2026 年　工作機械検定　2 級　ヒント集

目次

			頁
1		工作機械とその重要性	4
2		工作機械の定義	4
3		工作機械の歴史	5
4		世界の工作機械産業と生産	6
5		日本の工作機械受注と NC 工作機械生産	8
	5-1	工作機械受注	8
	5-2	工作機械受注推移	9
	5-3	日本の NC 工作機械生産	10
6		工作機械の一般基本事項	11
	6-1	工作機械の基本構造	11
	6-2	切削工具	12
	6-3	工作機械の送り	12
	6-4	工作機械の案内面	13
	6-5	工作機械の主軸回転速度	14
	6-6	主軸出力とトルク	15
	6-7	金属切削加工	18
	6-8	工業デザイン	18
	6-9	工作機械で使用する電源	19
	6-10	きさげ加工	21
	6-11	工作機械の輸出管理	24
	6-12	日本国際工作機械見本市（JIMTOF）	24
	6-13	ピクトグラム	25
	6-14	主な加工方法	26
		（1）　旋削加工	26
		（2）　ドリル加工	26
		（3）　中ぐり加工	26
		（4）　フライス加工	26
		（5）　歯車加工	27
		（6）　研削加工	27

目次　　頁

(7)　放電加工　29
(8)　レーザ加工　29
(9)　ウォータジェット加工　29
6-15　工作機械の剛性　29
7　代表的な工作機械の種類　31
7-1　旋盤　32
7-2　ボール盤　35
7-3　中ぐり盤　35
7-4　フライス盤　37
7-5　金切りのこ盤　43
7-6　形削り盤・立削り盤・平削り盤　44
7-7　歯車加工工作機械　47
(1)ホブ盤による歯車加工(創成法)　47
(2)フライス盤による歯車加工(成形法)　48
(3)ギア・シェイバーによる歯車加工　49
7-8　研削盤　50
(1)　平面研削盤　50
(2)　円筒研削盤　50
(3)　内面研削盤　52
(4)　歯車研削盤　52
7－9　NC 工作機械　54
(1)　NC工作機械の制御概要　54
(2)　NC工作機械の座標系　58
(3)　NC旋盤　59
(4)　マシニングセンタ　61
(5)　5 面加工機　65
(6)　ターニングセンタ　66
(7)　5 軸複合加工機　68
(8)　放電加工機　72
(9)　レーザ加工機　74
(10)　ウォータジェット加工　78
(11)　積層造形　79
(12)　工作機械周辺装置　81
(13)　生産システム　82

8.		NC工作機械のプログラム概要	84
	8－1	座標とNCプログラム	84
	8－2	NCプログラム	86
	8-2-1	マニュアルプログラム	86
	8-2-2	自動プログラム	89

一般社団法人
日本工作機械工業会

1．工作機械とその重要性

私たちの身近にあるスマートフォンや時計などの精密機器、自動車や航空機、船などの輸送機器、人工骨や人工関節といった生体材料に至るまで、金属を材料とする製品はあらゆる分野に存在しています。

これらを構成する部品は、主として素材を削ったり、穴をあけたり（切削加工）して作られるか、切削加工で仕上がった金型（注）によって作られます。このような加工を行う機械を「工作機械」といい、モノづくりのための機械としてさまざまな製品の一部を作りだし、私たちの生活を支えています。工作機械は金属に限らず、セラミックス、ガラスといった非金属も加工できます。

精密で複雑な部品を正確かつ効率的に作ることが工作機械の役割です。全ての機械部品は工作機械を通じて作られていることから、工作機械は「機械を作る機械」「マザーマシン（母なる機械）」ともいわれています。

工作機械には、母親の性質が子どもに伝わるように、工作機械（母）が生み出す部品（子）に、工作機械（母）の性質が移されるという「母性原理」があります。つまり、同じ機械で繰り返し部品を作っても「工作機械によって作られた部品は、その部品が作られた工作機械の精度を超えることはできない」という原理が成り立つので、同じ精度の部品を作ることができるのです。

工作機械は国の産業を形成する基幹産業です。昔から「工作機械産業の力が、その国家の産業技術力を示す」と言われます。

（注）

金型：金属で製作した上下一対の構造からなる型枠の総称で、 溶けた金属や樹脂等材料を流し込み同じ形状に成形する型や、荷重をかけて素材を変形させ形状を転写する型などがあります。

