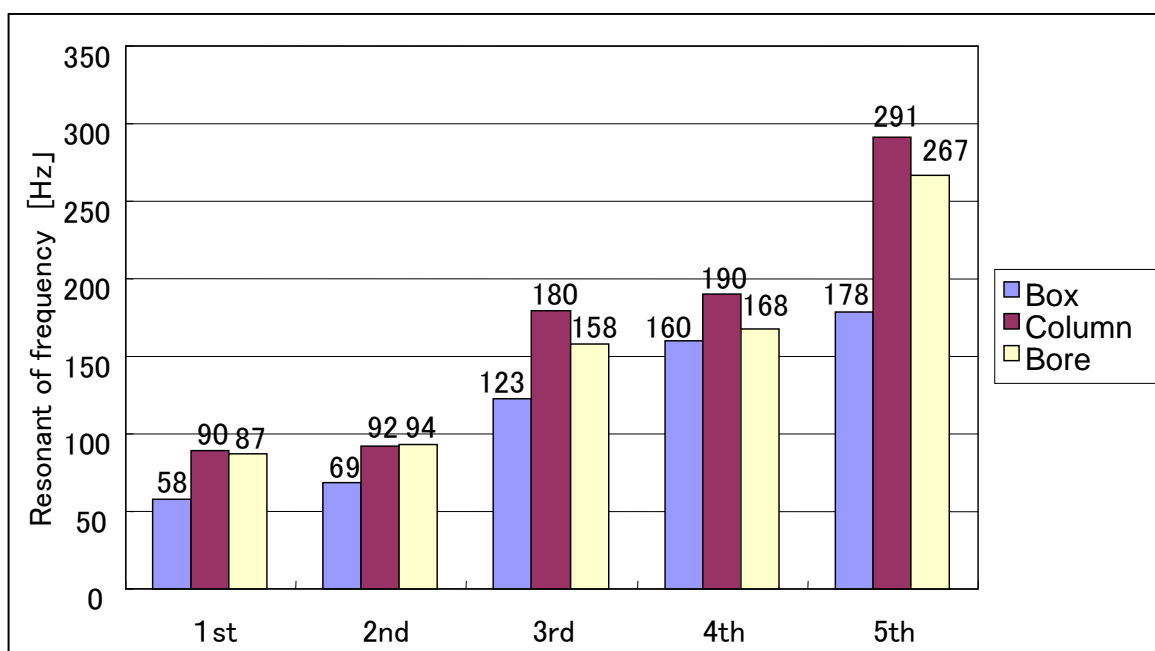
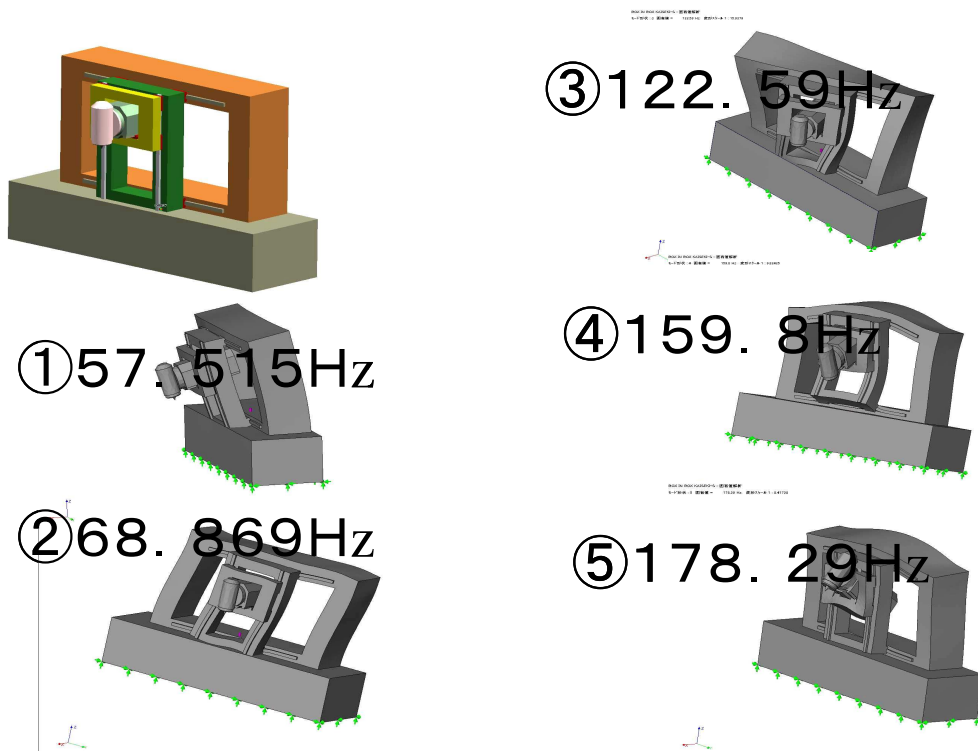


Fig.3.7 Comparison of resonant frequency



**Fig.3.8** Vibration modes of box in box structure

### 3.5 移動物重量の比較

図 3.9 は移動物重量を比較している。

図中の棒グラフ名称は下記の通りである。

Box : Box in box 構造の移動物重量

Column : コラム Y 軸移動構造の移動物重量

Bore : 中ぐり盤構造の移動物重量

コラム Y 軸移動構造の移動物重量が全般に大きくなっている。特に Y 軸の移動物重量が他の 2 つの構造に比べてかなり重くなる傾向にある。

移動物の重量を小さくするということは一般には剛性値の低下を招く方向となる。コラム Y 軸移動構造はその相反する課題が他の 2 つの構造に比べて大きい。

移動物重量を小さくするという要件では Box in box 構造や中ぐり盤構造が有利である。

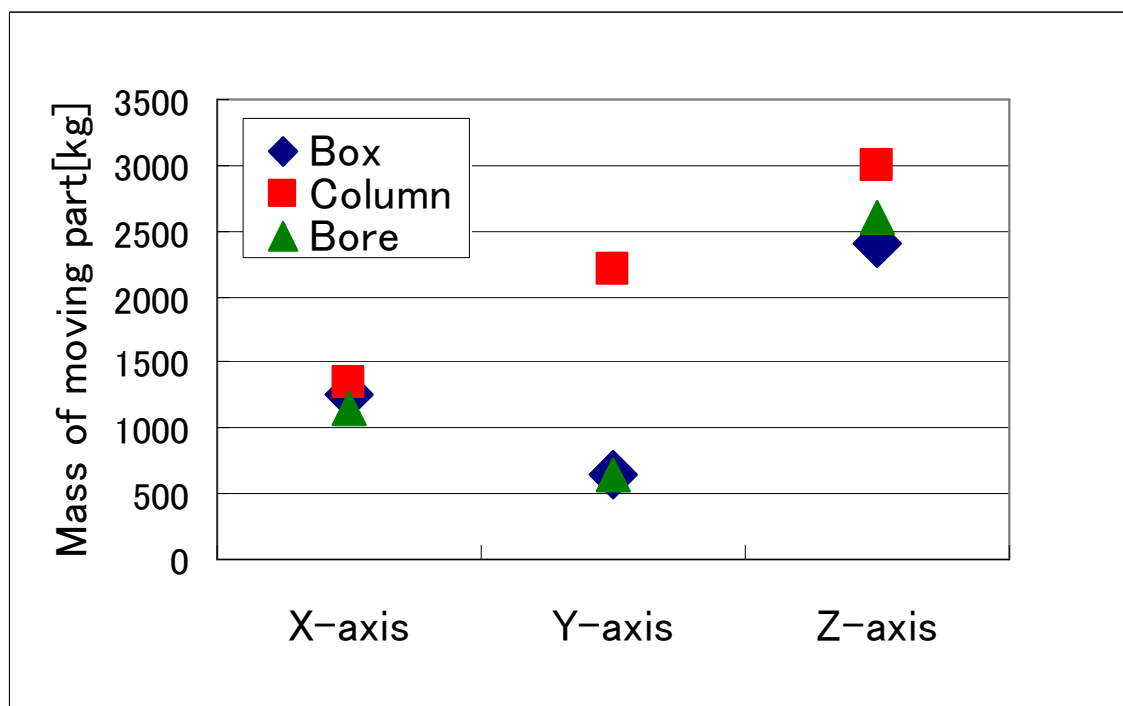


Fig.3.9 Comparison of mass of moving parts

### 3.6 駆動点から重心まで距離の比較

図 3.10 は各々の軸における駆動点から移動物の重心までの距離を表している。

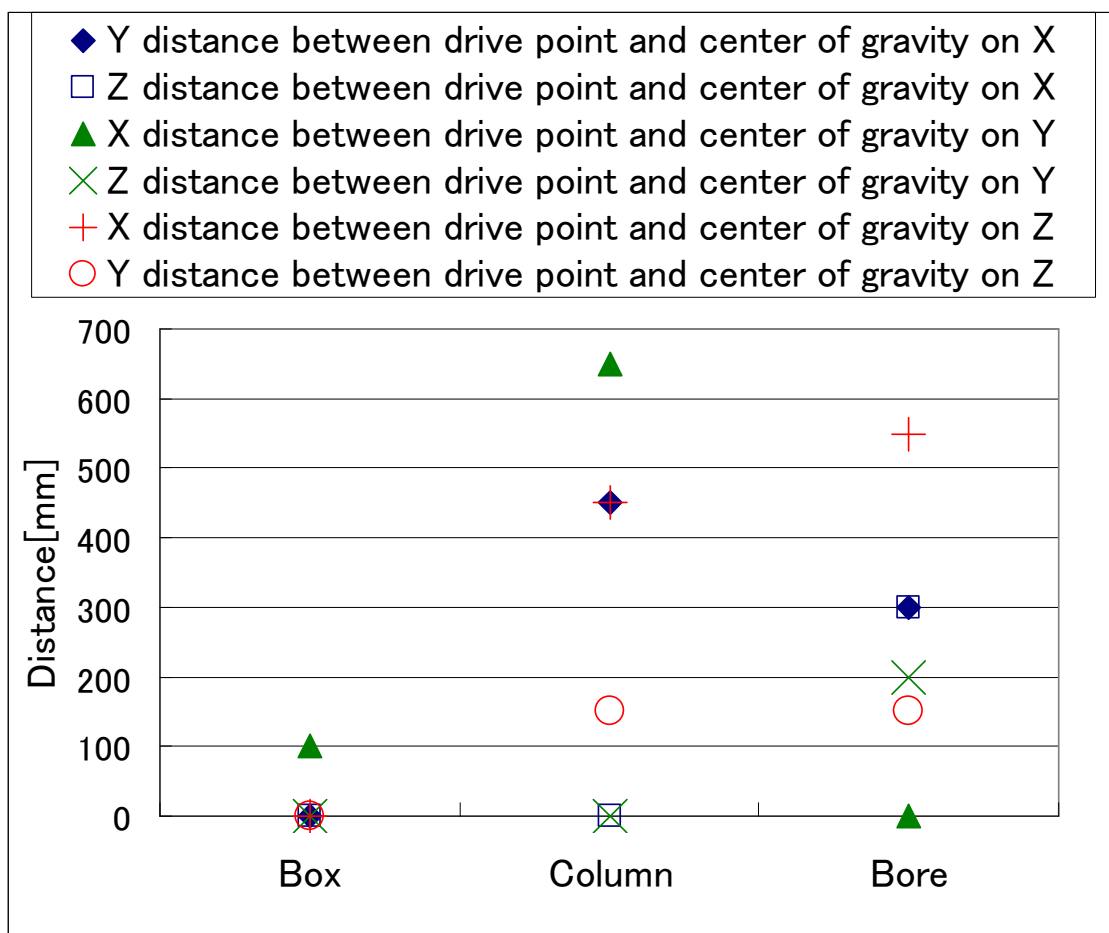
図中の棒グラフ名称は下記の通りである。

Box : Box in box 構造の駆動点か移動物の重心までの距離

Column : コラム Y 軸移動構造の駆動点か移動物の重心までの距離

Bore : 中ぐり盤構造の駆動点か移動物の重心までの距離

例えば X 軸であれば X 軸移動物の重心から駆動点までの Y、Z 軸方向の距離



**Fig.3.10 Comparison of distance between drivenpoint and center of gravity**

を示している。

すなわちその軸を駆動することによってモーメントが生じる距離を表している。上位の移動物の位置によって重心位置が変化する場合はそのストローク中心で求めている。

Box in box 構造は、設計上の制約により唯一、Y 軸方向駆動時に X 軸方向に 100mm の距離を持つモーメントが生じるだけであり、アッペ誤差が小さい、動特性向上に適した構造であることが判る。

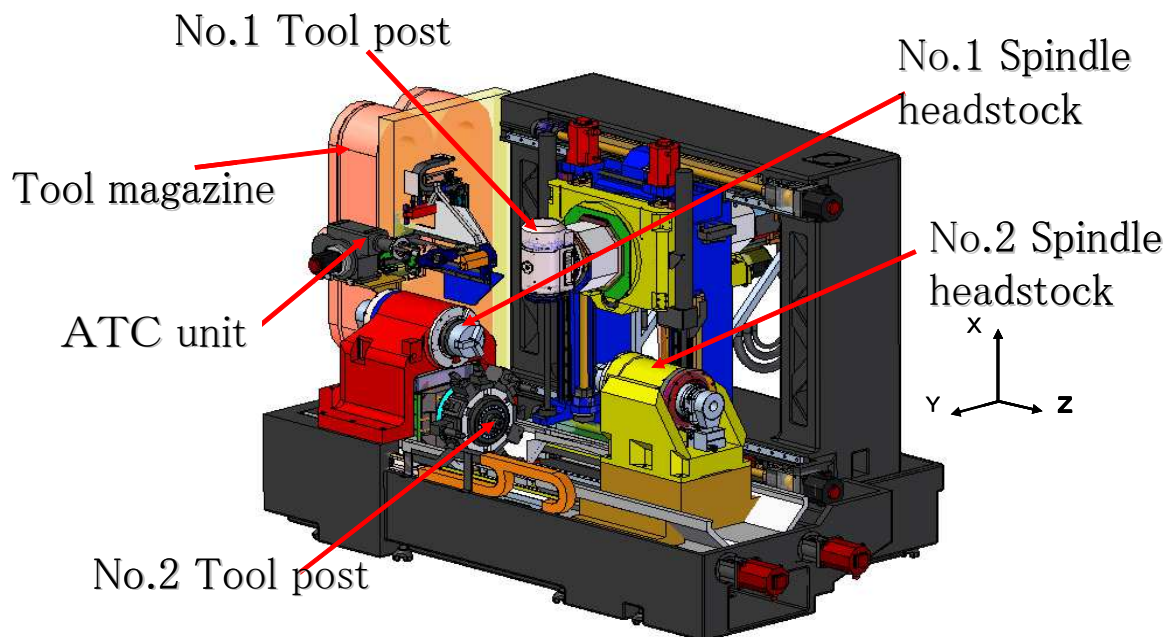
コラム Y 軸移動構造や中ぐり盤構造の場合、駆動点から重心までの距離を小さくするという必要加工範囲を制約することにつながってしまう。しかし、Box in box 構造の場合は加工範囲を拡大・縮小してもこの距離が影響を受けないという優れた性質を持っている。

