機械系 大学講義シリーズ

25

新版 工作機械工学

東京工業大学名誉教授 工学博士
伊 東 誼

神戸大学名誉教授
摂南大学名誉教授 工学博士
森 脇 俊 道

共 著

コ ロ ナ 社

機械系　大学講義シリーズ　編集機構

編集委員長

藤　井　澄　二　（東京大学名誉教授　工学博士）

編 集 委 員（五十音順）

臼　井　英　治　（東京工業大学名誉教授　工学博士）

大　路　清　嗣　（大阪大学名誉教授　工学博士）

大　橋　秀　雄　（東京大学名誉教授　工学博士）

岡　村　弘　之　（東京大学名誉教授　工学博士）

黒　崎　晏　夫　（東京工業大学名誉教授　工学博士）

下　郷　太　郎　（慶應義塾大学名誉教授　工学博士）

田　島　清　瀬　（早稲田大学名誉教授　工学博士）

得　丸　英　勝　（京都大学名誉教授　工学博士）

序

工作機械は，人間社会の必要とする物を生産するうえで重要な手段の一つである。このことは,「一国の技術レベルはその国の工作機械技術のレベルに左右される」という事実により裏付けられている。しかし，その重要性にもかかわらず，わが国では「工作機械」は一般社会，あるいは場合によっては技術者の社会でもなじみのない言葉の一つである。これは，工作機械の特質が産業を支える「縁の下の力持ち」的なものであることによるのであろう。しかし，機械技術者の間でも工作機械が特殊なものとみなされる理由の一つとして，大学における工作機械の講義は，従来その設計技術に重点を置きすぎたことがあげられる。すなわち，多くの場合に，かの有名な Schlesinger の著書，あるいはそれに類似のテキストを使用して設計技術主体の講義が行われている。しかし，将来工作機械技術者になることを希望する少数の学生を除けば，大多数の学生にとって，これは無意味と感じられ，履習するものは限られてくる。一般的に多くの技術者および学生にとって，工作機械の設計技術よりは，工作機械をいかに効率よく利用するか，いわゆる工作機械の利用技術のほうが重要である。残念なことに，これまで出版された工作機械に関する書籍には，このような工作機械の利用技術を主眼としたものは数少なく，また，その内容も不十分である。しかも，従来，このような工作機械の利用技術は等閑視されていた嫌いがある。

ところで，人間社会の発展とともに，必要な「物」に要求される性能は多様化，高度化しつつある。これは，工作機械の高精度化，高能率化および複合機能化を要求するようになるが，これらの要求に工作機械単体で対処するのは困難である。そこには，工作機械−工具−工作物系内の工作機械，あるいは生産システム内の一要素としての工作機械というシステム的な観点が必要となる。その結果，従来にも増して工作機械の利用技術が重要視されることになる。しかも，生産性の向上のために，例えばフレキシブル生産システムで代表されるように，工作機械の自動化，複合加工化がこのシステム的な発想のもとで進行している現状では，工作機械の利用技術はますます重要な意味を持ってくる。

ただし，工作機械を効果的に利用するには，その機械の設計方法や構造等に熟知していることが望ましいのも事実である。しかし，満足し得るレベルまで設計技術と利用技術の両者を同時に習得するのは一般的に困難であろう。そこで，工作機械がブラックボックス化しつつある現状を踏まえて，おもに工作機械の利用技術を対象にまとめたのが本書である。ただし，前述のような主旨から，よりよい利用技術を習得するうえで必要な最低限の設計技術の知識も説明している。

以上のことより，本書名を「工作機械工学」とした意図はご理解いただけると思うが，このように本書は，従来とは異なった観点から工作機械について論じているので，学生のみならず，工作機械をいかに有効に利用するかという点に関心のある技術者の方々にも役立つものと考えている。なお，本書は，1 章，3 章，6.1～6.3 節を森脇が，2 章，4 章，5 章，6.4 節，7 章を伊東が分担し執筆した。終わりに，新しい意図のもとに本書を執筆する機会を与えていただいた東京工業大学臼井英治教授，ならびに出版に際していろいろとご苦労いただいた(株)コロナ社に深甚の謝意を表したい。

1989 年盛夏

伊東　　誼・森脇　俊道

改訂版の発行に際して

「物つくり立国」なる標語が我が国の国是とみなせるような情勢が追い風となっているのであろうが，本書は，初版第 1 刷を 15 年前に発行して以来，幸いにして数多くの方々にご愛読を頂き，12 刷まで増刷を重ねてきた。しかし，ここ 10 年の間における社会の発展はめざましく，それはグローバル環境下での工作機械の高精度化，高能率化，ならびに複合機能化をますます要求するようになっている。その結果，本書にも陳腐化した内容が散見されるようになったので，上記に再録してある初版の序文に記されている意図は堅持しつつ，改訂版を発行することにした次第である。附言すれば，改訂版では初版とは異なり，2.2 節を森脇が分担執筆している。

2004 年早春

伊東　　誼・森脇　俊道

新版の発行にあたって

1989 年に初版を発行してから約 30 年が経過した。この間に工作機械技術は格段に進化し，また関連する研究の進展も目覚ましいものがある。特に，この間における大きな変化はコンピュータや情報処理関連技術の進歩であろう。工作機械は数値制御（NC：Numerical Control）化されたことによって，つねに最先端のコンピュータ技術を利用して素晴らしい発展を遂げた。その結果として単に数値制御技術の高度化のみならず，工作機械の形態も大きく変化させることとなった。具体的にはマシニングセンタ（MC：Machining Center），ターニングセンタ（TC：Turning Center）あるいは複合工作機械など，汎用工作機械の時代には考えられなかったような新しい形態を有する工作機械が数多く誕生した。また，同時に工作機械のハードウェアの面からみれば，速度，生産性，精度も飛躍的に向上した。その裏には工作機械に関する地道な研究・開発の努力があったことを忘れてはならない。