2．工作機械の定義

工作機械は日本産業規格(JIS)では「主として金属の工作物を、切削、研削などによって、又は電気、その他のエネルギーを利用して不要な部分を取り除き、所要の形状に作り上げる機械。ただし、使用中機械を手で保持したり、マグネットスタンド等によって固定するものを除く。狭義であることを特に強調するときには、金属切削工作機械と表現することもある。」と定義づけています。

このように日本では、主に金属の不要な部分を削りとって所要の形状に作り上げる機械を工作機械と定義し、日曜大工などで使う手持ち式電動ドリルやグラインダーなどは工作機械に含めていません。

3. 工作機械の歴史

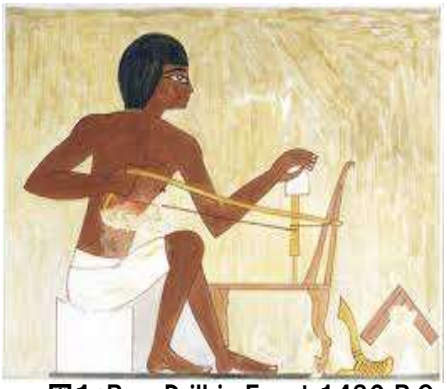


図1：Bow Drill in Egypt 1480 B.C

工作機械の起源は古代エジプトにさかのぼります。エジプトの壁画には、ドリルの柄に弓の弦を巻き付け、弓を前後に動かしてドリルを回転させる工作機械の一種である「弓錐（ゆみぎり）」が描かれています。これが、ボール盤の最古の例で、この弓駆動方式はのちに旋盤にも応用されています。

その後、切削のための装置は足踏み式から機械仕掛けによるものへと進化し、16 世紀以降は金属加工のため、構造に金属材料が使われるようになりました。そして、大型機では水車、馬力や蒸気による駆動方法が現れ、産業革命の推進力となったワットの蒸気機関の実用化に貢献しました。

18 世紀末、近代的な工業生産財としての鋳鉄製工作機械がフランスで発明され、特色ある工作機械が欧米諸国で次々と開発されるようになる中で、モータが19世紀の終わりに発明され、20世紀初め工作機械はモータで駆動されるようになりました。

さて、日本における工作機械の歴史ですが、ペリー来航後、国防意識を高めた徳川幕府はオランダ人の意見を聞き入れ、洋式造船・造機技術を導入するため日本の技師や職人らに機械加工法を習得させます。1856 年に幕府はオランダ蒸気船会社（NSBM）製工作機械を、長崎海軍傅習所の「轆轤（ろくろ）盤細工所」へ納入しました。これが日本で初めて複数台の工作機械を輸入した事例です。

日本で作られた初期の工作機械は、東芝の前身である民間最初の機械類製造工場「田中製造所」出身の伊藤嘉平治と池貝庄太郎の 2 人が開発したとされています。1875 年（明治 8 年）に伊藤嘉平治は全鍛鉄製足踏旋盤を、1889 年（明治 22 年）に池貝庄太郎は池貝の前身である池貝工場の自社設備として英式 9 フィート手回し式旋盤を作りました。この旋盤は日本の工作機械メーカーが作った現存する最古の工作機械です。

図 2：全鍛鉄製足踏旋盤

図 3：英式 9 フィート手回し式旋盤

明治後半から国産工作機械は数多く作られましたが、多くの需要は外国製に依存し、第一次世界大戦や太平洋戦争期を除いて、この傾向に変化はありませんでした。

太平洋戦争後の 1949 年、工作機械の輸入が再開され、業界では産学共同による外国製工作機械の性能分析や政府の試作補助金を活用した製品開発が行われました。そして、性能・品質の向上に努めるとともに、欧米を中心とした海外メーカーとの技術提携により技術導入を行うことで、工作機械の技術力向上を図りました。

また、工作機械の主要顧客産業であり、品質に厳しい目を持つ日本の自動車メーカーは、戦後まもなくの頃から、必要な国産工作機械を購入して欠点を指摘し、工作機械メーカーもその高い要求に答えることで育てられました。このことは今日に至るまで続き、日本の工作機械産業の強みとなっています。