複合加工機に要求される精度、生産性を満たすためには、より速く、運動精度を高く取れる構造を採用することが最優先される。すなわち、移動物重量を小さくし、モーメントが生じ難い構造を採ることである。その点から図 3.9、図 3.10 が示すように Box in box 構造が素質として優れていると言える。

一方、3.3 章や 3.4 章で述べたように軸移動に伴う剛性値の変化を十分考慮し、共振周波数を高くするためにも十分高い剛性値を持つ Box in box 構造を設計することが必要となる。

Box in box 構造の場合は 3.4 章で述べたようにコラムの剛性を高くとる必要があるが、コラム部は移動部ではなく固定部であるため、十分な剛性を確保する構造を採用しても、その結果として移動物重量が増加して動特性を低下させるというようなことも無く、その点で Box in box 構造は優れた性質を持っていると言える。

### 3.7 Box in box 構造の詳細設計



**Fig.3.11 Compound multiaxis machine tool with box in box structure**

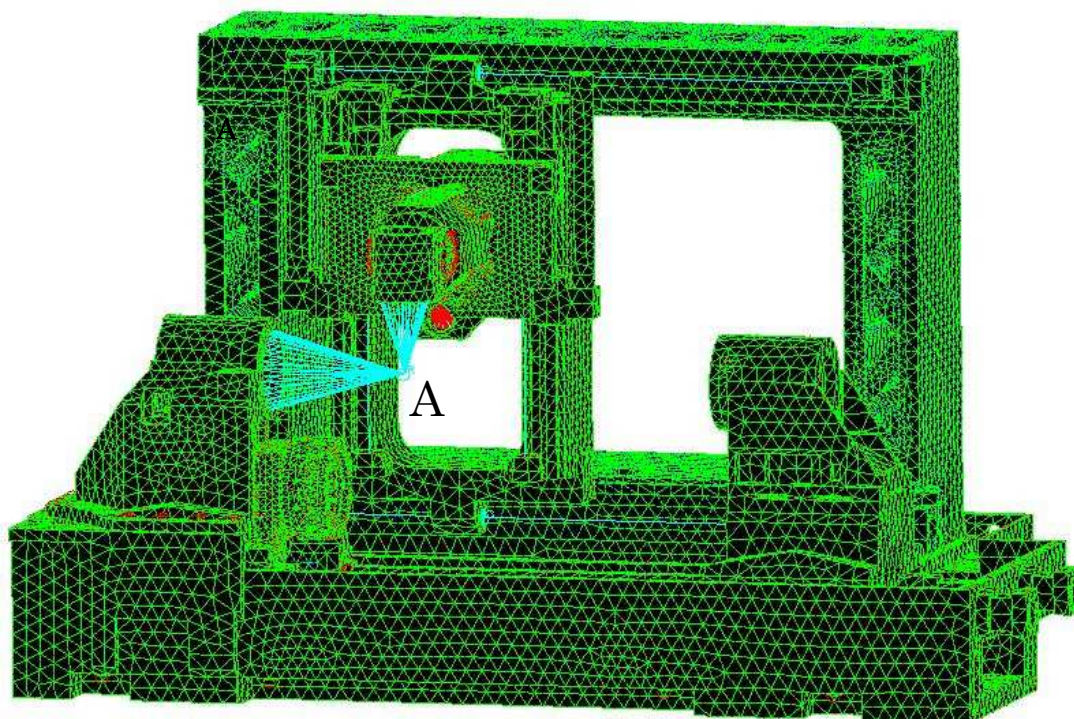
図 3.11 は Box in box 構造を採用した複合加工機の詳細な構造を示す。<sup>88), 89), 90)</sup>加工物を回転させる主軸台を左右に向かい合う形で配置し、その軸心を結ぶ線を境に上下に 2 つの工具台を有する 2 主軸 2 工具台構造である。第 1 工具台は X, Y, Z, B 軸の 4 軸移動が可能な Box in box 構造を採用している。両主軸台は C 軸制御され、工具台の移動軸と合わせて 5 軸の加工が可能となる。更に生産性を高めるために第 2 工具台が X, Z 移動可能に設けられている。

このモデルを用いて詳細に剛性の検討を行う。

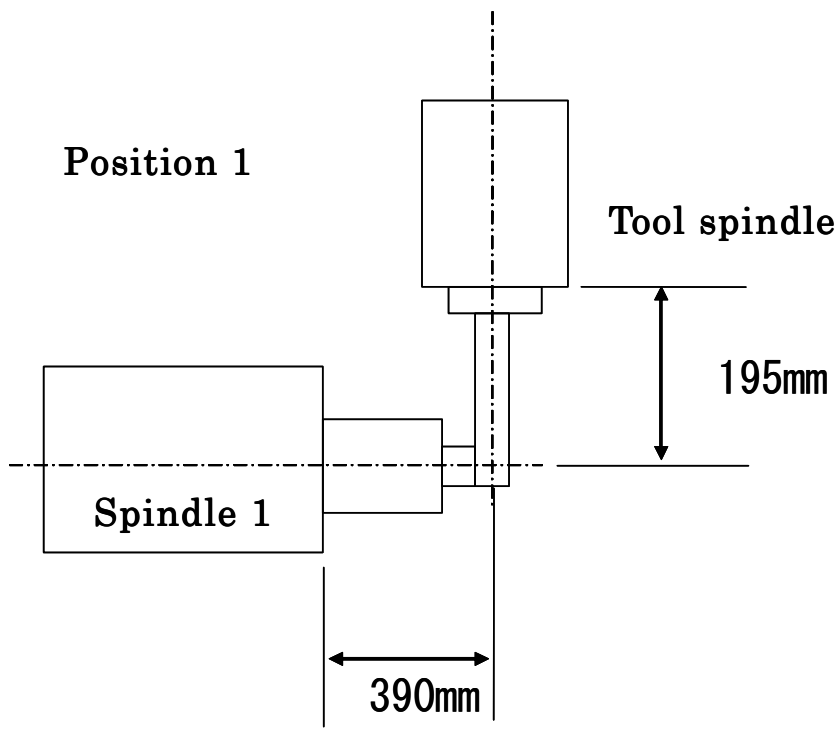
図 3.12 は解析モデルを示す。実際の加工位置における剛性値を評価するために、図中の A 点を図 3.13 に示す位置に変化させて評価する。

図 3.14 は解析結果を示す。設計値は従来機と同等以上の剛性値を確保するために  $30\text{N}/\mu\text{m}$  以上としている。また Box in box 構造の Y 軸構造は、Y 軸の位置によって剛性値が変化するという特性を持つため Y 軸位置を  $-210\text{mm}$ 、 $0\text{mm}$ 、 $+210\text{mm}$  の 3 位置で評価している。

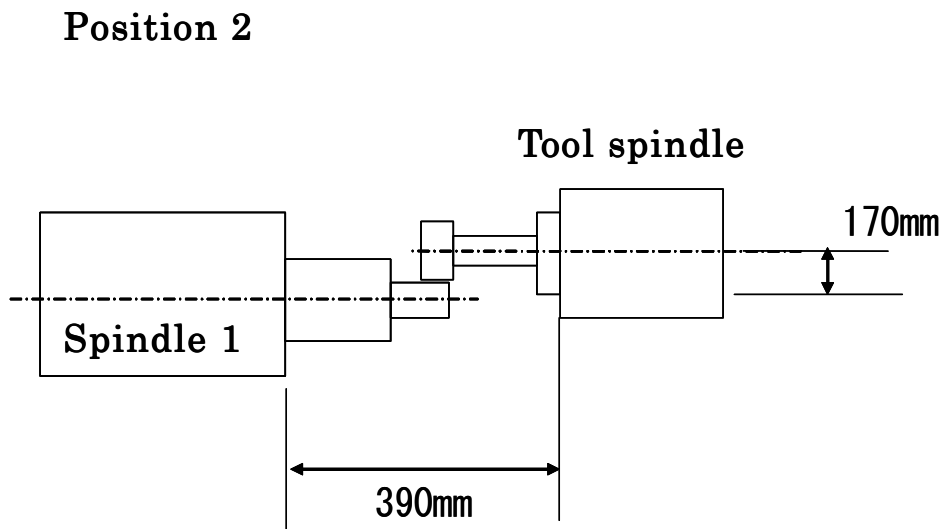
いずれの軸も、またどの姿勢、どの Y 軸位置においても設計値を満足する値となっている。X 軸方向の剛性値は Position1 に比べて Position2 の位置では低下し、Z 軸方向の剛性値はその逆となっている。これはコラムやクロススライドに加わる力の位置が変わることが大きく影響しており、その変化の幅を極力小さく抑えるためにはコラムの剛性を出来る限り高くとることが重要となる。



**Fig.3.12 FEM analysis of compound multiaxis machine tool**

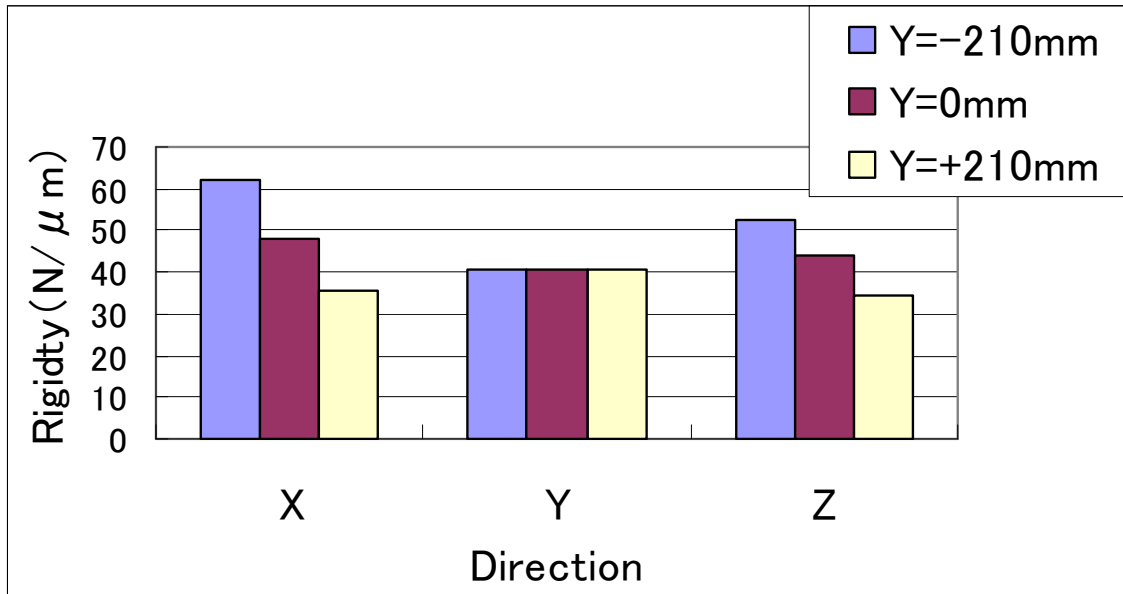


(a) Position 1

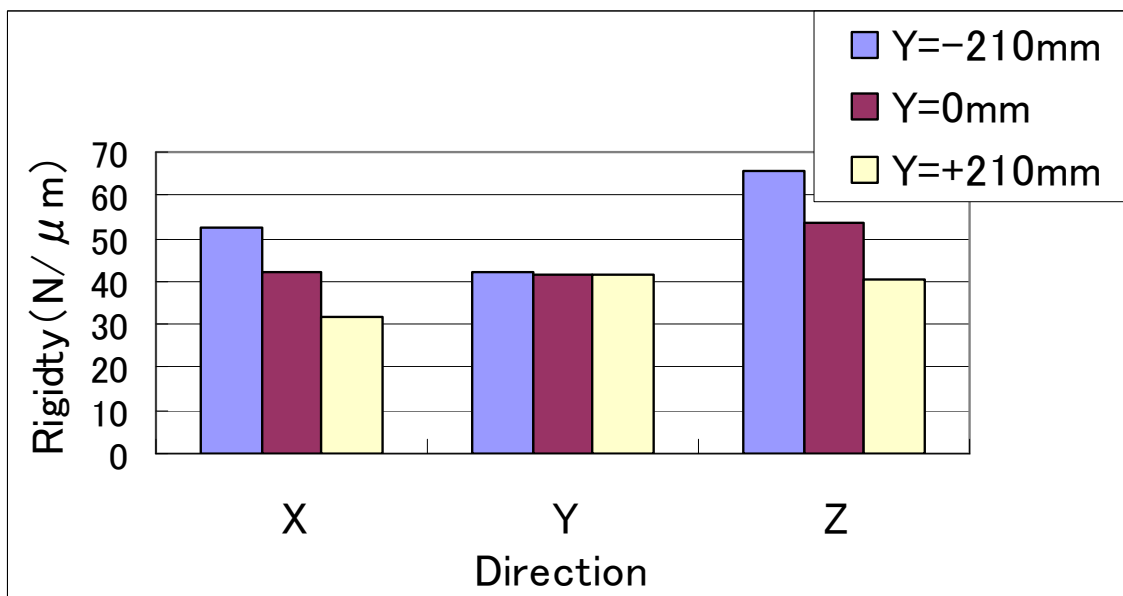


(b) Position 2

Fig.3.13 Point of analysis



(a) Difference of rigidity (Position 1)

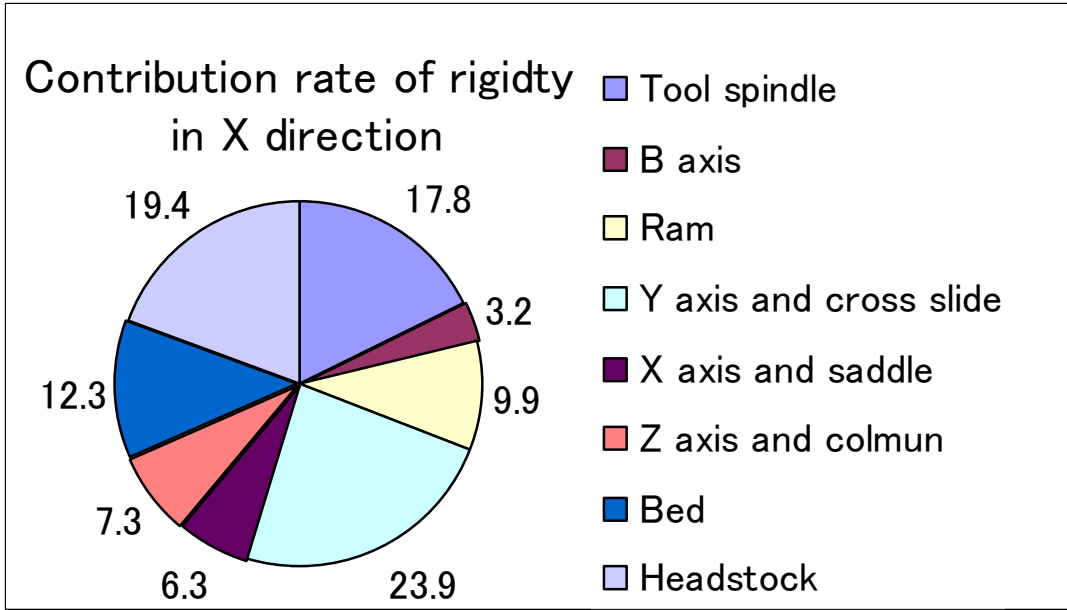


(b) Difference of rigidity (Position 2)