産業界における工作機械の位置づけをみると，わが国の工作機械の生産高は，1982 年にドイツを抜いて世界一となり，2009 年に 1 位の座を中国に譲ったが，以降世界第 2 位の地位を堅持している。工作機械産業がその国のものづくり産業の指標の一端を示すことを考えればこのことはうなずけよう。しかも，わが国で生産される工作機械は 90 %以上が NC 工作機械であり，その 60 %ほどが海外に輸出されている。わが国の工作機械はドイツと並んで技術的にも世界の最高水準を維持し，わが国のみならず世界のものづくり産業に貢献していることは疑う余地もない。

さて，幸いにも本書は改訂版も含め，発行以来多くの方々にご愛読いただいて，版を重ねることができた。しかしながら上述したように，昨今の工作機械関連技術の進化は目覚ましく，新たな版をおこすことが適切であると判断し，新版の発行を思い立つに至った。新版を執筆するにあたり当初の理念，すなわち「工作機械を設計する側と，利用する側の双方に配慮した書とすること」は

堅持し，章立ては基本的に初版とほぼ同じとしたが，できるだけ最新の情報も含めることとして内容を一新した。

工作機械を利用する立場からすれば，自動化が進んだこんにち，工作機械の中身はブラックボックス化して，使用法を理解すればよいという考え方も成り立つ。しかしながら，工作機械はただ運転すればよいというものではなく，工作機械の基本的な特性を理解して初めてより効果的に利用することができるし，また加工プロセスを介して最終的な加工結果が得られることから，加工に関する基礎的な知識も必要となるであろう。さらに機械工学の立場からすれば，工作機械は機構，構造，制御など多くの工学の集大成であるといえる。その意味ではやや専門的になったきらいはあるが，工作機械を設計する立場からの考え方も含めて必要な説明を行っている。本書が大学で機械工学を学ぶ学生諸君のお役に立てば幸いであり，またさらに工作機械をより広く理解しようとする専門家の入門書として利用していただければ望外の喜びとするところである。

なお，本書は 1 章，3 章，5.1 節～5.3 節を森脇が担当し，2 章，4 章，5.4 節，6 章，付録を伊東が担当した。末筆ながら「新版 工作機械工学」の出版に関してコロナ社の関係者各位には深甚の謝意を表する。

2019 年春

伊東　　誼・森脇　俊道

目　　次

1 工作機械工学の概要

1.1 工作機械の定義と工作機械の課題 …… *3*

1.2 工作機械の分類 …… *8*

1.3 工作機械と工作機械工学の歴史 …… *16*

1.3.1 産業革命以前 …… *16*

1.3.2 産業革命から第二次世界大戦まで
——汎用工作機械の発明と発展—— …… *17*

1.3.3 第二次世界大戦以降——数値制御工作機械の発展—— …… *20*

1.3.4 工作機械の加工性能向上の歴史 …… *24*

演　習　問　題 …… *28*

2 汎用 NC 工作機械の基本的な構造構成

2.1 工作機械の本体構造設計の基礎知識 …… *36*

2.1.1 変位基準設計の概要 …… *38*

2.1.2 軽量・高剛性，高減衰能，ならびに
小さな熱変形という設計の原則 …… *40*

2.1.3 構造設計の三大属性——高速性，高精度化，ならびに重切削性 …… *43*

2.2 工作機械の形状創成運動と案内精度 …… *45*

2.3 汎用 NC 工作機械の主要な構造構成 …… *47*

2.3.1 本　体　構　造 …… *48*

2.3.2 主軸構造と主軸駆動系 …… 58
2.3.3 案内構造と送り駆動系 …… 73

2.4 モジュラ構成と進みつつあるプラットフォーム方式
（加工空間重視のモジュラ構成） …… 82
2.4.1 モジュラ構成の定義，ならびに四原則 …… 84
2.4.2 メーカ主体のモジュラ構成――階層方式とユニット方式 …… 86
2.4.3 ユーザ主体のモジュラ構成――プラットフォーム方式 …… 86
演 習 問 題 …… 89

3 工作機械と数値制御

3.1 サーボ機構とその付属装置 …… 93

3.2 同時制御と補間 …… 99

3.3 NC プログラミング …… 103

3.4 多軸加工機と複合加工機 …… 109

3.5 高度な NC の制御と工作機械 …… 117
演 習 問 題 …… 124

4 工作機械と計測システム

4.1 センサ・フュージョン …… 135

4.2 工作物の形状，寸法および表面品位 …… 140
4.2.1 工作物の形状および寸法 …… 141
4.2.2 工作物の表面粗さ，その他 …… 144

4.3 工作物および切削・研削工具の取付け状態 …… 147

4.4 切削・研削抵抗，工具損耗，ならびに切りくず形態 …… 150
4.4.1 工 具 損 耗 …… 152
4.4.2 切りくず形態 …… 159

4.5　機械の稼働状態 …… 163
演　習　問　題 …… 165

5　工作機械の特性解析および試験・検査

5.1　工作機械に要求される性能と評価項目 …… 168
5.2　工作機械の特性解析と評価 …… 175
5.3　工作機械の評価試験と受入れ試験 …… 184
5.4　経 済 性 評 価 …… 190
5.4.1　加工コストの算出方法 …… 196
5.4.2　加工コストの削減に関わる指針 …… 198
演　習　問　題 …… 205

6　工作機械とユーザ支援技術

6.1　一般的なユーザ支援技術 …… 207
6.2　加工空間の連環とプラットフォーム方式の有効利用 …… 210
6.3　予防保全を含む品質保証設計 …… 214
6.4　廃 棄 性 設 計 …… 216
演　習　問　題 …… 221