さて、工作機械技術の大きな変革は、1952 年米国マサチューセッツ工科大学（MIT）でコンピューターによる自動化技術、数値制御（NC）技術が開発されたことです。この技術の重要性をいち早く認識した日本は、技術の獲得を目指して即座に開発に着手し、1956 年 NC 装置を開発し、鍛圧機械の一種で板金の打ち抜き加工によく使用されるタレットパンチプレス機のNC制御試作機が完成しました。

20 世紀半ば、米国製 NC 工作機械は軍需、宇宙・航空機産業向けを中心とした大型高級機でしたが、日本製NC工作機械は中小製造業など一般ユーザー向けに開発されました。特に 1970 年代のオイルショックを機に省力化が進み、国内外における日本製 NC 工作機械の導入は大きく進展しました。

NC技術の進歩はその後、一度の部品取り付けで角物工作物を全て自動加工できるマシニングセンタや丸物工作物を加工できるターニングセンタ、さらに 1 台でマシニングセンタとターニングセンタの機能を持つ複合加工機を生みました。

今日ではNC工作機械のインターネット対応も進んでいます。IoT（モノのインターネット）により、工作機械本体に搭載された NC 装置やセンサーから得られたデータを活用し、機械本体や生産現場の「見える化」を可能にしています。

4. 世界の工作機械産業と生産

工作機械は製品により求められる加工水準が異なります。一般に宇宙・航空、医療関連などの分野では関連部品は高級機（ハイエンド機で機械の付加価値や価格が最高のレベルのもの。）によって加工され、産業機械、自動車、電機、電子部品などの部品加工には主に中級機（ミドルレンジ機）が使われます。

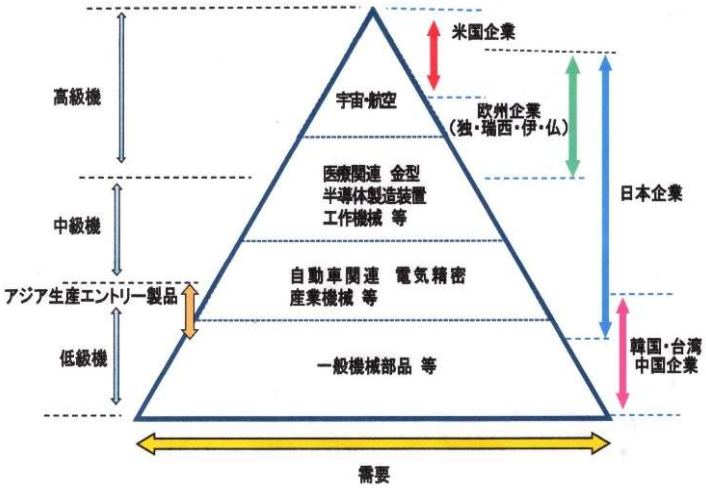


図4：主要工作機械生産国の国際的位置づけのイメージ

そして、それほどの精度を必要としない一般部品加工には低級機（ローエンド機）が使用されます。

世界各地域の顧客産業と主要国の工作機械メーカーが生産している工作機械の傾向から見ると、高級機・中級機は主にドイツ、スイス、日本、イタリアなどが主に手掛けており、中級機から低級機は台湾、韓国、中国、インドなどが生産しているとの見方がされていますが、中級・低級機の生産国でも個社単位でみれば、高付加価値機械の生産を手掛け、高い競争力を有する企業も存在しています。また、一部の欧州や日本の工作機械メーカーでは、中級機と低級機の間の新興市場向けのエントリー機種（廉価版）を、アジアを中心に中国、台湾、インドなどで手掛けています。

世界の工作機械生産は米国 Gardner Intelligence 社が毎年集計発行する"World Machine Tool Survey"で知ることができます。日本では工作機械というと金属切削工作機械を指しますが、この報告書は切削機と成形機（プレス機械）を合算して工作機械としてまとめた統計を公表しています。（表1）