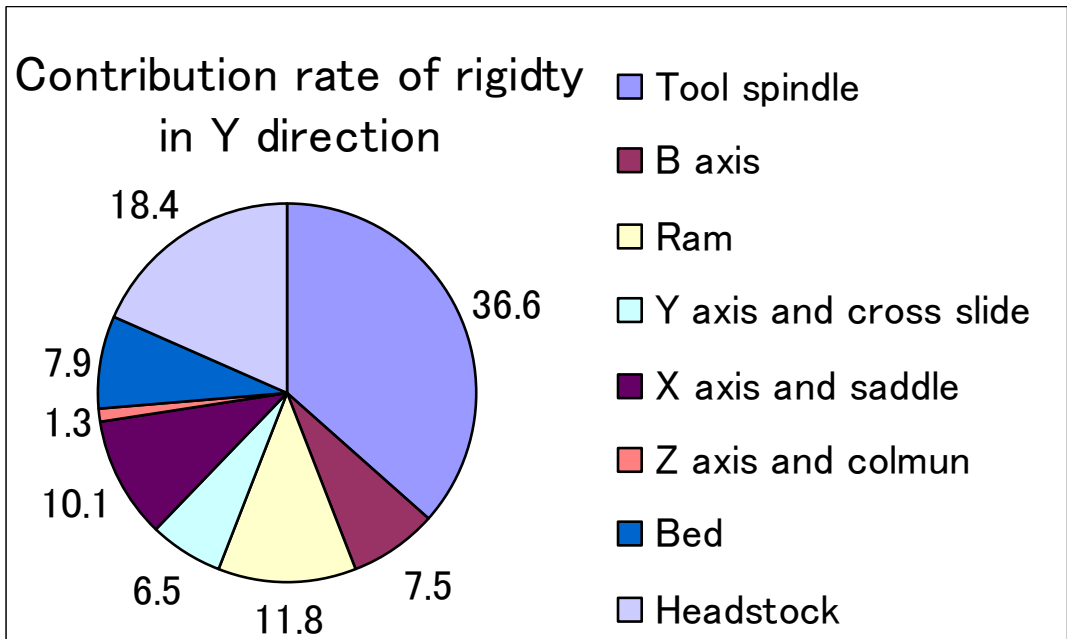
Fig.3.14 Comparison of rigidity

図 3.15 は各構造物の剛性値への寄与率を X 軸方向、Y 軸方向それぞれについて表したものである。コラムおよび Z 軸送り系の剛性値は X 軸方向で 7.3%、Y 軸方向で 1.3%の寄与率となっており、コラムの剛性値の影響は低く抑えることができている。

更に剛性値を高めるためには X 軸方向においては工具主軸、旋削主軸、Y 軸送り系およびクロススライド部の剛性を高めることで効果が高いことがわかる。また Y 軸方向においても工具主軸、旋削主軸の剛性値を高めると効果が高い。



(a) Contribution rate of rigidity on X direction



(b) Contribution rate of rigidity on Y direction

Fig.3.15 Contribution of rigidity

### 3.8 結言

加工物を C 軸移動させ、工具を X, Y, Z, B 軸の 4 軸移動させる構造を持つ複合加工機の 3 軸直交移動構造としては、複合加工機に要求される精度、生産性を実現するために移動物重量が小さくでき、移動物の駆動によってモーメントが生じ難い構造である Box in box 構造が適していることが判った。

しかし、Box in box 構造は特にコラム部が大きな箱構造となり、コラム部の剛性に起因する加工位置での剛性値の低下、共振周波数の低下を招くため、詳細設計において必要な剛性値を十分確保し、また共振周波数を高くとることが重要であることも判った。更にクイル構造の弱点として Y 軸の位置によって加工位置における剛性値が変化することも判った。

これらを踏まえて詳細設計を進めたモデルを用いて検証した結果、Box in box 構造およびクイル構造の弱点を克服し、あらゆる加工位置において 30N/ $\mu$ m 以上の剛性値が確保できる構造が取りうることが判った。

Box in box 構造は古くから精密加工を行う機械では採用されてきた構造であるが、その当時は CNC 装置も普及しておらず、動特性面での優位さよりはむしろアッペ誤差を最小に抑える構造として採用されていた。その後、NC が普及し、より多機能かつ高速で加工が出来る工作機械を開発していく過程で、部品加工精度の向上やリニアガイドの普及などを背景に、より多機能を可能にするという要求を満たすために少しずつ基本原理から離れた構造設計を行ってきたが、複合加工機という新たな次元の性能を要求される機械の登場により、その要求を満たすための機械の基本構造は、原点に戻ったとも言える。

## 第4章

# 複合加工機の開発とその性能評価

### 4.1 緒言

第3章までの研究により複合加工機に求められる精度と生産性を実現するための基本構造として、その構造としては古典的とも言える立形構造をベースとした Box in box 構造が適していること、そして Box in box 構造の動特性に優れた長所を活かしつつ、弱点であるコラム剛性に依存した加工位置での剛性値を十分確保できる構造が設計し得ることが判った。

本章では第3章までの研究によって設計された複合加工機の基本構造を用いて実際に新しい複合加工機の開発を行い、実機を用いてその性能を評価することにより第3章までの設計方法論の妥当性も確認する。

実際には、第2章で述べた現在の複合加工機の課題すなわち、従来の NC 旋盤やマシニングセンタと比較して、

- ・加工精度が同等以上であるか
- ・同等以上の採算性が得られる加工時間（生産性）が達成できているか
- ・電気エネルギー使用量あたりの生産性は同等以上か
- ・フロアスペースあたりの生産性は同等以上か
- ・採算性は改善されたか

を確認する。<sup>91)</sup>

## 4.2 最新の複合加工機

表 4.1、図 4.1、図 4.2 に最新の複合加工機の主な仕様と外観と構造を示す。<sup>92)</sup>

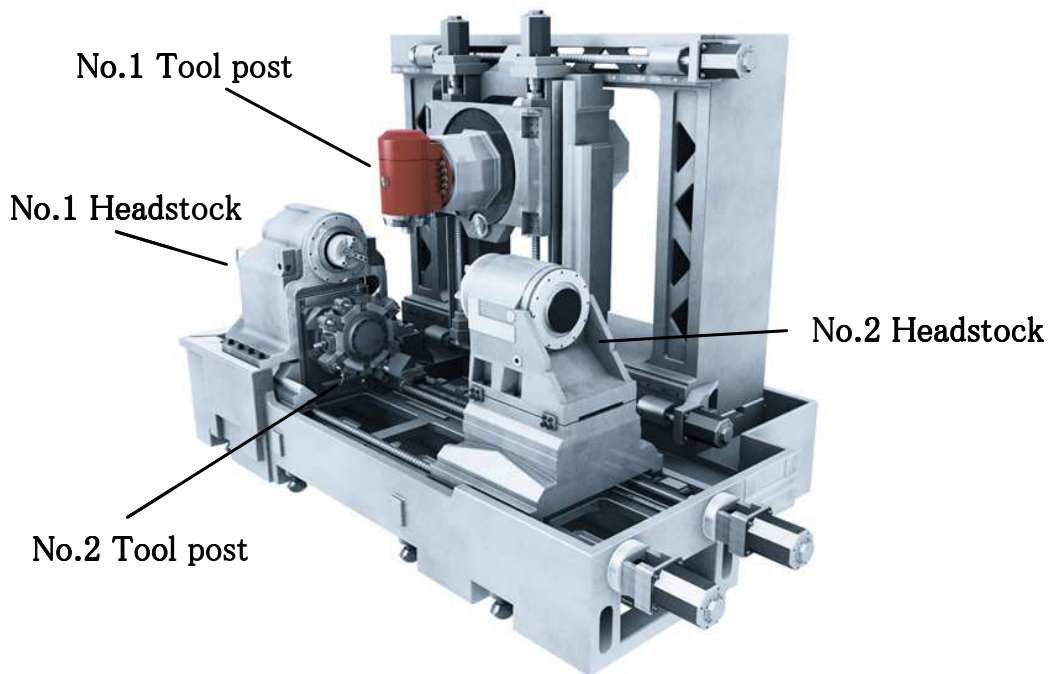
この複合加工機は、加工物を回転させるための主軸台を左右に向かい合う形で配置し、その2つの主軸の回転中心線を境に上下に2つの工具台を配置している。第1工具台はX、Y、Zの直交3軸に加えてB軸旋回が可能な4軸移動構造を採り、最大100本の工具の自動交換が可能となっている。第2工具台はX、Z移動が可能で最大12本の工具の自動交換が可能となっている。第2主軸台は第1主軸台に向かって移動が可能な構造になっており、第1主軸台、第2主軸台の間で加工物の自動受け渡しが可能な構造となっている。また2つの主軸台はC軸制御による回転軸制御が可能になっており、第1工具台の4軸制御と合わせて5軸制御の加工が可能な構造となっている。

**Table4.1 Specification of new compound multiaxis machine tool**

No.1 Headstock power	18.5/15kW
No.1 Headstock speed	4000min <sup>-1</sup>
No.2 Headstock power	18.5/15kW
No.2 Headstock speed	4000min <sup>-1</sup>
No.1 Tool spindle power	18.5/15/11kW
No.1 Tool spindle speed	14000min <sup>-1</sup>
No.1 X axis stroke	750mm
No.1 Y axis stroke	420mm
No.1 Z axis stroke	1500mm
No.1 B axis stroke	±120°
No.1 Tool magazine storage	100
No.2 Tool spindle power	5.5/3.7kW
No.2 Tool spindle speed	6000min <sup>-1</sup>
No.2 X axis stroke	195mm
No.2 Z axis stroke	1500mm
No.2 Tool post tool storage	12



**Fig.4.1 Overview of new compound multiaxis machine tool**



**Fig.4.2 Structure of new compound multiaxis machine tool**

#### 4.2.1 重心駆動

前述のように多くの機能を実現しつつ精度、生産性の要求を満たすために、最新の複合加工機では送り軸の駆動方式として、移動物の重心を駆動し、振動を抑える重心駆動方式を採用している。<sup>93),94)</sup>

この方式は図 4.3 に示すように、例えば従来の駆動方式であれば構造の制約上、移動物の重心から離れた位置を 1 本のボールネジで駆動していたために、移動物を駆動する力の作用により移動物に回転モーメントが生じてしまっていたが、重心駆動方式はこれを抑えるために、ボールネジを 2 本用いて回転モーメントをキャンセルする構造を採り、移動物を高速かつ精度良く駆動する手法である。

図 4.4 はこの方式を採用した場合と、そうでない従来方式について、移動物が Y 軸方向の早送りから位置決め停止する時に X、Y、Z の 3 方向に表れる変位の振幅、減衰時間を比較したものである。Y 軸方向で比較しているのは重力落下方向に位置決め停止することで、駆動系の動剛性差がより顕著に表れるためである。

従来の方式では Y 軸方向のオーバーシュートが  $7\mu\text{m}$  程度発生しており、その振動が収束するのにおよそ 0.2 秒を要している。また、Z 軸方向にも若干の変位が表れている。しかし図 4.4(b) に示す重心駆動方式ではこのようなオーバーシュート現象は抑えられており高い動特性が得られることを示している。

この重心駆動方式の効果により、位置決めに必要な時間や軸移動を伴う A T C 時間が短縮され、非切削時間の短縮効果が得られる。

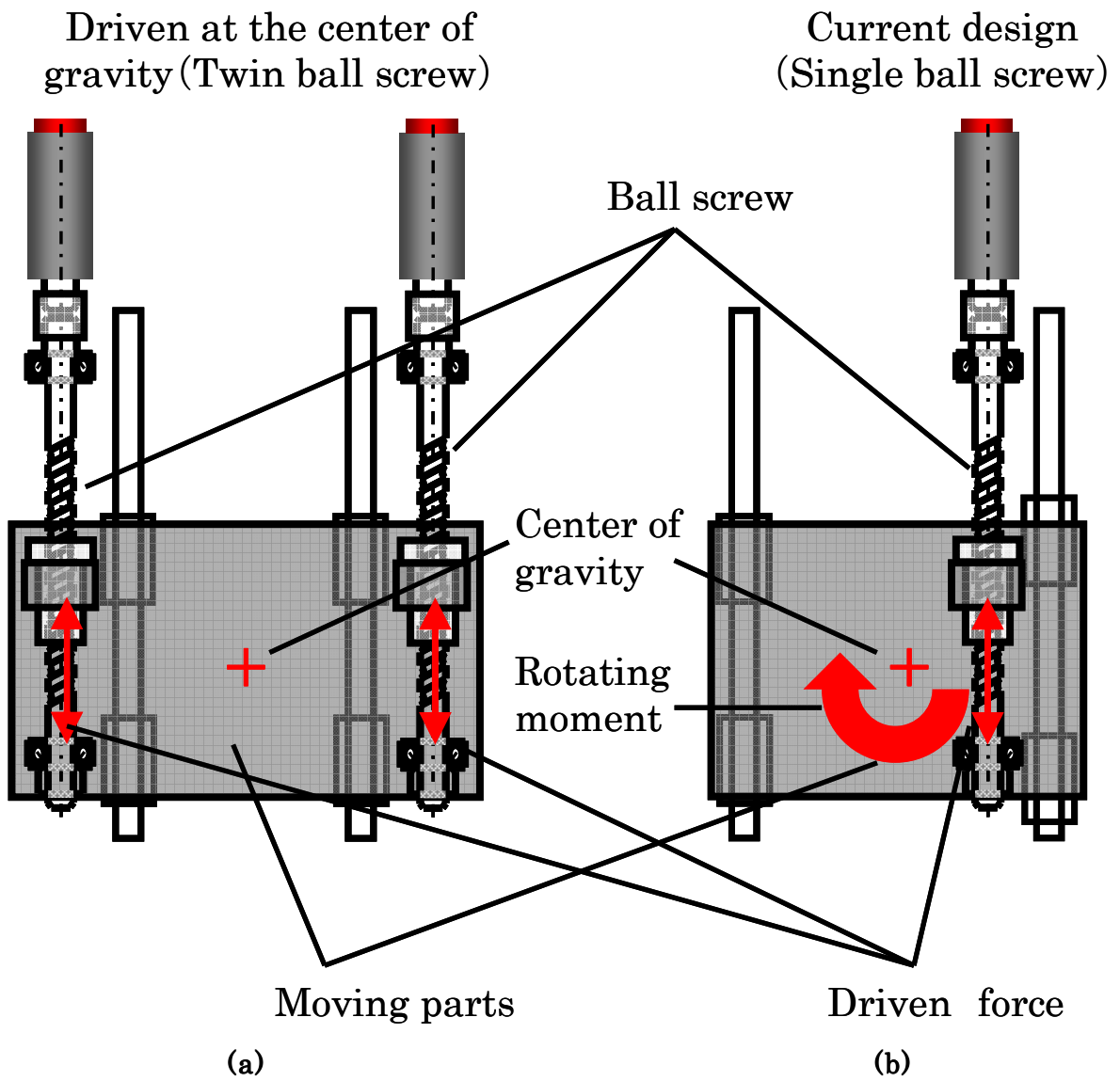
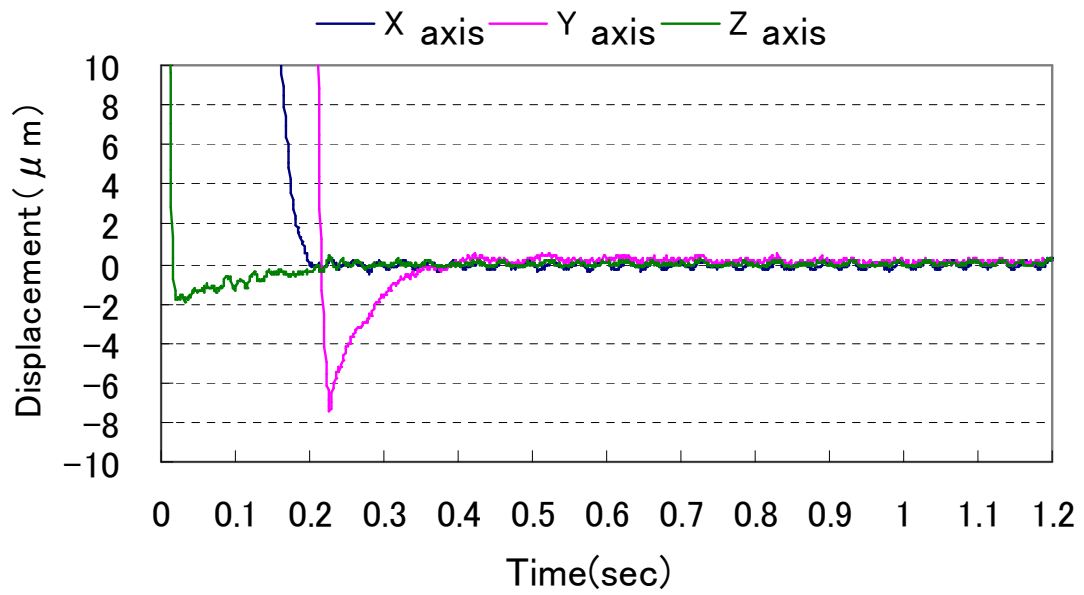
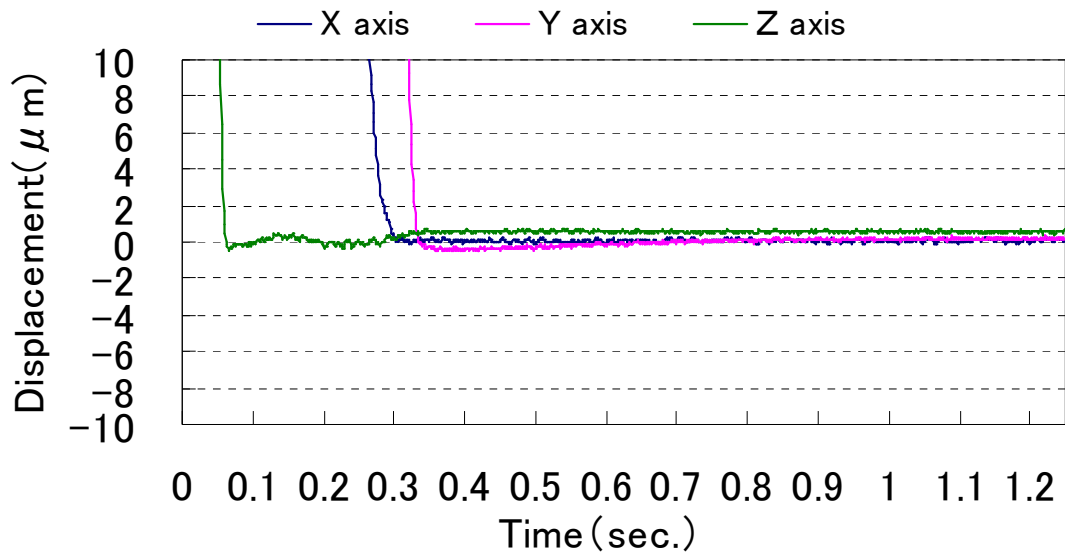