付　　録
参　考　文　献
索　　引

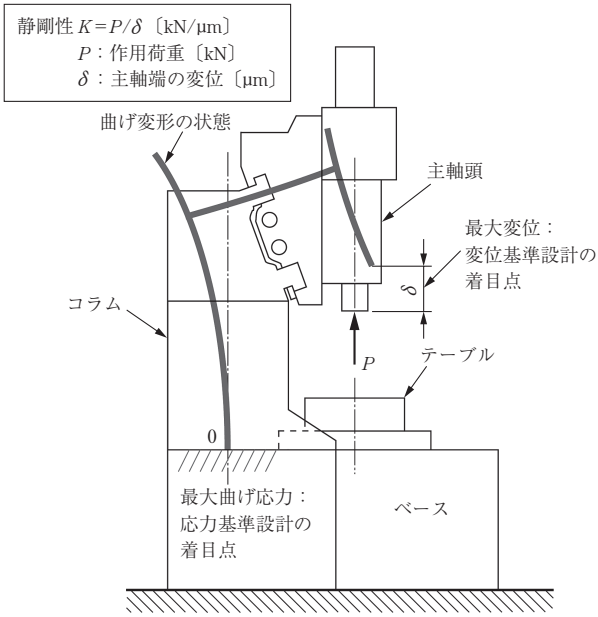


図 2.10　変位基準と応力基準の設計の違い，ならびに静剛性の定義

ベースの変形をコラムや主軸頭の変形に重畳して，コラムとベースの接合部を固定端として示している。なお，実際の構造設計では，コラムとベースの接合部に生じる「結合部の変形」を考慮しなければならない。

さて，図のように可視化すると，応力基準と変位基準の設計の違いが一目でわかり，なにかと便利である。コラムの変形や応力状態は材料力学の梁理論で与えられ，応力基準ではコラムの固定端に生じる最大曲げ応力，また，変位基準では主軸端に生じる最大変位に着目する。また，変位基準では，許容変位は最大でも 1/100 mm であり，これを固定端での応力に換算すると，許容応力の数十分の一にすぎない。

要するに，変位基準の設計では，「本質的に機械本体は非常に大きな形状・寸法」とならざるを得ないが，工作機械も人間が扱う以上，ほかの機械と同様な形状・寸法に小さく作らなければならない。ここに，工作機械の設計・製造上の最大の特徴があり，後述するように，いろいろな工夫が長年にわたってなさ

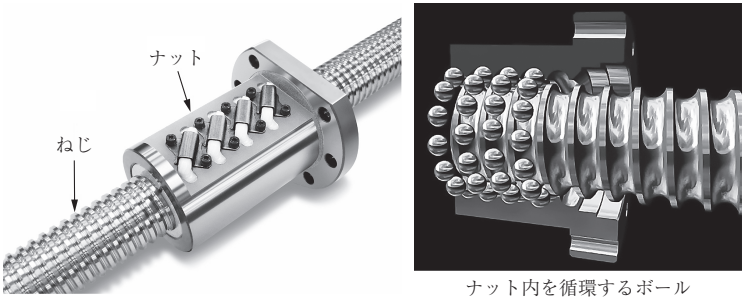


図 2.40　ボールねじ－ナット駆動（日本精工の厚意による，2017 年）

ここで，留意すべきはボールねじの支持方法であり，**図 2.41** に示すように三つの方法がある。両端固定方式では，剛性は大きくなるが，熱による伸びへの対処に工夫が必要であり，熱変形への対処は「固定－単純支持」のほうが容易である。また，一般的にボールねじを中空として冷却水を貫流させて熱変形の低減を図っているほかに，場合によっては制振材を充填して耐振動特性の向上を行っている。

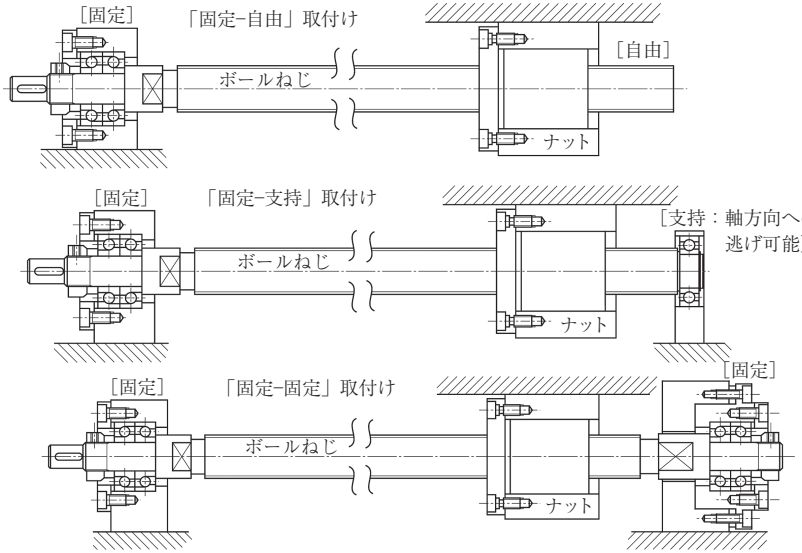


図 2.41　ボールねじの代表的な三つの取付け方法

ときの X 軸の正の向きは，回転軸から遠ざける方向に取る。

・Y 軸の正の方向は，右手直交座標系の方向に従う。

・回転軸 A 軸，B 軸，C 軸の正の向きは，それぞれ X 軸，Y 軸，Z 軸の正の方向に右ねじが進む方向に取る。

ここで代表的な工作機械の座標系を**図 3.9** に示す。

工具あるいは工作物は各軸に沿ってそれぞれ個別に送り運動が与えられることもあれば，二つ以上の軸に沿って相互に連携しながら送られることもある。このとき同時に工具あるいは工作物の送り運動が制御される軸を同時制御軸と呼んでいる。同時制御軸数が 1，2，3 および 5 の場合に，工具あるいは工作物の送り運動によって創成される工作物の形状は**図 3.10** のようになる[2)]。当然のことながら同時制御軸数が多いほど複雑な形状の加工を行うことができる。

送り運動の同時制御は以下のように行われる。いま，**図 3.11** に示すように X–Y 座標からなる二次元平面内で，原点 O（始点）から X 軸に対して θ の角度をなす方向に，速度 V で距離 L だけ進んだ点 P（終点）に工具が移動するものとする。ここで X 方向に $V\cos\theta$ の速度で，また Y 方向に $V\sin\theta$ の速度で，そ