日本の工作機械（切削型）生産額は 1982 年から 2008 年まで 27 年間連続世界第 1 位でした。しかし、2009 年は 2008 年後半からのリーマンショックによる景気減速の影響を大きく受け、中国、ドイツに続く第 3 位にとどまりました。その後、中国を中心とした新興国の旺盛な設備投資に支えられ、2010 年はドイツを抜き第 2 位に回復しました。以来、中国が 1 位、次いで生産額が拮抗する日本とドイツが 2 位と 3 位を占めています。

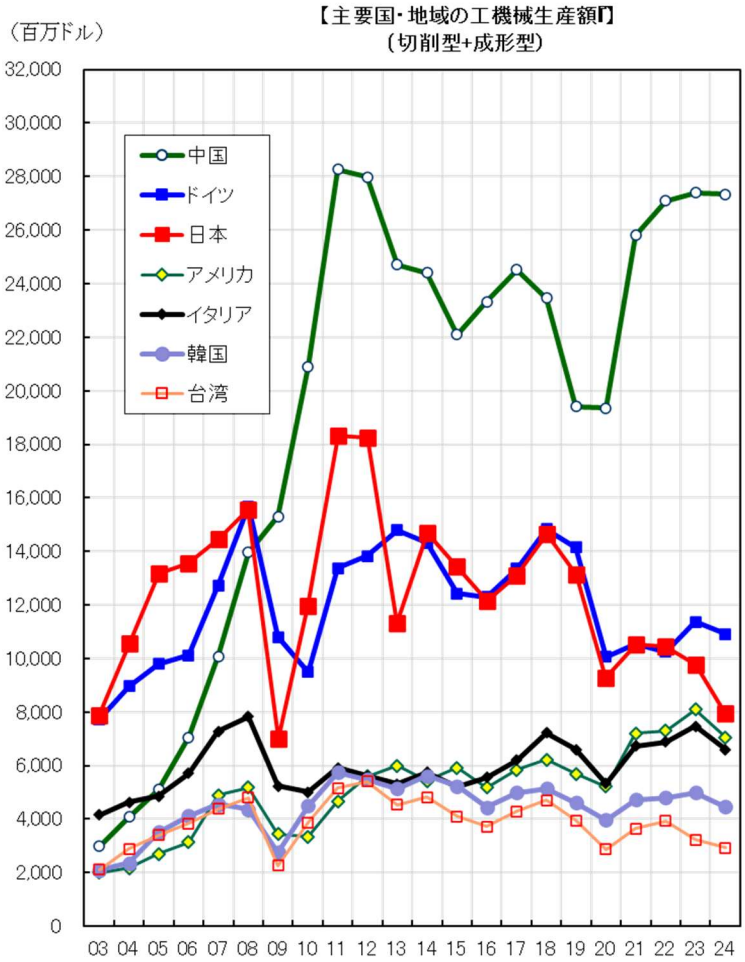


表1：主要国・地域の金属工作機械（切削・成形）生産額推移
（単位：百万ドル、2024 年は見込み額）
GARDNER INTELLEGENCE 資料より日工会作成

2024 年版の統計（表1）によれば、2024 年（見込み）の日本の生産額は、自動車や半導体関連の設備投資鈍化による需要低下や円安の影響にもあり、ドイツとの差が開き、3 位と報告されています。

※2025 年生産額は 26 年 8 月時点で未公表

2024年工作機械 （切削+成形）
世界消費合計額：80,029百万ドル
国・地域　消費額シェア

（%）

中国	30.8
アメリカ	14.8
ドイツ	6.6
インド	4.5
イタリア	4.2
日本	3.6
韓国	3.6
メキシコ	3.2
トルコ	2.4
カナダ	2.0
その他 （44カ国・地域）	24.3

表 2 は 2024 年の世界の切削型･成形型を含む工作機械消費額シェアをまとめたものです。
2024 年の工作機械消費額約 800 億ドルのうち、上位 10 カ国で 3/4 を占めていることが分かります。

表 2: 2024 年金属工作機械（切削･成形型）世界消費額シェア
GARDNER INTELLEGENCE 資料より作成

5. 日本の工作機械受注とNC 工作機械生産

5－1 工作機械受注

一般に製造業が増産を行うには機械を購入して準備（設備投資）しなければならないため、機械の受注は企業の実際の設備投資に一定の先行性を持っているとされています。

内閣府の「機械受注統計調査」は主要機械等製造業者 280 社をベースに、設備用機械類の受注（外需と内需を合計）状況を調査し、公表しています。
毎月実施される実績調査は、2ヶ月後の中旬に発表され、官庁統計の代表的な景気の先行指標としてよく知られています。