Fig.4.3 Comparison of linear axis motion drive



(a) Single ball screw

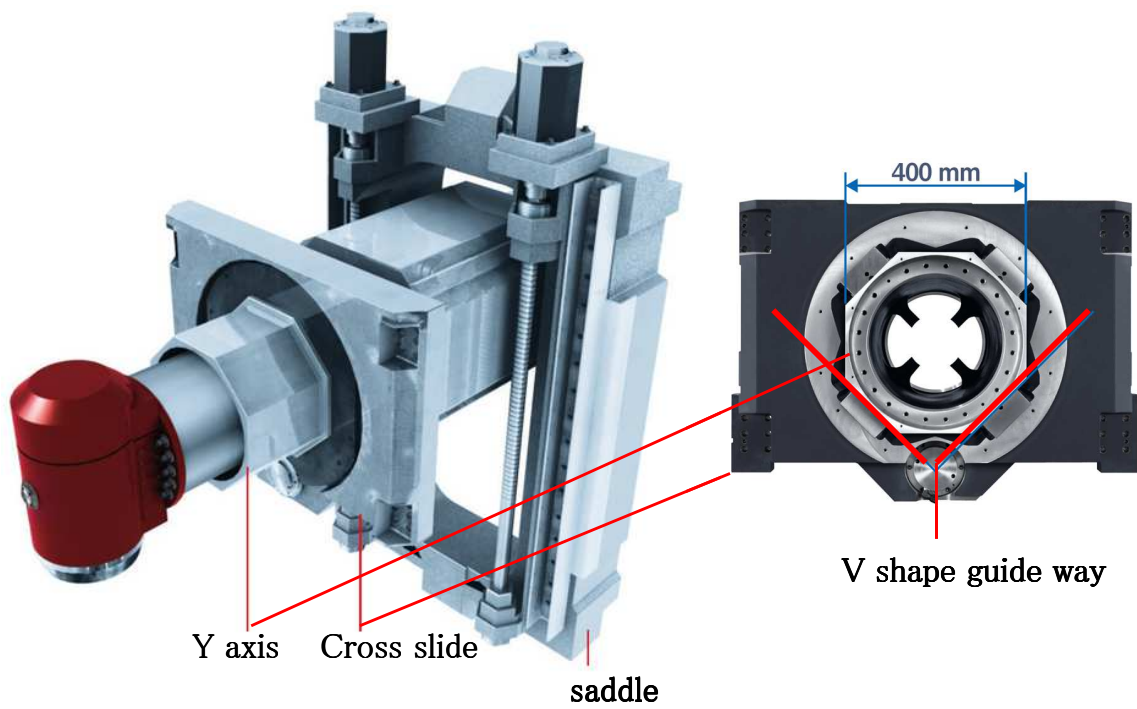


(b) Driven at center of gravity (Twin ball screw)

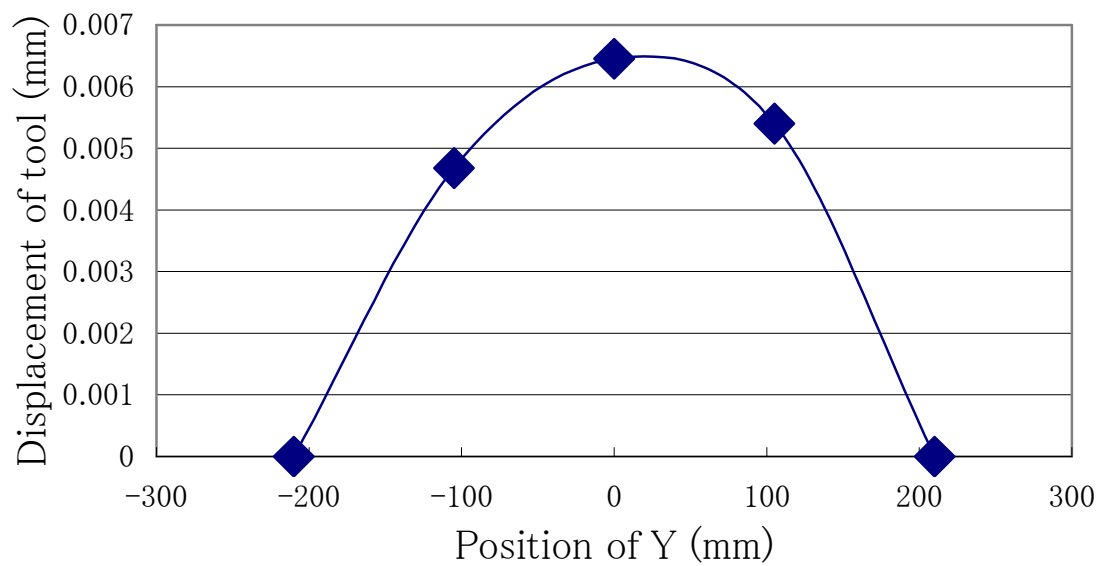
Fig.4.4 Comparison of residual vibration

#### 4.2.2 オクタゴナルラム

また最新の複合加工機には立形の Box in box 構造が採用されているが、この構造はクイル Y 軸（ラム）の移動に伴う姿勢変化、すなわち Y 軸移動の真直度を確保することが精度を確保する上で重要となる。そこで高い真直度と減衰性が得られるオクタゴナルラム構造の滑り案内面を採用している。この構造は Y 軸の移動体の断面形状が 8 角形（オクタゴナル）となる 8 面体構造となっており、そのうちの 4 面の 45 度面を用いて V 字形の 2 面拘束面を上下対向に 2 対構成して案内面とする構造で、V 字形の 2 面拘束面により高い真直性が得られる<sup>95)</sup>。図 4.5 にその構造を、図 4.6 に真直度の結果を示す。真直度は  $6.6 \mu\text{m}/420\text{mm}$  と高い精度を示している。



**Fig.4.5 Y axis structure**



**Fig.4.6 Straightness of Y axis**

#### 4.2.3 ビルトインモータ・ターレット

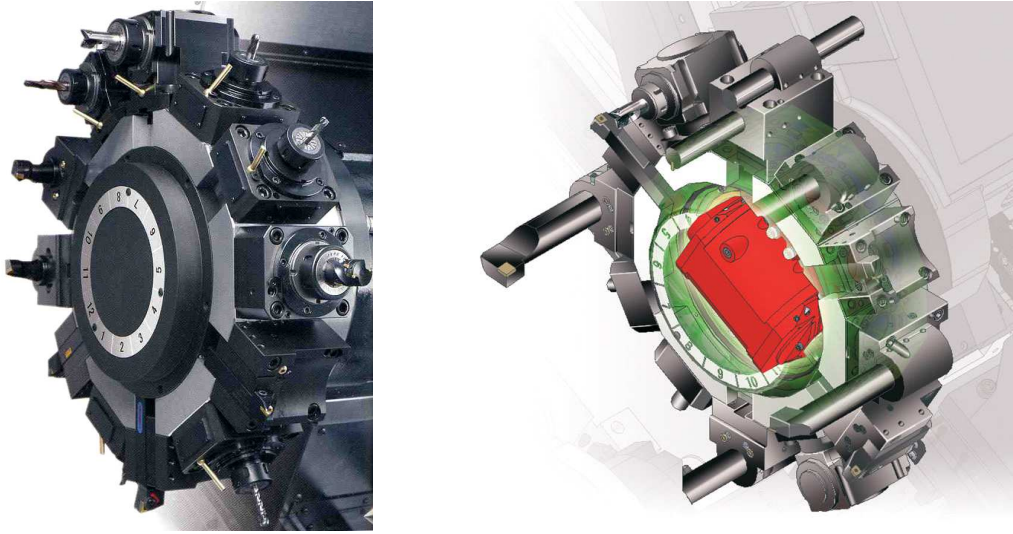
更に最新の複合加工機では、2個目の刃物台（工具台）を構成する下刃物台側の高速化、高精度化を狙ってビルトインモータ・ターレット構造を採用している。

従来の NC 旋盤の刃物台（ターレット）に装備されていたミーリング機能はあくまで補助的なものであり、加工精度、切削能力、加工面品位、耐久性等の点で決して満足できるものではなかった。

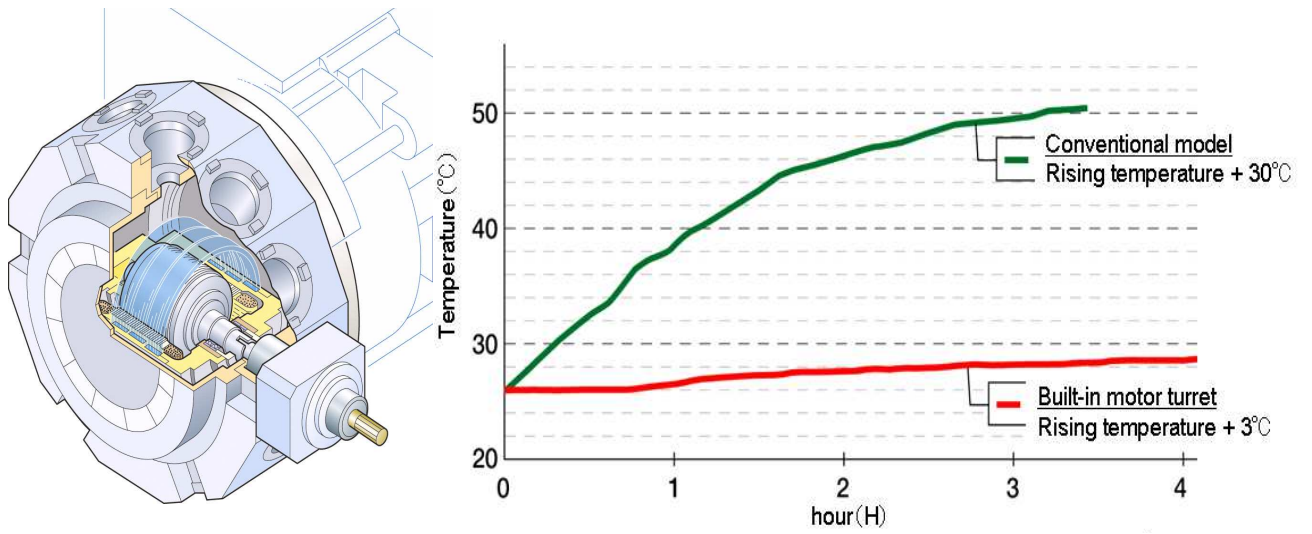
これらの課題を克服するために開発されたのが、ビルトインモータ・ターレットである。従来の刃物台（ターレット）で用いられてきたギヤやベルトを介して駆動力を伝える方法に比べて、伝達効率、熱遮断、剛性の点で優れている。

ビルトインモータ構造の採用により、ギヤ・ベルト・駆動軸・軸受けなどの駆動部品が不要となり、ミーリング切削能力の向上、加工面品位の向上を実現した。またモータを含めたハウジングの外部にオイルジャケットを装備し、ほぼ完全に熱遮断することが可能になった。図 4.7 にビルトインモータ・ターレットの外観図および内部構造図を、図 4.8 にオイルジャケットのイメージ図および温度上昇テストの結果を示す。

さらに、ターレットホルダの拘束面（取付面）の幅を従来の約 2 倍に広くすると共に、工具刃先とホルダ締結部の距離を短くすることで、剛性値を約 2.8 倍の  $41.5\text{N}/\mu\text{m}$  と飛躍的に向上させた。