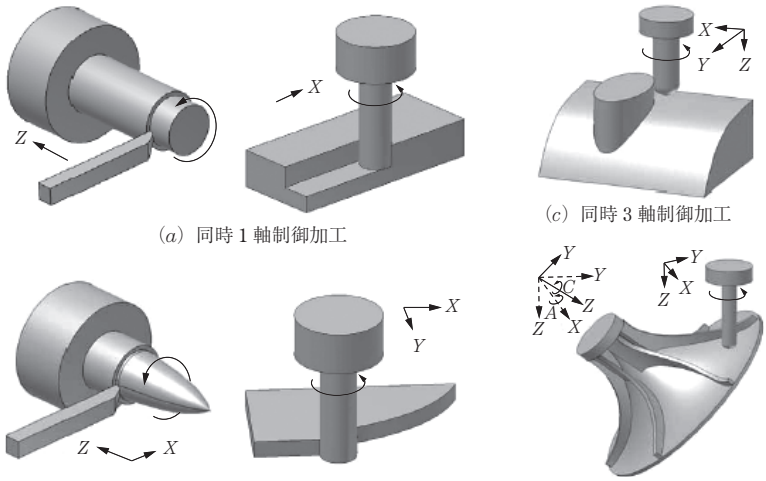


図 3.10 同時制御軸数と加工される形状[2)]

力を加えて工作物の変形を測定する方法が採用される。工作機械の設計段階では予め工作機械の数学モデルを作成し，有限要素法（FEM：Finite Element Method）などを用いて工作機械構造の剛性を求めて評価を行い，構造の最適化が図られる。有限要素法を用いてマシニングセンタの剛性解析を行った例を**図 5.19** に示す。図はテーブル上に固定した工作物と主軸の間に水平方向（X 方向）の相対的な力を加えた場合の解析結果を示しており，相対的な力によって発生する工作機械や工作物の変形状態を直感的に理解することができる。

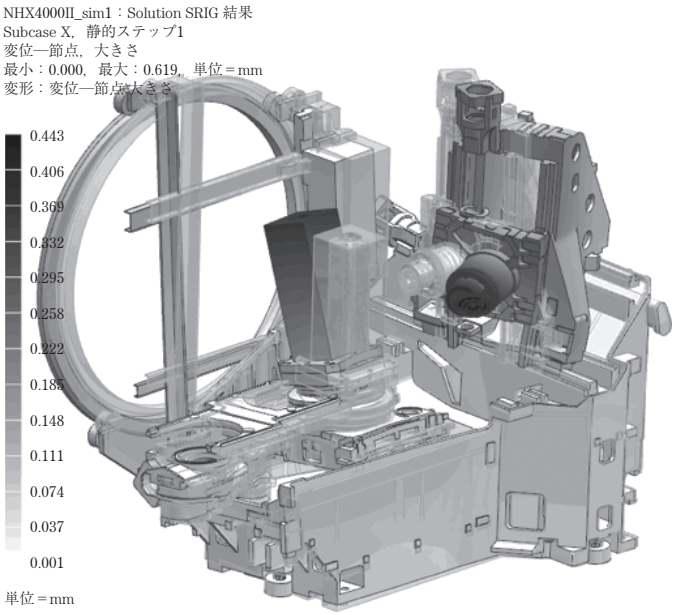


図 5.19　マシニングセンタの剛性解析結果の例（DMG 森精機の厚意による）

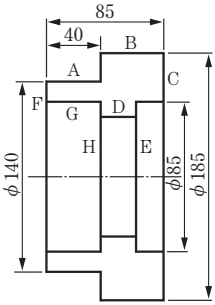
〔3〕動特性の解析と評価　　工作機械のびびり振動防止の観点からは，図 5.9 に示したように工作機械の動特性として工具・工作物間に加えられた動的な力に対する工具・工作物相対変位のコンプライアンスを求める必要ある。現在，最も一般的に用いられている動特性測定法は，インパルス応答法による測定法で，力変換器を具備したハンマで構造をインパクト加振し，それによって発生する過渡応答振動を測定して周波数応答を求める方法である。その原理と

れて工程設計をする際に用いられる。

そこで，**図 5.35** には，割歩を使って軸受ハウジングの加工コストを計算した例を示してある。まず，部品図をみて必要な工程を洗い出し（工程分析），ついで工程を適切な順番に配列（工程設計）する。そして工程ごとに加工コストを算出して，それらを合計すれば全加工コストが得られる。図には，A 部の粗旋削加工と中心部の穴あけ加工の計算例（参考値）を示してあるが，図中に示した加工方法（工程）記号は JIS に準拠している。なお，旋削では「送り量」をつぎのように「送り速度」に換算する必要がある。

送り速度 f〔mm/min〕＝送り量 s〔mm/rev〕×主軸回転数 n〔rev/min〕

ただし，切削速度 V〔m/min〕＝$(\pi Dn)/1\,000$，D＝直径〔mm〕



材質：SCM 21

軸受ハウジング

A部粗加工のコスト

切込み 4 mm×送り量 0.2 mm/rev（6回繰り返し）
切削速度 80 m/min，n＝160 rev/min
送り速度 32 mm/min，加工時間　約 0.8 min×6＝4.8 min
割歩　500 円/min，加工コスト　約2 500 円

穴あけ加工

下穴加工：直径 20 mm，切削速度 30 m/min，送り量 0.5 mm/rev
n＝500 rev/min，送り速度 250 mm/min，
加工時間　約 0.4（90/250）min
下穴加工：直径 60 mm，切削速度 30 m/min，送り量 0.5 mm/rev
n＝160 rev/min，送り速度 80 mm/min，
加工時間　約 1.1（90/80）min
割歩　300 円/min，加工コスト　約 450 円

工程分析および概略工程設計

材料取り：素材寸法－直径 190×幅 90 mm ―― A 部粗削り（L＋LFC）134×38 ―― 再チャッキング ―― 穴明け加工（D）

穴やとい加工 ―― D および E 部粗および仕上中ぐり（B）＋端面仕上削り（LFC） ―― B 部および C 部粗削り＋仕上げ削り（L＋LFC）

F，G ならびに H 部粗加工 ―― A 部仕上削り（L＋LFC） ―― G および H 部仕上加工

図 5.35　割歩による加工コストの計算例

以上のように，工作機械の経済性評価の一つは加工コストを指標として行うことができるが，式(*5.1*)からもわかるように，それは工作機械単体を評価し

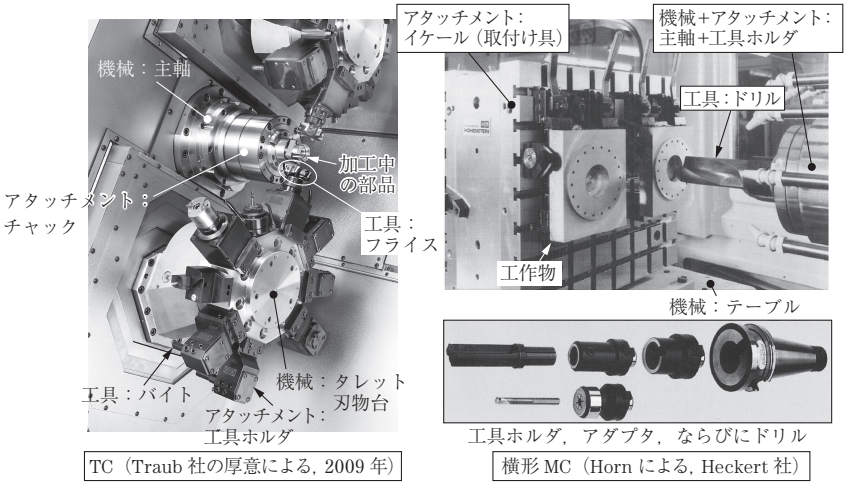


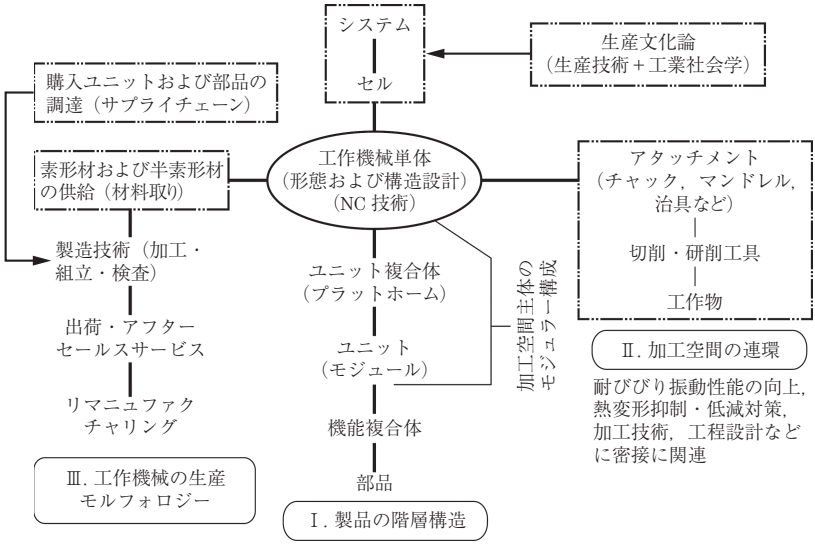
図 6.3　「加工空間」の情景

て機械を活用するには，工具ホルダやそのアダプタの知識が必要，不可欠なことが理解できる。

さて，図から「加工空間の連環」なる発想が理解できるであろうが，これをさらに**図 6.4** に示すような相関図へ展開すると，工作機械メーカの行うべきユーザ支援技術が理解しやすくなる。また，逆にユーザとしては，購入した機械の特性を生かす使い方を検討しやすくなるであろう。ここで，図 *6.4* は，NC 旋盤，TC，さらにはミルターンで行われることが多い「外丸削り」を対象としていて，機械が限定されていてもいろいろなアタッチメントと工具の組合せで加工方法の柔軟性を増大できることがわかる。

これに関連しては，*5.4* 節で紹介したように，これまでの工程設計を一変させるような切削工具や研削工具の革新が進みつつあり，それがアタッチメントにも及びつつあることに留意すべきである†。**図 6.5** はその一例であり，革新的なモジュラ方式コレットチャックである。一般的な円形とは異なる六角形コ

† 研削砥石車では，2015 年ころに 3M 社が，キュービトロン（CUBITRON）という商品名で，三角形状に成形したセラミックス砥粒を用いた砥石車を市販している。微小切削のような加工が可能で「流れ形」の微小切りくずを生成して，研削熱の発生を抑制すると報告されている。



付図 *1*　工作機械工学の広義な領域[1)]

全」などを取り扱っている。そして，それらをさらに詳しく学習するとなれば，アタッチメント，切削・研削工具，切削・研削機構などを知る必要があり，それには例えば「Theory and Practice in Machining Systems」[6)]と題する書を参考にすればよいであろう。このような書を参照すると，同時に工作機械技術の奥の深さも把握できる。

ところで，すでに *2* 章で述べたように，工作機械技術は ① 学術的知識，② 現場の「ノウハウ」を含む長い経験で蓄積された知識，③ 他分野の有益な知識の流用，ならびに ④ 勘（かん）と閃（ひらめ）きの活用が用途に適して巧みに組み合わせて構築されている。そこで，製造技術で必要，不可欠であり，また，工作機械技術の奥の深さを知るのに好適な「きさげ仕上げ」や「共ラップ加工」などの「手仕上げ作業」についても自家薬籠（やくろう）中のものとしなければならない[2)]。

それでは，ここで前述の公開されている参考資料が非常に少ない二つについて概要を説明しておこう。

素形材および半素形材の供給

これは，現場用語で「材料取り」と呼ばれるもので，部品図が与えられたときに，部品を削り出すために準備する素形材の寸法・形状を決める作業である。別の表現をすれば，部品図に記載された寸法に，「どれだけの余分な取り代（しろ）を付加するか」という，工程設計の第一段階である。また，多少意味合いは異なるが，同じような知識が付図 *1* 中の「加工空間の連環」の中の工作物に対しても要求される。