**Fig.4.7 Built-in motor turret**



**Fig.4.8 Oil jacket and results of temperature under continuous operation**

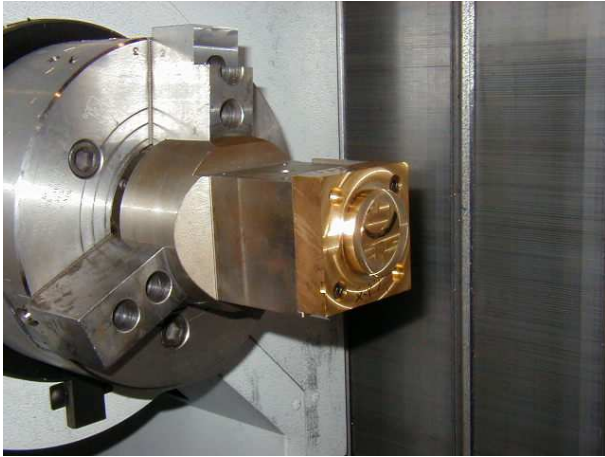
### 4.3 加工精度の検証

最新の複合加工機は重心駆動、オクタゴナルラム、ビルトインモータ・ターレットなどの採用により基本の特性については高い効果が得られていることが確認されたので、続いて様々な平面における真円切削を行うことで加工精度の評価を行う<sup>96),97)</sup>。評価は図 4.9 のように主軸台に装着したテストピースの外周をエンドミルで真円に切削を行い、その真円度を測定する方法で行う。切削条件は以下の通りである。

工具	: $\phi 16\text{mm}4$ 枚刃超硬エンドミル
被削材	: 真鍮
加工径	: $\phi 57\text{mm}$
工具回転速度	: $8000\text{min}^{-1}$
送り速度	: $2000\text{mm}/\text{min}$
切込み	: $0.05\text{mm}$

測定結果を図 4.10 に示す。XY 平面で  $2.16\mu\text{m}$ 、YZ 平面で  $2.30\mu\text{m}$ 、YZ 平面を Z 方向に  $45$  度傾斜させた XYZ 平面において  $2.34\mu\text{m}$  と高精度マシニングセンタの水準と同等の高い真円精度を示した。特に傾斜面の真円加工においては X、Y、Z 各軸の高い精度と軸間の剛性バランスを必要とするが好結果を得ている。

図 4.11 は従来の複合加工機<sup>98)</sup>における同様の真円切削結果である。送り速度は最新の複合加工機の半分、 $1000\text{mm}/\text{min}$  の条件で XY 平面における真円度が  $8.27\mu\text{m}$ 、同じく YZ 平面で  $12.89\mu\text{m}$  となっている。切削条件を上げても最新の複合加工機は 4~5 倍高い精度を示している。現在のマシニングセンタでは  $5\mu\text{m}$  以下程度の真円切削結果が得られているが、従来の複合加工機では  $1000\text{m}/\text{min}$  まで送り速度を落としてもマシニングセンタの半分程度の精度しか得られていなかった。最新の複合加工機ではマシニングセンタと同等以上になっており、基本構造として移動物の重量を極力小さく抑え、必要な剛性を確保し、動特性を最重視した Box in box 構造、重心駆動方式、オクタゴナルラム構造を採用した効果が確認された。



**(a) XY -plane**



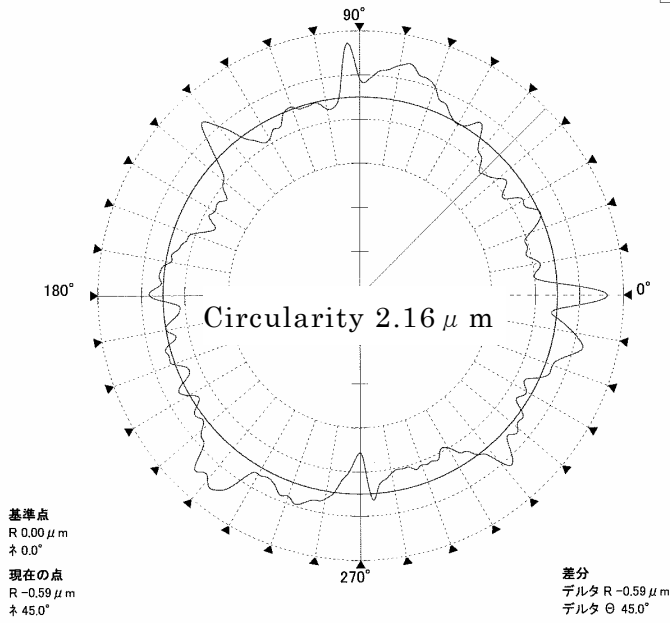
**(b) YZ-plane**



**(c) 45degree inclined plane**

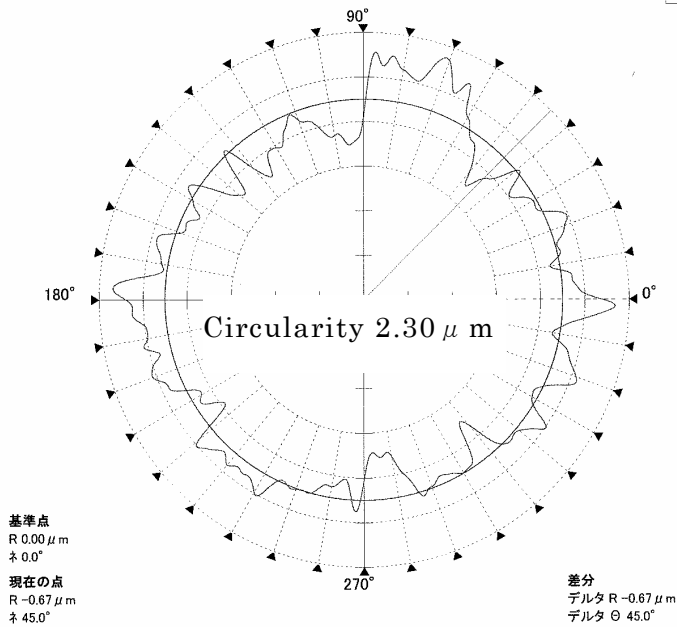
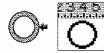
**Fig.4.9 Cutting test setup for circularity verification**

スケール 1  $\mu\text{m}$ /目盛

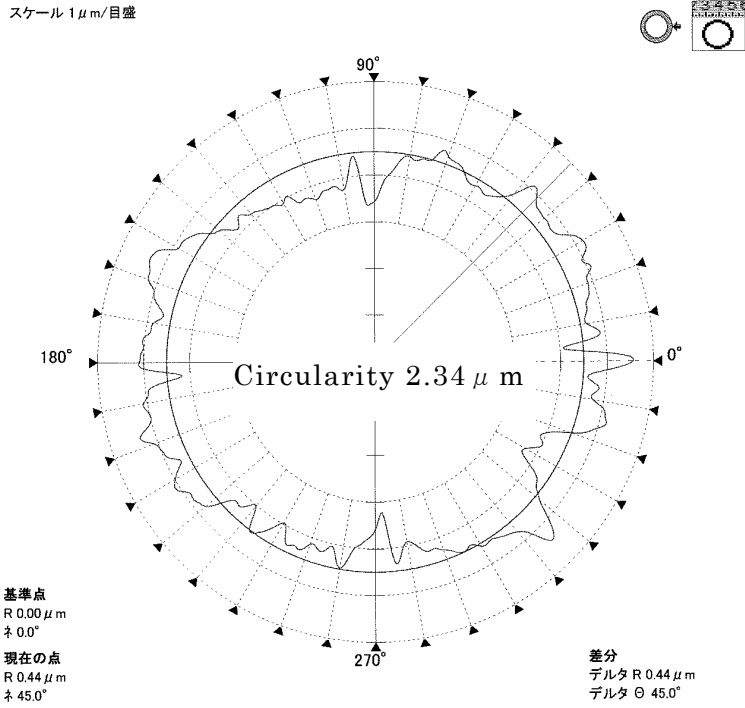


(a) XY-plane

スケール 1  $\mu\text{m}$ /目盛



(b) YZ-plane



(c) Z-45degree inclined plane

Fig.4.10 Circularity result for new compound multiaxis machine tool

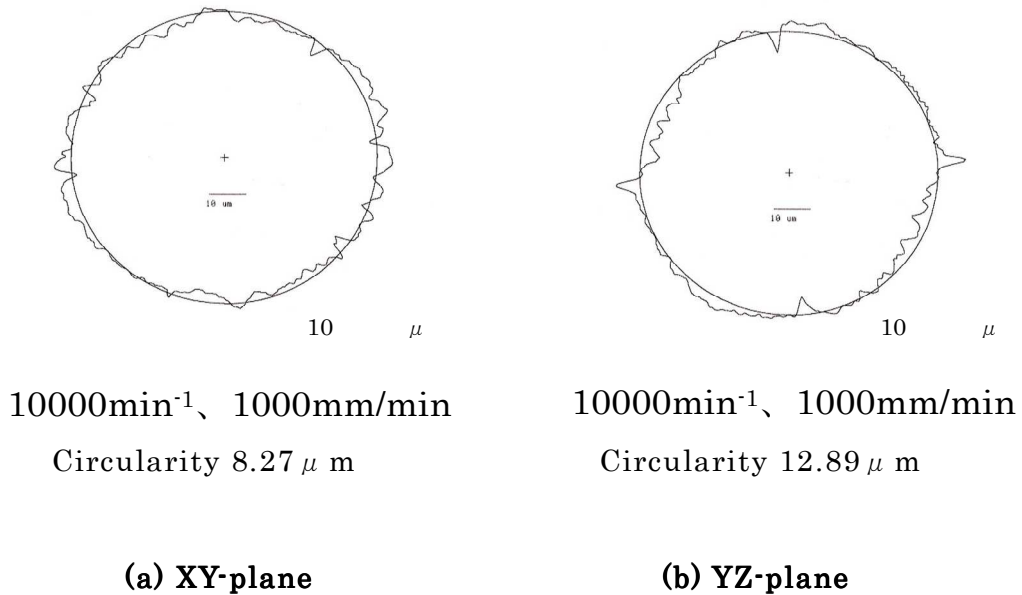


Fig.4.11 Circularity result for conventional multiaxis machine tool

## 4.4 生産性の検証

第2章で述べたように、新しい複合加工機の仕様は従来の加工機で加工されている様々な加工物の内容を調査して代表的な加工物を定義し、定義された加工物を要求される加工時間で加工できるように仕様を決めた。しかし、複合加工機は様々な加工物を加工する機械であり、全ての加工物について加工時間（生産性）を検証することは困難である。そこで、ここでは実際に現在の複合加工機で加工されている加工物事例を取り上げて、最新の複合加工機でもその加工を行い、その時間短縮率を調べることによって新しい複合加工機が要求される生産性を満たしているかを検証してみる。

またその際、従来の複合加工機も最新の複合加工機も全く同じ加工プログラムを用いて加工を行う。つまり、加工時間短縮に繋がる下記の4項目のうち、機械の剛性と運動精度を高くしたことにより得られる切削条件が上げられるという効果は用いずに非切削時間の短縮だけによる効果を調べてみる。

- A 早送り速度の増加
- B 工具交換時間の短縮
- C 切込み量の増加
- D 切削速度の増加

これは、実際の加工現場において切削条件を上げるためには、機械の剛性だけではなく、工具、刃具の選定や加工物の保持具などにも左右されるため全ての加工物に一律に効果が期待できるとは言い切れない側面があることと、余力を持った評価により検証の確かさを高めるためである。

表4.2に従来の複合加工機と新しい複合加工機の非切削時間の違いの要因となる仕様の比較を示す。第1工具台を移動させるX、Y、Z、B軸、第2工具台を移動させるX、Z軸、加工物を割り出すC軸はいずれも速くなり、ATC時間も短くなっている。

図4.12は現在の複合加工機で加工されている加工物の一例である。被削材は外径φ60mmの真鍮棒材で、2工程に分けて加工を行う。従来の複合加工機<sup>98)</sup>も図4.2の様に4主軸、9送り軸を有する全く同じ構造を持っており、

左側の第 1 主軸台で第 1 工程の加工を行い、自動受け渡し後、右側の第 2 主軸台で第 2 工程の加工を行う。刃具は第 1 工具台を主として用い、可能な限り第 2 工具台も用いて同時に加工を行う 2 主軸 2 刃物加工（4 軸加工）とする。内外径および端面の旋削、ドリル加工、ミーリング（エンドミル）加工、傾斜面加工が存在する、複合加工機で多く行われている加工事例である。

**Table4.2 Comparison of idle time**

		existing model	new model
Rapid feed speed	No.1Tool post X	24m/min	50m/min
	No.1Tool post Y	16m/min	30m/min
	No.1Tool post Z	24m/min	50m/min
	No.1Tool post B	27min <sup>-1</sup>	100min <sup>-1</sup>
	No.2Tool post X	20m/min	30m/min
	No.2Tool post Z	24m/min	30m/min
	No.1Headstock C	200min <sup>-1</sup>	250min <sup>-1</sup>
	No.2Headstock C	200min <sup>-1</sup>	250min <sup>-1</sup>
Tool change time	Chip to Chip	6.3sec	4.2sec
	Tool to Tool	1.6sec	1.0sec



**Fig.4.12 Workpiece for test**

最新の複合加工機による加工時間は 337.6 秒、従来の複合加工機による加工時間は 460 秒となり、この事例の場合生産性は 1.36 倍に上がることが確認された。

表 4.3 に最新の複合加工機による加工時間の詳細を示す。第 1 主軸台側のシーケンス No、N10 から N17 までと、第 2 主軸台側のシーケンス No、N1 から N9 までは同時に加工が行われるため加工時間が長い第 2 主軸台側の時間を積算している。同様に N19 から N22 と N10 から N11 も同時加工が行われるので加工時間が長い第 1 主軸台側を積算している。

表 4.4 は別の加工事例である。被削材は A5056 アルミを用いている。この事例でも C 切込み量、D 切削速度の切削条件は一切変更していない。この事例ではおよそ 1.22 倍の生産性向上が確認された。表中に示される通り、非切削時間の短縮によりいずれの工程でも時間短縮が図れている。

ある部品を加工する際の稼働条件（稼働時間、稼働率）と稼働に要する単位費用（固定費、変動費）が同じであれば、もともと加工している機械での加工賃と加工時間、その機械の価格、そして新たに導入する機械の価格によってその加工物を新たに導入する機械で加工するときの要求加工時間が算出されるという原則に照らし合わせると、新しい複合加工機は 2 軸旋盤比で 1.5 倍、複合旋盤比で 1.3 倍、4 軸旋盤比で 1.15 倍速く加工できる必要があると第 2 章で述べた。またこれらの機械で加工されている代表的な加工物を現在の複合加工機で加工した場合と新しい複合加工機で加工した場合の比較に置き換えると、加工時間は表 4.5 に示される通り 1.23 倍～1.29 倍速く加工することが必要となる。

最新の複合加工機は第 4.3 章で確認したように高い加工精度が得られる機械剛性が得られていることや、表 4.6 に示されるように第 2 主軸台の出力、第 1 工具台の回転速度、第 2 工具台の出力、第 2 工具台の回転速度が向上していることを活用して C 切込み量、D 切削速度の増加を図ることが加工物によっては可能となることを考慮して、表 4.3 および表 4.4 に示した 2 つ加工事例の結果で確認された 1.22 倍および 1.36 倍の加工時間短縮結果は新しい複合加工機に求められる要求を満たす生産性が確保できていると言える。

**Table4.3 Cycle time of new compound multiaxis machine tool**

No.1 Headstock operation

No	operation	time(sec)	total time(sec)
N10	Form Drill for M48 Tap	26.8	
N11	Threadmill M48 P1.5	23.4	
N12	Form Drill for M5 Tap	14.1	
N13	Form Drill for M5 Tap	15.3	
N14	M5 Tap	13.2	
N15	M5 Tap	10.0	
N16	φ8 Drill	20.8	Σ (N10:N17)=
N17	φ8 Drill	14.3	138.0
N18	φ6 Deep Drill	35.6	<b>35.6</b> ②
N19	Threadmill M30	16.8	
N20	Form Drill T162	20.6	
N21	M10 Tap	13.9	Σ (N19:N22)=
N22	Drill	29.0	<b>80.3</b> ③
N23	Plunging	17.3	<b>17.3</b> ④
N31	Transfer	42.6	<b>42.6</b> ⑤

No.2 Headstock operation

No	operation	time(sec)	total time(sec)
N1	O.D. Turnning	14.0	
N2	Form Drill T565	28.3	
N3	Form Drill T558	10.5	
N4	M8 Tap	9.6	
N5	Groove	23.0	
N6	Form Drill T475	19.9	
N7	M10 Tap	23.6	
N8	Form Drill T568	19.4	Σ (N1:N9)=
N9	Form Drill T475	13.4	<b>161.8</b> ①
N40	Form Drill T566	47.3	Σ (N40:N41)=
N41	Inside Groove	20.5	67.8

**Total cycle time (sec) ①+②+③+④+⑤= 337.6**

Cycle time of new compound multiaxis machine tool : 337.6sec

Cycle time of conventional model : 460sec

Ratio of productivity increase =  $460 / 337.6 = 1.36$ times

**Table4.4 Cycle time comparison between conventional model  
and new compound multiaxis machine tool**

Operation	①Time on using convenntional model(sec)	②Time on using new compound multiaxis machine tool(sec)	Comparison ②-① (sec)
No.2Tool post ZR	19.2	10.9	-8.3
Face turning	6	5.4	-0.6
O.D. turning	29.5	26.6	-2.9
I.D. drill	96.9	94.2	-2.7
I.D. turning	133.3	111.1	-22.2
Tailstock out	16.2	10.3	-5.9
O.D. turning	34.2	31.9	-2.3
φ2.2 drill	25.7	18.2	-7.5
M3 centering	5.6	5	-0.6
M2 centering	6.8	6	-0.8
5.1 drill	26.3	17	-9.3
φ2.2 drill	28.6	19.8	-8.8
M3 drill	29.6	19.7	-9.9
M2 drill	27.5	17.4	-10.1
φ3.5 endmill	27.7	18.6	-9.1
M3 tapping	31.9	20.9	-11
M2 tapping	27	17.9	-9.1
Tailstock in	18.1	10.8	-7.3
Face finishing	124	121.5	-2.5
Tailstock in	15	6.4	-8.6
5.1 endmill rough	26.1	23.5	-2.6
5.1 endmill finish	27.2	27.1	-0.1
5.1 endmill chamfer	38	33.2	-4.8
Tailstock in	19	10.4	-8.6
Cutting	32.5	31.8	-0.7
No.2Tool post ZR	3.2	2.6	-0.6
Total	875.1	718.2	-156.9

**Table4.5 Turgel times of cycle time reduce**

Comparison pattern of machining	Target times of cycletime reduce
In case of sample workpiece for 2-axis lathe machining by current multi axis machine	1.28
In case of sample workpiece for multi-axis turning machine machining by current multi axis machine	1.23
In case of sample workpiece for 4-axis lathe machining by current multi axis machine	1.29

**Table4.6 Comparison of power and speed of spindles**

	Current model	New multi axis machine
No.1 Headstock power	18.5/15kW	18.5/15kW
No.1 Headstock speed	4000min <sup>-1</sup>	4000min <sup>-1</sup>
No.2 Headstock power	15/11kW	18.5/15kW
No.2 Headstock speed	4000min <sup>-1</sup>	4000min <sup>-1</sup>
No.1 Tool spindle power	18.5/15/11kW	18.5/15/11kW
No.1 Tool spindle speed	12000min <sup>-1</sup>	14000min <sup>-1</sup>
No.2 Tool spindle power	5.0kW	5.5/3.7kW
No.2 Tool spindle speed	4000min <sup>-1</sup>	6000min <sup>-1</sup>



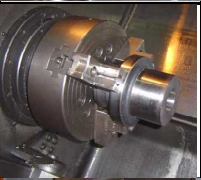



## 4.5 電気エネルギー使用量と生産性

最新の複合加工機を用いることによって加工時間は短縮され、生産性が向上することが確認されたが、加工時間を短縮するためには前述のように、A 早送り速度の増加、B 工具交換時間の短縮、C 切込み量の増加、D 切削速度の増加の4つの要因が寄与するという観点から、早送り速度を増加させるために大きな出力のモータを用いたり、切込み量を増加させるために同様に大きな出力のモータを用いたりすれば、おのずと電気エネルギーの消費量が増え、結局、電気エネルギー使用量当たり生産性は向上出来ないのではないかと考えられる。また最新の複合加工機では重心駆動方式を採用するために2組のボールねじとサーボモータを用いて移動物を駆動する方式を採用しており、この点でも最新の複合加工機は電気エネルギーの使用量が多くなっていると考えられる。

しかし、機械の剛性を高めれば精度の向上、加工時間の短縮のみならずモータの利用効率も高めることができると考えられる。つまりモータの駆動力を効率良く刃先の推力、加工物の推力として伝え、発熱としての消耗を抑え、結果として熱変位も少なくエネルギー利用効率も高い機械になると考えられる。そこで最新の複合加工機を用いた場合の電気エネルギー利用効率について評価してみる。

図 4.13 に評価結果を示す。対象加工物は旋削加工とミーリング加工を有するフランジ形状の加工物で、従来の加工方法では2軸のNC旋盤で表裏の2工程を加工後、マシニングセンタで両端面からのミーリング加工、外周からのミーリング加工の計3工程、合計5工程を経て11953秒、13021Whの電力使用量で加工されていた。この加工物を最新の複合加工機で加工すると加工時間が7479秒となり37%削減され、電力使用量が10315Whとなり21%削減されることが確認された。

従来の工程を分割した加工方法に比べて、最新の複合加工機を用いた場合は加工時間は短くなり、電気使用量あたりの生産性も大幅に改善されていることが確認された。

	Operation	Chuckimg		Operation	Chuckimg
2-axis lathe	OP1		Compound multiaxis machine tool	OP1	
	OP2			OP2	
Machining center	OP1,2				
	OP3				

	Lathe & Machining center	New compound multiaxis machine tool
Total cycle time [sec]	11953	7479
Ratio of reduction time(%)	100	63
Spending electric power [Wh]	13021	10315
Ratio of reduction power(%)	100	79

**Fig.4.13 Comparison of power consumption between current machine and new compound multiaxis machine tools**

## 4.6 フロアスペースあたりの生産性

最新の複合加工機は従来の NC 旋盤、マシニングセンタと同等以上の加工能力を持ち、かつそれらの機能を 1 台の機械にコンパクトに集約している。従って、同じ加工物を加工するに当たって必要とされるフロアスペースも必然的に小さくすることができると考えられる。フロアスペースあたりの生産性について、最新の複合加工機を用いた場合と、従来の加工機を用いた場合を比較検証してみる。

従来の加工機を用いた場合の対象加工物の加工工程を図 4.14 に示す。対象加工物は NC 旋盤の構成部品である工具台（ターレット）である。素材はリング状の鍛造品を用い、第 1 工程では NC 旋盤を用いて片面の旋削加工を行う。第 2 工程でもう一方の面の旋削加工を行い、第 3 工程ではマシニングセンタで片面のミーリング加工を行ない、第 4 工程で加工物を把握するための治具を取り付け、第 4 工程では外周方向からのミーリング加工を行う。更に加工物の姿勢を変えて、第 5 工程で残っている片面のミーリング加工を行ない切削加工の全工程が完了する。2 台の NC 旋盤、3 台のマシニングセンタを経て 5 台 5 工程で加工されている加工物である。合計の加工時間は 240 分となっている。

図 4.15 にこの加工物を複合加工機で加工した場合の加工工程を示す。従来の加工機の場合と同様に鍛造されたリング状の素材を用いて、第 1 工程では片面の旋削加工、ミーリング加工を行う。第 2 工程ではもう一方の面の旋削加工、ミーリング加工、そして複合加工機では回転工具主軸を割り出して 5 軸加工機に相当する加工が可能なことを利用して、この工程で外周からのミーリング加工も可能となり、1 台の複合加工機を用いて 2 工程で加工が完了する。合計の加工時間は 230 分となっている。

尚、従来の加工機を用いた場合も、最新の複合加工機を用いた場合も、切削条件は同じ条件を用いている。

これらの加工時間をもとに、必要な生産量を満たすための設備台数を決めると、従来の加工機では 4 台の NC 旋盤と 3 台の横形マシニングセンタが必要

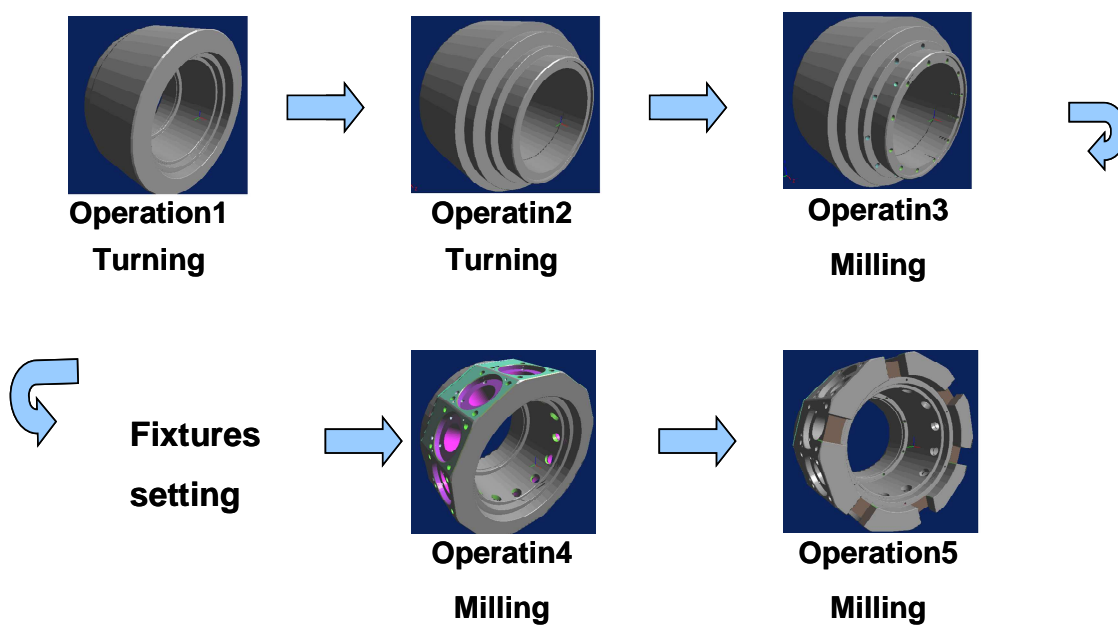


Fig.4.14 Machining process by using current machine tools

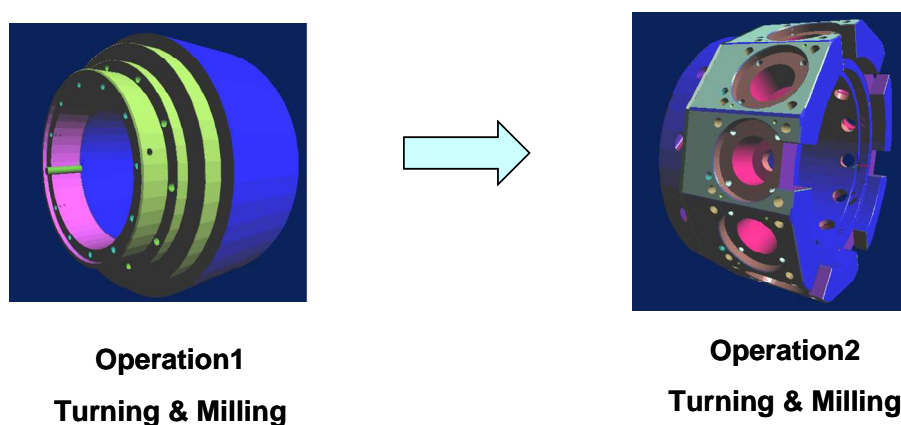
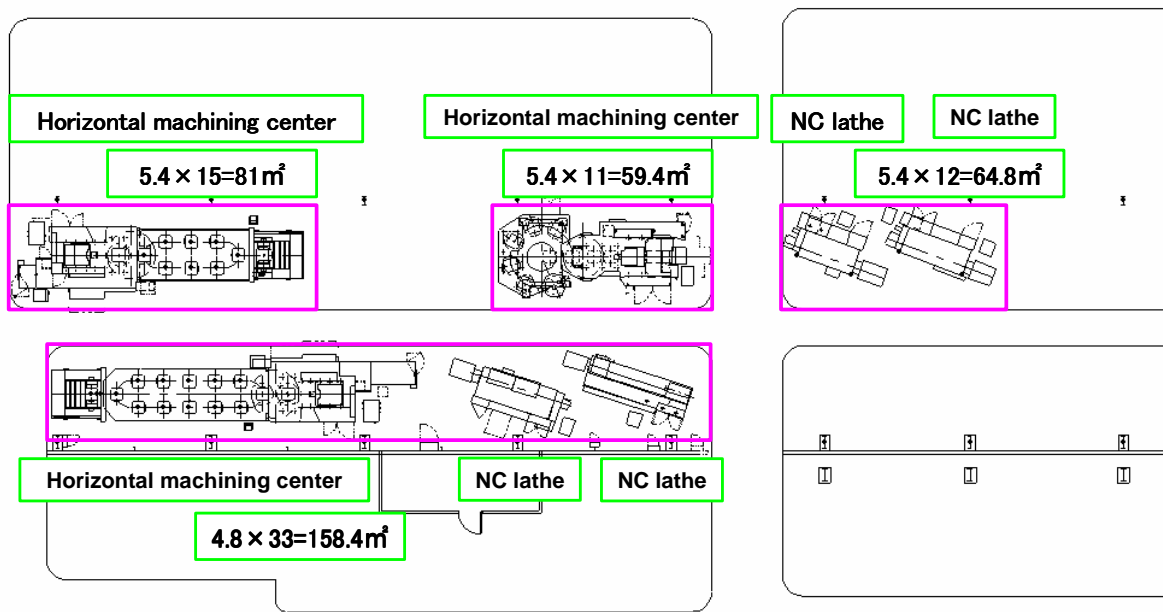