索　　引

〖A〗

AC　*117*
ACC　*129*
ACO　*152*
AE　*135, 138, 156*
AE センサ　*138, 156*
AE 信号　*135*
AGV　*23*
AI　*22, 123*
Al ポーラス材　*57*
AM　*1, 116*
ATC　*21*
あいまいな属性　*56*
アナログ方式　*20*
アナログ制御　*90*
アンダシュート　*170*
案内面　*175*
案内面の設計　*73*
案内精度　*47*
安全性　*6*
足踏み式の旋盤　*16*
遊　び　*170*
アタッチメント　*32*
圧力用検出子　*132*
アウターモジュレーション　*172*

〖B〗

BBS　*83*
Box-in-Box 構造　*56*
バーガイド　*81*
バックラッシ　*77, 97, 170*
バックラッシ試験　*185*
万能フライス盤　*19*
びびり振動　*121, 167*
びびり振動の安定線図　*174*
ビオー数　*43*
ビルトインモータ　*64*
ビトウィーン・プロセス計測　*126*
ボール盤　*9*
ボールねじ　*94*
ボールねじ駆動　*78*
ボールねじの支持方法　*79*
ポール旋盤　*16*
母性原則　*3, 166*
部品の互換性　*199*
部品の加工コスト　*196*
部品図作成工程　*198*
部品図作成と規格　*199*
分解能　*93*
ブローチ盤　*9*

〖C〗

CAD　*91*
CAM　*91*
cBN　*138*
CIM　*24, 224*
CL データ　*109*
CNC　*21*
CPS　*229*
CPS モジュール　*229*

〖D〗

DBB　*177*
DNC　*23*
dn 値　*63*
ダブル・ボール・バー法　*176*
ダブル・ナット方式　*78*
ダブル・ピニオン方式　*77*
ダイレクトドライブモータ駆動　*98*
電動機の起動時間　*68*
電気油圧パルスモータ　*21*
ディメンジョン　*104*
ディジタル方式　*20*
ディジタル制御　*90*
動剛性　*4, 41, 122, 170*
動的応答性　*168*
同時制御　*99*
同時制御軸　*101*
同時制御軸数　*93*

〖E〗

エンドミルの振れ回り　*149*
遠隔診断サービス　*210*
円弧補間　*102*
遠心力　*182*
円筒補間　*102*
円運動精度試験　*187*

〖F〗

FCIPS　*224*
FEM　*54, 178*

FM　*132*
FMC　*24, 225*
FMS　*22, 23, 224, 226, 227*
FMS の同時－同所の原則　*226*
FMS の五つの基本機能　*227*

〖*G*〗

GAC　*140*
GC　*29, 125*
GD^2　*68*
外部熱源　*175*
外乱オブザーバ　*159*
外乱信号　*135*
限界切削幅　*173*
減衰比　*172*
ギ　ブ　*77*
剛　性　*4, 170*
5 軸マシニングセンタ　*10, 110, 112, 114*
5 軸制御加工　*110*
群制御　*23*
グラインディングセンタ　*5, 10*
グラニタン　*50*
逆引き旋削　*203*

〖*H*〗

HSK　*71, 147, 213*
ハードワイヤード制御装置　*21*
背分力　*130*
ハイブリッド案内面　*80*
廃棄性設計　*217*
背面突切り　*203*
歯切り盤　*9*
半径方向誤差　*169, 176*
半径方向誤差運動　*187*
汎用工作機械　*8, 14*
汎用 MC を構成する大物部品　*33*
汎用 TC を構成する大物部品　*32*
発熱量　*168*
平行度　*185*
平面度　*185*
変位基準設計　*38*
変形加工　*1*
ヘリカルベベルギア　*113*
ヘリカル補間　*102*
比較測定法　*142*
品質保証設計　*215*
平削り盤　*9*
比切削抵抗　*173*
非真円軸受　*60*
補間機能　*93, 102*
補強構造要素　*50*
本体構造　*48*
本体構造の構成材料　*49*
ホローシャンク　*147*
保　守　*6*
補助機能　*104*
付加製造　*1, 116*
負荷運転試験　*185*
複合工作機械　*5*
複合マシニングセンタ　*10*
複合ターニングセンタ　*111*
ふく射　*175*
フライス盤　*9*
フレキシブル加工セル　*225*
フレキシブル加工セルの加工機能　*227*
フレキシブル・コンピュータ統合生産体制　*224*
フレキシブル生産セル　*24, 225*
フレキシブル生産システム　*22, 23, 224*
フレキシブルトランスファライン　*15*
フリクションドライブ　*94*
普通工作機械　*15*
評価試験　*185*
表面粗さのインプロセス計測　*145*

〖*I*〗

ICT　*22*
IMS　*24*
移動距離　*93*
移動速度　*93*
一個物生産用フレキシブル加工セル　*230*
鋳物砂落し　*53*
インナーモジュレーション　*172*
インパルス応答法　*178*
インペラ　*113*
インプロセス計測　*126, 128*
インプロセス計測の信頼性　*135*
位　相　*171*
位置決め　*3*
位置決め運動　*12*
1 自由度の振動系　*179*
一致度　*185*