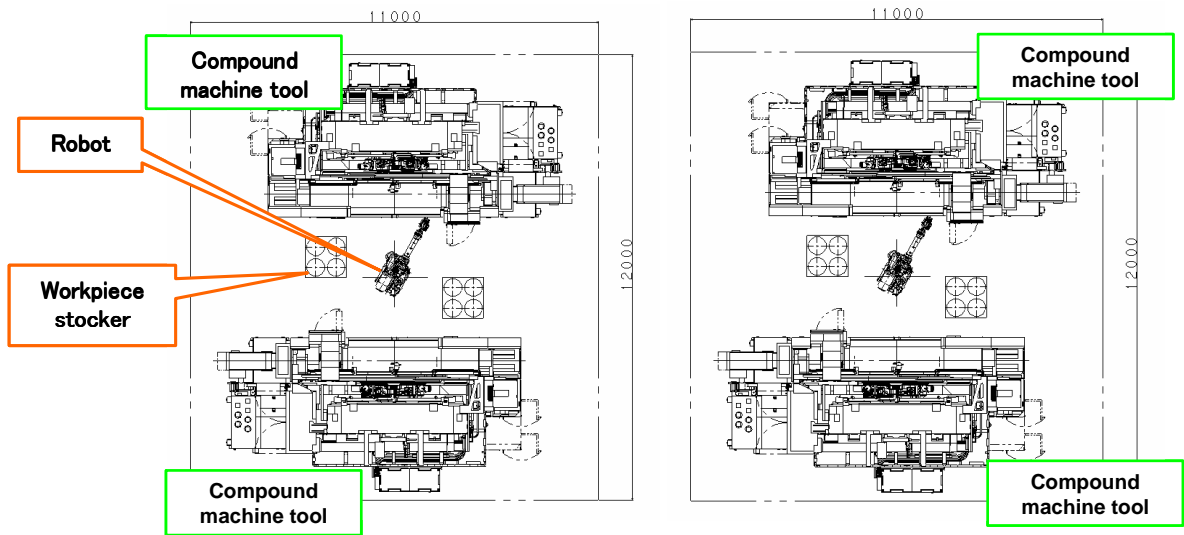
Fig.4.15 Machining process by using compound multiaxis machine tool

となる。同様に最新の複合加工機は 4 台必要となる。

これらを配置した図が図 4.16 である。従来の加工機では合計 363.6 m<sup>2</sup>のフロアスペースが必要となり、複合加工機では 264 m<sup>2</sup>となった。最新の複合加工機ではフロアスペースが 27%改善されていることが確認された。



(a) Current machine tools



(b) Compound multi-axis machine tools

Fig.4.16 Comparison of floor space

## 4.7 採算性の検証

更に第 4.6 章の図 4.16 の事例を用いて採算性を検証してみる。これらの設備の投資金額の比較を表 4.7 に表す。確かに複合加工機 1 台の価格は従来の NC 旋盤より高価であるが、NC 旋盤とマシニングセンタの合計金額よりは安価であり、システム全体の投資金額では 14% の削減が図れていることが確認された。この結果は NC 旋盤 4 台とマシニングセンタ 3 台を用いて加工している加工物を、4 台の複合加工機を用いて加工できるようになったことで得られる当然の結論であり、すなわち必要な加工時間を達成できる仕様を定義し、その仕様を実現できる機械を設計、開発した当然の帰着である。

第 2.2 章で述べたように、複合加工機の性能の側面の課題を解決することによっておのずとコストの側面の課題も解決されることが立証された結果となった。

**Table4.7 Comparison of machine price and floor space**

### Machine price of current machine tools

Machine type	Machine price
Horrrizontal machining center	¥22,140,000
Horrrizontal machining center	¥42,790,000
Horrrizontal machining center	¥42,145,000
NC lathe	¥12,680,000
NC lathe	¥20,600,000
NC lathe	¥14,360,000
NC lathe	¥21,600,000
total	¥176,315,000

### Machine price of new compound multiaxis machine tools

machine type	machine price
Compound multiaxis machine tool	¥37,616,000
Compound multiaxis machine tool	¥37,616,000
total	¥75,232,000
total of 2set	¥150,464,000

## 4.7 結言

本章では、第3章までの理論に基づいた複合加工機を実際に開発し、実機を用いた検証を行った。実際に開発した複合加工機には第3章までに決めた構造に加えて、更に性能を高めるために重心駆動方式、オクタゴナルラム方式、ビルトインモータ・ターレットなどの技術を採用した。

その結果、従来は0.2秒の制定時間を要していた高速軸移動後停止時の振動もほぼ抑えることができ、Y軸の真直度も $6.6\mu\text{m}/420\text{mm}$ となり、真円切削精度は従来の複合加工機に比べて切削送り速度が2倍に上がり、真円度は4～5倍高くなり、高精度マシニングセンタと同等以上の高い運動精度が得られていることが確認された。

また実際の加工物を用いて加工時間の短縮効果を検証した結果、従来の複合加工機に比べて非切削時間による短縮効果だけで1.22倍～1.36速くなっており、NC旋盤やマシニングセンタと同等以上の生産性を得ることができていることが判った。更に同じ生産量を得るために必要な電気エネルギーは21%削減され、フロアスペースは27%削減され、機械購入の際の初期投資額も14%削減できることが判った。

その結果、第2章で述べた現在の複合加工機の課題すなわち、従来のNC旋盤やマシニングセンタと比較して、

- ・加工精度が同等以上であるか
- ・同等以上の採算性が得られる加工時間（生産性）が達成できているか
- ・電気エネルギー使用量あたりの生産性は同等以上か
- ・フロアスペースあたりの生産性は同等以上か
- ・採算性は改善されたか

といった課題が解決されていることが確認された。

## 第5章

### 結論

バブル崩壊後の低迷期を経て、近年、日本の工作機械業界は堅調に生産高を伸ばし続けている。その背景には低迷期を乗り越えるために工作機械を使用するユーザ側も、工作機械を提供するメーカ側も、どちらも精度、生産性を追及するための創意工夫を怠らずに行ってきた結果が結実しているものと言える。

このような背景の中で新たな生産設備形態として登場してきた複合加工機は年々需要が増えるとともに、その課題も明白となり、様々な研究開発が行われてきた。

そこで、本研究では工程を集約するために色々な機能を追加する形で成長していった複合加工機について、原点に立ち帰って、複合加工機に求められる精度、生産性、経済性を検討し、それらを実現するための最適な仕様と項目を決め、実際に実機を開発して検証することにより妥当性を確認することで、現在の複合加工機の課題を解決し、かつ複合加工機的设计方法論を整理・確立することを試みた。

本研究により得られた結果を以下にまとめる。

第2章では、複合加工機に要求される加工精度と加工時間を実現するための仕様と基本構造を検討するにあたり、複合加工機で加工されている加工物107点440工程を分析した結果、外径旋削加工や外径ドリル加工、内径旋削加工、端面旋削加工、端面ドリル加工などの基本的な加工に着目する必要があることが明らかになった。そこで、求められる加工時間を実現するための仕様を採算性を考慮して従来のNC工作機械と比較しながら検討し、またその加工時間を実現しかつ高い加工精度を得るための基本構造の検討を行った結果、次の結論を得た。

(1) 複合加工機を用いて従来の加工機械（NC旋盤や複合旋盤）で加工されて

いた加工物を加工する場合は、投資を一定の期間で回収して利益を従来の加工機と同等にするという観点から、従来の加工機に比べて1.15倍～1.5倍速く加工できなければ従来の加工機と同等の採算を得ることができない。

また、式(2.10)を用いることよって、ある部品を加工する際の稼働条件(稼働時間、稼働率)と稼働に要する単位費用(固定費、変動費)が同じであれば、もともと加工している機械での加工賃と加工時間、その機械の価格、そして新たに導入する機械の価格が分かれば、その加工物を新たに導入する機械で加工するときの要求加工時間の算出が可能となった。

(2) 複合加工機で加工される代表的な加工物を最も投資効果が高く加工できる機械構造は、加工物主軸を2個、工具台を2個配置した構造であることが明らかになった。

(3) 複合加工機の基本構造として実際に採用し得る構造を比較検討した結果、最も有用な構造は工具を4軸移動させ、加工物を回転移動させる機構を持つ、構造としては古典的とも言える立形構造が有利であることが明らかになった。

第3章では、第2章で得られた結論に基づき更に詳細に複合加工機の基本構造の詳細検討を行い、以下の結論を得た。

(1) 加工物をC軸移動させ、工具をX, Y, Z, B軸の4軸移動させる構造を持つ複合加工機の3軸直交移動構造としては、複合加工機に要求される精度、生産性を実現するためには移動物重量が小さくでき、移動物の駆動によってモーメントが生じ難い構造であるBox in box構造が適している。

(2) Box in box構造は特にコラム部が大きな箱構造となるため、必要な剛性値を確保し、また共振周波数も高くとる必要がある。

(3) クイル構造はY軸の位置によって加工位置における剛性値が変化するという課題を持つ。

(4) FEM解析を用いて詳細に設計検討を行うことで、Box in box構造の課題およびクイル構造の課題を克服し、あらゆる加工位置で $30\text{N}/\mu\text{m}$ 以上の剛性値が確保できる構造を実現することができた。

第4章では、第3章までの理論に基づいた複合加工機を実際に開発し、実機を用いた検証を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 従来は 0.2 秒の制定時間を要していた高速軸移動後停止時の振動もほぼ抑えることができ、Y 軸の真直度も  $6.6 \mu\text{m}/420\text{mm}$  と高い精度が得られた。
- (2) 真円切削の加工精度は、あらゆる加工平面において従来の複合加工機に比べて切削送り速度を 2 倍に上げることができ、真円度も 4~5 倍高くすることが出来た。
- (3) 加工時間は、従来の複合加工機に比べて非切削時間の短縮効果だけで 1.22~1.36 速くすることが出来ており、NC 旋盤やマシンニングセンタと同等以上の生産性が確保できた。
- (4) 同じ加工物を加工した場合の電気エネルギーの使用量は、従来の工程を分割した加工方法に比べて 21%削減出来ており、電気エネルギーの利用効率は従来の加工機に比べた格段に向上した。
- (5) 同じ加工物を加工する場合のフロアスペースは、従来の工程を分割した加工方法に比べて 27%削減出来ており、1 台の機械は大きくなるがフロアスペースあたりの生産性は従来の機械に比べて格段に向上した。
- (6) 初期投資額は、従来の工程を分割した加工方法に比べて 14%削減出来ており、1 台の機械は高価であるが生産性が高くなることによって必要な生産量に対する投資額は従来の機械よりも低く抑えることができることが判った。

以上のように、複合加工機に求められる精度、生産性を満たす仕様をきちんと定義し、それに基づいた複合加工機を体系的に設計することによって、要求される精度、生産性を満たす複合加工機を開発することが出来た。また、複合加工機が持つ本来の長所、すなわち工程が集約され中間在庫の削減やリードタイムの大幅な短縮が可能となることや、機械台数が大幅に削減されフロアスペースあたりの生産性も飛躍的に向上することなどの特徴も活かすことが出来るようになった。

従って、複合加工機は間違いなく NC 旋盤、マシニングセンタに換わる次世代の生産設備として機械加工現場の主役になるものと確信する。

また、本研究で確立を試みた設計方法論は、求められる精度、生産性を基にして必要な仕様を定義し、それらを満たす工作機械を体系的なアプローチで設計していくという手法を用いたという点で、複合加工機の開発だけに留まらず、今後新たな工作機械を開発する上での設計方法論を提言できたものと確信する。

更に、この研究成果により最新の複合加工機は従来のNC旋盤やマシニングセンタに換わる生産設備として広く利用されるようになっていくと考えられるが、工作機械が工業製品に果たす役割を考えると、今後は今回開発した最新の複合加工機の性能を十分に活用した更に付加価値の高い加工が行われるようになると考えられ、その結果また新たな課題も指摘されるようになり、さらに複合加工機の高度化が進んでいくという工作機械と工業製品の高度化のサイクルが繰り返されていくものと考えられる。そのときに本研究で用いた設計方法論が一助となれば幸いである。

## 参考文献

### 第1章

- 1) 稲葉清右衛門、黄色いロボット、日刊工業新聞社、(1989)、pp.19-38.
- 2) 日本工作機械販売協会、日本のマシニングセンタ ―MC選択の手引―、工業調査会、(1981)、pp.3-15.
- 3) 藤村善雄、安井武司、工作機械と生産システム、共立出版、(1985)、pp.4-14.
- 4) 佐藤善治、ターニングセンタの導入と活用のポイント、ツールエンジニア、141巻、1号、大河出版、(2000)、pp.23-29.
- 5) 伊東誼、森脇俊道、工作機械工学、コロナ社、(1989)、pp.109-135.
- 6) 和田龍司、次世代工作機械のあるべき姿、第7回国際工作機械技術者会議、社団法人日本工作機械工業会、(1996)、pp.31-51.
- 7) 工作機械統計便覧 2004年、社団法人日本工作機械工業会、(2005)、pp.3-13.
- 8) 中島秀和、高剛性ターニングセンタ「MTシリーズ」の機能、ツールエンジニア、143巻、1号、大河出版、pp.34-39.
- 9) 桑原太平、スーパーハイセルシリーズ、ツールエンジニア、43巻、1号、大河出版、pp.23-29.
- 10) 垣野義昭、稲崎一郎、森脇俊道、古川勇二、工作機械のダイナミクス ―その評価と設計への応用―、機械の研究、30巻、2号、養賢堂、(1978)、pp.79-82.
- 11) G. Byrne, D. Dornfeld, B. Denkena, Advancing Cutting Technology, Annals of the CIRP, Vol.52/2, (2003), pp.484.
- 12) 佐久間敬三、斎藤勝政、吉田嘉太郎、鈴木裕、工作機械―要素と制御―、コロナ社、(1992)、pp.1-66.
- 13) 垣野義昭、最新のマシニングセンタの機能と課題、機械と工具、41巻、4号、工業調査会、(1997)、pp.2-5.
- 14) 安井武司、伊藤誼、稲崎一郎、岩田一明、垣野義昭他、世界の工作機械

- 工業、工作機械84マシニングセンタ、生産財マーケティング編、ニュースダイジェスト社、(1984)、pp. 5-10.、 pp. 79-83.
- 15) 長尾克子、工作機械技術の変遷、日刊工業新聞社、(2002)、pp. 317-335.
  - 16) 伊東誼、森脇俊道、工作機械工学、コロナ社、(1989)、pp. 162-189.
  - 17) 中南成光、最新の複合加工機「MT2500」、機械技術、51巻、3号、日刊工業新聞社、(2003)、pp. 23-27.
  - 18) 安田浩、スーパーミラー400、機械技術、51巻、3号、日刊工業新聞社、(2003)、pp. 33-37.
  - 19) Gポール/W. バイツ[共著]、ケイン・ワラス[編]、設計工学研究グループ[訳]、工学設計 体系的アプローチ、培風館、(1995)、pp. 43-50.
  - 20) 機械工学便覧 デザイン編 β1 設計工学、日本機械学会、(2007)、pp. β1-188-191.
  - 21) 伊東誼、新野秀憲、工作機械の構造記述、日本機械学会論文集 (C編)、46巻、405号、(1980)、pp. 562-571.
  - 22) 新野秀憲、伊東誼、工作機械の構造創成方法 (第3報、結合パターンを用いたバリエーションデザイン方式による創成)、日本機械学会論文集 (C編)、52巻、474号、(1989)、pp. 788-793.
  - 23) D.N. Reshetov, V. Portman, Accuracy of Machine Tools, ASME Press, (1988) , pp.21.
  - 24) 杉村延広、岩田一明、大場史憲、牧之内三郎、工作機械の設計に対する解析的アプローチ (形状創成過程のモデル化とその分析)、日本機械学会論文集 (C編)、47巻、418号、(1981)、pp. 793-802.
  - 25) 岩田一明、杉村延広、加工用機械構造の基本設計に関する研究、日本機械学会論文集 (C編)、56巻、523号、(1990)、pp. 803-809.
  - 26) 森脇俊道、杉村延広、苗 勇、工作機械の精度設計に対する解析的アプローチ (第2報、加工面の要求精度に基づく創成運動の精度設計について)、日本機械学会論文集 (C編)、59巻、564号、(1993)、pp. 300-305.
  - 27) 杉村延広、村部敦史、5軸工作機械の精度設計に関する基礎的研究、日本機械学会論文集 (C編)、67巻、657号、(2001)、pp. 445-450.