〖*J*〗

JIS　*185*

〖*K*〗

階層方式異機種モジュラ構成　*86*
回転誤差　*169*
回転角度検出器　*96*
回転駆動機構　*98*
回転精度　*185*
回転テーブル　*112*

回転運動　3, 8, 93
回転運動誤差　176
回転運動軸　99
加工機能集積形　227
加工コストの削減　202
加工空間の連環　210, 222
加工能率　4
加工プロセスの
　シミュレーション　119
加工精度　4
加工速度　4
環境負荷　7
干　渉　121
カスタムマクロ　93
形削り盤　9
傾き誤差　169, 176
過渡応答振動　178
カッターパス　103
軽量化　41
計測機能　93
計測システム　129
傾斜誤差運動　187
研削盤　9
研削センタ　29, 125
経済性　6
形状誤差　167
形状創成機能　12
形状創成運動　45
形状・寸法の
　インプロセス計測　141
基本構造要素　31
基本モジュール　84
幾何学的精度　166, 168
幾何学的適応制御　119, 140
機械の骨格　31
機能試験　185
金属除去率　5
切りくず破断　219
切りくず形態の
　インプロセス計測　160
切りくずの再生利用　217
機上計測　126
基準面　176
基準寸法　77
高圧切削剤　219
高減衰能　41
工具補正機能　93, 107
工具機能　104
工具軌跡　103
工具損耗　152
工具損耗の
　インプロセス計測　152
工具座　214
工具材料　26
工具寿命　152
工業デザイン　54
鋼板溶接構造　48
コンクリート構造　48
高能率　166
コンプライアンス　171
コンピュータ援用生産　91
コンピュータ援用設計　91
コンピュータ統合生産　224
コンピュータ統合生産システム
　24
コピーマシン　91
転がり案内　73
工作物・工具取付け状態の
　インプロセス計測　148
工作機械　3
工作機械工学　2
工作機械の本体構造設計　36
工作機械の経済性評価　190
工作機械の形状創成運動　58
工作機械の結合部問題　85
工作機械の基本的な構造構成
　30
工作機械の機能記述　45
工作機械の記述方法　86
工作機械のモジュラ構成　82
工作機械のリトロフィット
　191
工作機械の専門領域　222
工作精度検査　189
高精度　166
高精度化　43
高静剛性　41
高精密工作機械　15
拘束形適応制御　119
高速性　43
固定サイクル　93, 104
工程設計　198
好適化　45
駆動機構　21
クイル形主軸　215
空気静圧軸受　114
組立コスト　202
組み立て精度　166
クランク機構　17
クローズド・ループ方式
　21, 95
草の根的なノウハウ　37
口開き　213
極座標補間　102
強制振動　172
共振周波数　171, 179

〖M〗

MC　33, 126
MDI　108
MIT　20
MRP　229
MRR　5
曲げ荷重　50
マイクロメータ　189
摩擦駆動　94
増分値方式　103
マシニングセンタ　5, 10, 21
マザーマシン　2

三つの案内精度 *75*
モジュラ方式コレットチャック *211*
モジュラ工具 *204*
モジュラ構成の経済性 *191*
モジュラ構成の四原則 *85*
無負荷運転試験 *185*
無人搬送車 *23*

〖*N*〗

NC *8*
NC 工作機械 *8*
NC プログラミング *103*
NC プログラム *92*
NC 制御装置 *21*
NURBS *103*
流れ形切りくず *218*
内部熱源 *175*
中ぐり盤 *9*
ならい制御工作機械 *90*
ナローガイドの原則 *75*
熱膨張係数 *174*
熱伝導 *175*
熱伝達 *175*
熱電対 *184*
熱 源 *175*
熱剛性 *5*
熱変形 *5, 114, 121, 175, 181, 184*
熱変形補償システム *164*
熱変形量 *168*
熱変形試験 *188*
熱変形低減策 *51*
熱慣性 *49*
熱的安定性の自己制御機能 *57*
ねじり荷重 *50*
逃げ面摩耗 *152*
日本工業規格 *185*
二重壁構造 *52*
能 率 *5*
ニューラルネットワーク *184*

〖*O*〗

オーバシュート *170*
送 り *3*
送り分力 *130*
送り機能 *104*
送り駆動系 *77*
送り指令 *93*
送り運動 *12*
大物部品 *31*
大物部品の結合部 *31*
オープン・ループ方式 *21*
オートコリメータ *176*
往復台 *19*
親ねじ *19*

〖*P*〗

PM *6*
パラレルリンク形 MC *126*
パルスモータ *21*
ピッチング *75*
ポストプロセッサ *109*
ポストプロセス計測 *126*
ポジティブストップ *148*
プラットフォーム方式 *87, 88, 214, 220*
プログラム *91*

〖*R*〗

レーザ干渉計 *176*
レーザ計測装置 *117*
レジンコンクリート構造 *48*
リマニュファクチャリング *217*
リマニュファクチャリング向けの工作機械 *220*
リニアガイド *74*
リニアモータ *97*
リニアスケール *96*
輪郭切削 *107*
立方晶窒化ほう素砥石車 *136*
ローリング *75*
ロストモーション *97, 170*
ロータリーエンコーダ *96*

〖*S*〗

Schenk の式 *62*
self-holding 形 *71*
self-releasing 形 *71*
サーボ機構 *93, 94*
サーボモータ *21*
サーボモータの振動階級 *66*
サーボモータの定格トルク *65*
最小領域円 *188*
最小設定単位 *93*
最適化適応制御 *119, 152*
産業革命 *17*
三面合せ加工の禁止 *77*
三面拘束 *76*
3+2 軸制御加工 *110*
三次元測定器 *117*
三次元測定機 *127*
三重チューブ状閉鎖断面ヘッド *58*
静圧案内 *73*
静圧軸受 *59*
精 度 *4*
静剛性 *4, 40, 170*
制御軸 *93*
製品の階層構造 *222*
製品の生産モルフォロジー *216*
製品設計の流れ *30*

精密工作機械　*15*
生産文化論　*56*
生産モルフォロジー　*216, 222*
静的精度試験　*185*
制約形適応制御　*119, 129*
セミクローズド・ループ方式　*21, 95*
旋　盤　*9*
旋盤用主軸端　*70*
せん断力感知用圧電トランスデューサ　*155*
せん断力用検出子　*132*
センサ・フュージョン　*135*
センサに要求される基本的な特性　*130*
センサの出力信号　*135*
専用工作機械　*14*
セルフロック機能　*98*
セル構造　*51, 52*
切削（研削）運動　*3, 12*
切削・研削抵抗の測定方法　*153*
切削工具の革新　*203*
切削抵抗の動的成分　*160*
切削抵抗の合力と三分力　*130*
切削抵抗の静的成分と動的成分　*138*
接合加工　*1*
シーケンス番号　*104*
シーケンス制御部　*92*
振動モード　*180*
真円度　*167, 188*
真円度測定器　*189*
信頼性　*5*
真直度　*167, 175, 185*
真直度誤差　*169*
資材計画　*229*
ソフトワイヤード制御装置　*21*
速　度　*4*
速度検出器　*96*
速度線図　*68*
操作性　*6*
双柱形単コラム　*52*
すべり案内　*73*
すべり案内面の材質　*80*
すべり軸受　*59*
水晶圧電形荷重検出セル　*130, 154*
水晶圧電トランスデューサ　*137*
水晶の電気軸　*131*
水準器　*176*
スカイビング加工　*114*
すくい面摩耗　*152*
スマート工場　*229*
スプライン補間　*103*
スラントベッド　*218*
スラスト荷重の支持方法　*61*
3D プリンティング　*1*
捨て掴み代　*202*
数値計算流体力学　*36*
数値制御　*5, 90*
数値制御工作機械　*8, 20*
省エネルギー　*7*
象限突起　*170*
小品種多量生産　*14*
衝突チェック　*121*
主分力　*130*
周波数変調　*132*
周波数応答　*171*
主軸回転数　*174*
主軸機能　*104*
主軸構造および主軸受　*62*
主軸駆動系　*64*
主軸の曲げ静剛性　*62*
主軸最大許容トルク　*61, 67*
主軸制御機能　*93*
主軸ユニット　*59*

〖*T*〗

TC　*32*
多品種少量生産　*14*
対話形プログラミング　*92*
対話形自動プログラミング機能　*108*
ターカイト　*81*
タコジェネレータ　*96*
ターニングセンタ　*5, 10*
単結晶ダイヤモンド工具　*114*
端面誤差運動　*187*
単能工作機械　*14*
単軸自動盤　*14*
タレット刃物台　*214*
立　形　*11*
タッチプローブ　*117*
タッチセンサ　*143*
多軸自動盤　*14*
多自由度の振動系　*179*
定寸装置　*142*
適応制御　*117*
転倒モーメント最小化　*75, 77*
テーパ　*70*
手仕上げ作業　*223*
テストバー　*175*
ティルティング主軸　*113*
ティルティングテーブル　*112*
知能化工作機械　*123*
知能化生産システム　*24*
砥石車周辺の空気流　*36*
特殊専用工作機械　*14*
トラクションドライブ　*94*
トラニオン形式　*112*
トランスファライン　*15*
トランスファセンタ　*228*
等距離度　*185*
トレーサ　*91*
トータルエンクロージャ　*32, 54*

爪チャックの工作物把握状態 *149*
積木式構成法 *83*
直角度 *185*
直線補間 *102*
直線運動 *3, 8, 93*
直線運動軸 *99*
直定規 *175*
超音波センサ・フュージョン *137*
超精密5軸加工機 *114*
超精密工作機械 *15, 25, 59*
中品種中量生産 *14*
中古機械のリトロフィット *219*
鋳造構造 *48*

〖U〗

ウエイベアリング *75*
ウィルキンソンの中ぐり盤 *18*
受入れ試験 *185*
運動誤差 *168*
運動精度 *166, 168*
運動制御軸 *99*
ウォーム・ウォームラック方式 *78*
ウォーム歯車 *98*
薄肉構造 *50*
薄肉軸受 *64*

〖V〗

V-V転がり案内 *114*

〖W〗

割 歩 *196*

〖Y〗

予防保全 *6*
予防保全設計 *215*
ヨーイング *75*
横 形 *11*
溶融加工 *1*
有限要素法 *54, 178*
ユニット方式 *86*
ユーザ支援技術 *211*
ユーザ支援体制 *207*

〖Z〗

在来形工作機械の構造設計 *34*
材料取り *223*
絶対値方式 *103*
自動盤 *90*
自動盤の経済性 *192*
自動工具交換装置 *21, 126*
自動プログラミングシステム *109*
軸方向誤差 *169, 176*
軸方向誤差運動 *187*
人工知能 *22, 123*
自励振動 *172, 173*
情報通信技術 *22*
除去加工 *1*
ジョンソン方式 *82*
柔軟性 *5, 48, 82*
準備機能 *104*
重切削性 *43*

―― 著 者 略 歴 ――

伊東　誼（いとう　よしみ）

1962 年　東京工業大学理工学部機械工学課程卒業
1962 年　株式会社池貝鉄工勤務
1964 年　東京工業大学に奉職，助手，助教授を歴任
1984 年　東京工業大学教授
2000 年　定年退官，名誉教授，日本機械学会会長，日本工学アカデミー副会長を歴任

森脇俊道（もりわき　としみち）

1968 年　京都大学大学院工学研究科修士課程修了（精密工学専攻）
1968 年　神戸大学に奉職，助手，助教授を歴任
1985 年　神戸大学教授
2007 年　神戸大学名誉教授，摂南大学教授
2016 年　摂南大学名誉教授，同客員教授，学事顧問

新版　工作機械工学

Machine Tool Engineering（New Edition）

© Yoshimi Ito, Toshimichi Moriwaki 1989, 2019

1989 年 9 月 20 日　初版第 1 刷発行
2004 年 4 月 2 日　初版第 13 刷発行（改訂版）
2016 年 9 月 30 日　初版第 20 刷発行（改訂版）
2019 年 7 月 25 日　新版第 1 刷発行

検印省略

著　者　伊東　誼
　　森脇　俊道
発行者　株式会社　コロナ社
　　代表者　牛来真也
印刷所　美研プリンティング株式会社
製本所　牧製本印刷株式会社

112-0011　東京都文京区千石 4-46-10
発行所　株式会社　**コロナ社**
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan
振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)
ホームページ　http://www.coronasha.co.jp

ISBN 978-4-339-04103-3　C3353　Printed in Japan　（齋藤）

JCOPY　<出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は，そのつど事前に，出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088，FAX 03-5244-5089，e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー，スキャン，デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は，いかなる場合も認めていません。
落丁・乱丁はお取替えいたします。