- 28) 里中直樹、杉村延広、谷水義隆、岩村幸治、工作機械の運動偏差のモデル化と解析に関する研究、日本機械学会論文集（C編）、71巻、708号、(2005)、pp. 192-198.
- 29) 布引雅之、オブジェクト指向に基づく工作機械の知的設計支援に関する研究、神戸大学 博士論文、(1992)、pp. 1-7.
- 30) 苗 勇、工作機械の基本設計における精度設計に関する研究、神戸大学 博士論文、(1993)、pp. 1-11.
- 31) 稲崎一郎、工作機械における形状創成理論の体系化と応用、日本機械学会論文集（C編）、60巻、574号、(1994)、pp. 1-5.
- 32) 佐藤眞、日本における5軸MCの設計と性能、第12回国際工作機械技術者会議、社団法人日本工作機械工業会、(2006)、pp. 45-61.
- 33) 長江昭充、複合工作機械の開発動向、第11回国際工作機械技術者会議、社団法人日本工作機械工業会、(2004)、pp. 172-179.
- 34) M. Nakaminami, T. Tokuma, T. Moriwaki, K. Nakamoto, Optimal Structure Design Methodology for Compound Maltiaxis Machine Tool- I Analysis of Requirements and Specifications, International Journal of Automation Technology, Vol.1, No.2, (2007) , pp.78-86.
- 35) M. Nakaminami, T. Tokuma, T. Moriwaki, K. Nakamoto, K. Matsumoto, S. Sakashita, Optimal Structure Design Methodology for Compound Maltiaxis Machine Tool- II Investigation of Basic Structure, International Journal of Automation Technology, Vol.1, No.2, (2007) , pp.87-93.
- 36) M. Nakaminami, T. Tokuma, T. Moriwaki, K. Nakamoto, K. Matsumoto, S. Sakashita, Optimal Structure Design Methodology for Compound Maltiaxis Machine Tool-III Performance Evaluation, International Journal of Automation Technology

## 第2章

- 37) 中南成光、旋削加工の生産性、付加価値をもっと高めよう、機械技術、51巻、11号、日刊工業新聞社、(2003)

- 38) 中南成光、最新の複合加工機「MT2500」、機械技術、51巻、3号、(2003)、日刊工業新聞社、pp. 23-27.
- 38) 松本和彦、中南成光、MT2500の加工例、ツールエンジニア、44巻、1号、大河出版、(2003)、pp. 28-31.
- 40) 森精機製作所カタログ、MT2000  $\alpha$  1、(2001)、pp. 5-9.
- 41) 村木俊之、複合工作機械の機能開発と性能向上に関する研究、京都大学博士論文、(2003)、pp. 4-21、pp. 93-96.
- 42) 稲崎一郎他、工作機械の形状創成理論、(1997)、pp. 42-62.
- 43) 五島康尋、複合加工機の設計思想と構造、機械と工具、49巻、11号、工業調査会、(2005)、pp. 28-34.
- 44) 日本機械学会編、工作機械の最先端技術、工業調査会、(1988)、pp. 181-235.
- 45) 布引雅之、オブジェクト指向に基づく工作機械の知的設計支援に関する研究、神戸大学 博士論文、(1992)、pp. 61-74.
- 46) 森脇研究室、工作機械の基本設計における精度設計に関する研究、第5章工作機械の創成運動の精度設計(同時5軸制御加工の場合)、神戸大学工学部機械工学科、(1993)、pp. 89-104.
- 47) Gポール/W. バイツ[共著]、ケイン・ワラス[編]、設計工学研究グループ[訳]、工学設計 体系的アプローチ、培風館、(1995)、pp. 65-75.

### 第3章

- 48) 中南成光、徳間耕、森脇俊道、複合加工機最適設計のための項目と仕様の検討、神戸大学自然科学研究科紀要、24号、(2006)
- 49) Y. Koren, A. G. Ulsoy, Reconfigurable Machine Tools and Reconfigurable Systems, The 9<sup>th</sup> International Machine Tool Engineers' Conference(IMEC), Japan Machine Tool Builders' Association, (2000), pp.180-189.
- 50) M. Weck, A. Schumacher, M. Queins, Next Generation High Speed Machine Tool, The 8<sup>th</sup> International Machine Tool Engineers'

- Conference(IMEC), Japan Machine Tool Builders' Association, (1998), pp.175-185.
- 51) S. Altmuller, G. Eisenblatter, High Speed Cutting Machining, The 8<sup>th</sup> International Machine Tool Engineers' Conference(IMEC), Japan Machine Tool Builders' Association, (1998), pp.186-195.
  - 52) 藤嶋誠、檜原圭蔵、河本道生、最新工作機械の技術動向（D D モーターの開発）、2006年精密工学会秋季大会学術講演会論文集、(2006)
  - 53) P. Sriyotha, K. Nakamoto, M. Sugai, K. Yamazaki, Development of 5-Axis Linear Motor Driven Super-Precision Machine, Annals of the CIRP, Vol.55, (2006), pp.381-384.
  - 54) 森口一豊、高精度に使いやすく進化し続ける5軸制御マシニングセンタと複合加工機の魅力、素形材、素形材センター、(2007)
  - 55) H. H. Winkler, D. Prust, Five Axis Machining of Production Parts, The 12<sup>th</sup> International Machine Tool Engineers' Conference(IMEC), Japan Machine Tool Builders' Association, (2006), pp.281-287.
  - 56) D. G. McIntsh, Success Stories of 5-axis Machining in North America, The 12<sup>th</sup> International Machine Tool Engineers' Conference(IMEC), Japan Machine Tool Builders' Association, (2006), pp.157-166.
  - 57) 堤正臣、最新の5軸制御マシニングセンタ精度評価技術、第12回国際工作機械技術者会議、社団法人日本工作機械工業会、(2006)、pp97-108.
  - 58) 神谷昭充、マシニングセンタと超精密加工機の高精度化技術、第12回国際工作機械技術者会議、社団法人日本工作機械工業会、(2006)、pp. 128-138.
  - 59) 佐藤眞、日本における5軸MCの設計と性能、第12回国際工作機械技術者会議、社団法人日本工作機械工業会、(2006)、pp. 45-61.
  - 60) 家城淳、千田治光、松下哲也、パラレルメカニズム工作機械と多軸工作機械について、第12回国際工作機械技術者会議、社団法人日本工作機械工業会、(2006)、pp. 79-88.
  - 61) 小林学、旋回軸の問題点とその解決策、第12回国際工作機械技術者会議、

- 社団法人日本工作機械工業会、(2006)、pp. 89-96.
- 62) 金丸允昭、ユーザより見た同時5軸加工の事例と課題、第12回国際工作機械技術者会議、社団法人日本工作機械工業会、(2006)、pp. 139-148.
- 63) J. Bohez, Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.42, Issue.4, (2002), pp.505-520.
- 64) H. B. Cheng, Z. J. Feng, K. Cheng, Y. W. Wang, Design of a six-axis high precision machine tool and its application in machining aspherical optical mirrors, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.45, Issue.9, (2005), pp.1085-1094.
- 65) O. R. T. Fatan, H. Y. Feng, Configuration analysis of five-axis machine tools using a generic kinematic model, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.44, Issue.11, (2004), pp.1235-1243.
- 66) C.R. Boer, M.Petitti, A CAPP/CAM Expert System for a High Productivity, High Flexibility CNC Turnig Center, *Annals of the CIRP*, Vol.39, (1990), pp.481-483.
- 67) M. Mitsuishi, S. Warisawa, R. Hanayama, Development of an Intelligent High-Speed Machining Center, *Annals of the CIRP*, Vol.50, (2001), pp.275-280.
- 68) I. S. Sebastian, New, Fast, Different: An innovative Approach to Machine-Tool Production in Europe, The 9<sup>th</sup> International Machine Tool Engineers' Conference (IMEC), Japan Machine Tool Builders' Association, (2000), pp.190-199.
- 69) B. Kuhfuss, Recent Development and Manufacture of Machine Tools in Germany, The 11<sup>th</sup> International Machine Tool Engineers' Conference (IMEC), Japan Machine Tool Builders' Association, (2004), pp.181-190.
- 70) 長江昭充、複合工作機械の開発動向、第11回国際工作機械技術者会議、

- 社団法人日本工作機械工業会、(2004)、pp.172-179.
- 71) 清水伸二、工作機械の最新開発動向とその推進キーテクノロジー、第11回国際工作機械技術者会議、社団法人日本工作機械工業会、(2004)、pp.96-105.
  - 72) C. P. Zhang, Y. M. Huang, W. H. Shi, W. P. Fu, Predicting dynamic behaviours of a whole machine tool structure based on computer-aided engineering, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.43, (2003), pp.699-706.
  - 73) A. Jonsson, J. Wall, G. Broman, A virtual machine concept for real-time simulation of machine tool dynamics, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.45, (2005), pp.795-801.
  - 74) 伊東誼、森脇俊道、工作機械工学、コロナ社、(1989)、pp.62-70.
  - 75) 新野秀憲、工作機械の最先端技術、日本機械学会、(1988)、pp.181-203.
  - 76) 岡本定次、工作機械の構成、内田老鶴圃、(1978)、pp.109-128.
  - 77) 江田弘、超精密工作機械の製作、工業調査会、(1993)、pp.11-21.
  - 78) 割澤伸一、工作機械設計者の思考形態可視化による日・独・英比較、日本機械学会生産システム部門講演会講演論文集、(2003)、pp.81-82.
  - 79) 藤田喜久雄、複雑な設計問題のためのモデルに基づいた最適設計－製品系列統合化設計での展開－、日本機械学会誌、109巻、1060号、(2006)、pp.51-53.
  - 80) 機械工学便覧 デザイン編 β1 設計工学、日本機械学会、(2007)、pp.β1-198-205.
  - 81) 三島望、工作機械の設計評価の研究-小型化を指向した設計パラメータ評価-、精密工学会誌、67巻、11号、(2001)、pp.1787.
  - 82) 三島望、石井浩介、森和男、タグチメソッドによる工作機械設計のロバスト性評価法、精密工学会誌、64巻、10号、(1998)、pp.1502-1506.
  - 83) 加藤貞夫、羽田隆男、複合工作機械のための工具モジュール設計問題の近似解法、日本経営工学会誌、48巻、5号、(1997)、pp.264-270.

- 84) 伊東 誼、西脇 信彦、中原 網光、堤 正臣、小泉 忠由、斉藤 義夫、ムスタフィズル・ラーマン、最近の工作機械技術、マシニスト出版、(1980)、pp. 7-23.
- 85) 堤 正臣、工作機械の最先端技術、日本機械学会、(1988)、pp. 206-211.
- 86) 藤田 喜久雄、松尾 崇宏、製品開発における手法やツールの活用状況の調査と分析、日本機械学会論文集(C編)、72 巻、713 号、(2006)、pp. 290-297.
- 87) 稲崎 一郎、工作機械のダイナミクス、機械の研究、30 巻、3 号、養賢堂、(1978)、pp. 87-92.
- 88) S. Mondragón, P. Company, M. Vergara, Semantic Differential applied to the evaluation of machine tool design, International Journal of Industrial Ergonomics, Vol.35, Issue.11, (2005), pp.1021-1029.
- 89) X. Luo, K. Cheng, D. Webb, F. Wardle, Design of ultraprecision machine tools with applications to manufacture of miniature and micro components, Journal of Materials Processing Technology, Vol.167, Issues.2-3, (2005), pp.515-528.
- 90) D. G. Lee, J. D. Suh, H. S. Kim, J. M. Kim, Design and manufacture of composite high speed machine tool structures, Composites Science and Technology, Vol.64, Issues.10-11, (2004), pp.1523-1530.

#### 第 4 章

- 91) Gポール/W. バイツ [共著]、ケイン・ワラス [編]、設計工学研究グループ [訳]、工学設計 体系的アプローチ、培風館、(1995)、pp. 339-345.
- 92) 森精機製作所カタログ、NTSERIES\_JA04\_L0、(2005)、pp. 36、pp. 53、pp. 68.
- 93) 平元一之、加工品位と加工速度の両立を可能にする重心駆動 (DCG) 理論、機械設計、日刊工業新聞社、(2004)、pp. 46-48.
- 94) 高井康文、最新複合加工機のメカニズムとそのメリット、機械と工具、工業調査会、(2006)
- 95) ウェイン アール ムア、FOUNDATION OF MECHANICAL ACCURACY、国際工機株式会社、(1970)、pp. 35-46、pp. 51.

- 96) M. Weck, K. Teipel、工作機械動特性の測定と評価、マシニスト出版、(1980)、pp. 142-146.
- 97) 岩田一明、稲崎一郎、上野滋、大高義穂、佐藤寿芳他、精密工作機械のための計測技術に関する調査研究、工作機械技術振興財団、(1984)、pp. 5-25.
- 98) 森精機製作所カタログ、MT2000  $\alpha$  1、(2001)

## 謝辞

本論文をまとめるにあたり、ご懇篤なるご指導を賜りました元 神戸大学大学院 自然科学研究科 機械・システム科学専攻 森脇俊道教授（現 神戸大学名誉教授、摂南大学教授）に深く感謝致します。また、ご多忙中にもかかわらず本論文の審査をお引き受け頂き有益なご教示、ご助言を賜りました神戸大学大学院工学研究科 白瀬敬一教授、田浦俊春教授、貝原俊也教授、柴坂敏郎准教授および中本圭一助教に厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり、所属する株式会社森精機製作所の皆様には多大な援助を頂きました。代表取締役社長 森 雅彦氏、代表取締役副社長 水口博氏、常務取締役 藤嶋 誠氏には、ご指導を頂くと共に学位取得の機会を与えて頂きましたことを深く感謝申し上げます。また、一緒に研究して頂いた開発本部 松本和彦氏、阪下祥規氏、徳間耕氏にも深く感謝致します。また、本論文をまとめるにあたり、適切なアドバイスを賜りました社会人学生の先輩であるオークマ株式会社 千田治光氏、トヨタ自動車株式会社 吉村博仁氏にも深く感謝致します。

最後に、社会人学生としての私を陰ながら支えてくれた家族に心から感謝致します。

2008年1月

中南 成光