一方、（一社）日本工作機械工業会が、会員企業の内外需の受注額を別々に集計した「工作機械受注統計」は、グローバル市場におけるあらゆる産業の設備投資動向をあらわし、個人消費といった景気指標に先行した動きを示します。

この統計は前月の受注額を速報と確報として翌月発表しています。翌々月公表する内閣府の「機械受注統計調査」に比べ早期に市況を把握できることから、設備投資の動向を最も早く表す指標と位置付けられています。

また、「工作機械受注統計調査」の外需額と財務省「貿易統計」の輸出額の関係では、貿易統計には新しく作られた工作機械の他に、中古工作機械の輸出額が計上されています。これに対し工作機械受注統計の外需額は発表前月の受注額です。従って、実際に輸出されるのは機械完成後輸出関連手続きが完了してからになるため「貿易統計」には数か月後計上されます。

5－2 工作機械受注推移

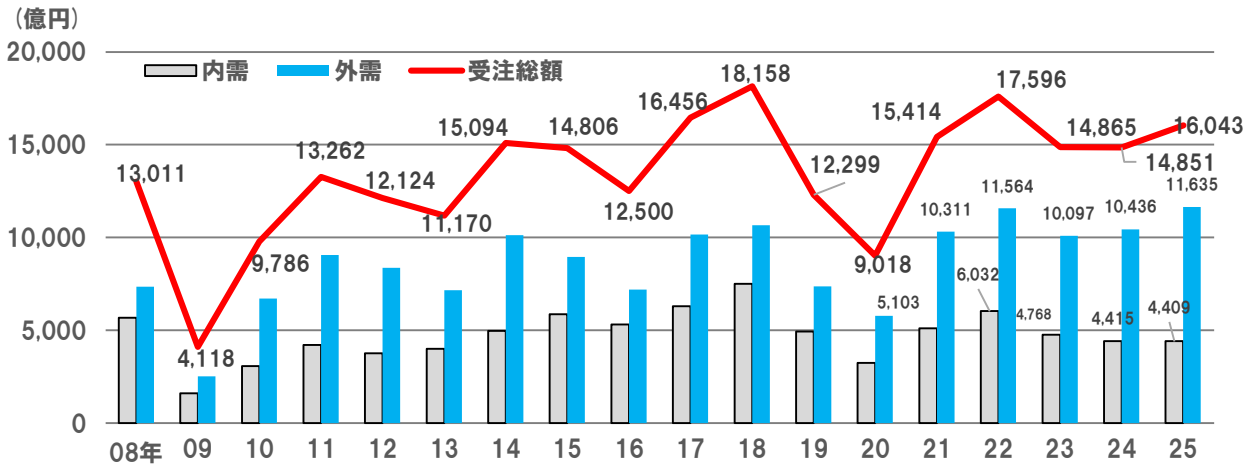


表 3:工作機械受注額の推移　出所:(一社)日本工作機械工業会

年	受注額変化の背景
2009 年～2011 年	2008 年 9 月に起きたリーマン・ブラザーズ破綻が引き金となった世界的金融危機と不況を受け、2009 年受注額は前年比約 6 5 %減少し約 30 年前の水準にまで受注額が激減。一方、スマートフォンの筐体加工やその関連電子機器の加工用機械の受注が回復の足掛かりとなり、2011 年にはリーマン前とほぼ同水準まで回復。
2013 年～2015 年	内需はアベノミクスによる円高・株安の是正が進み企業収益改善。また補助金や税制優遇などの政策支援で設備投資が活発化し、受注増加。 2014 年には EMS 関連の投資で電子機器向けの加工機などで旺盛な受注が中国を中心としたアジアで増加、外需額で初の受注額 1 兆円超え。
2016 年	円高の進行、英国の EU 離脱決定やスマホ関連需要の剥落、中国経済の成長鈍化、国内における補助金の採択待ちなどにより、内外需ともに減少し調整局面となる。
2017 年～2018 年	需要の牽引役である自動車産業に加え、東京オリンピック・パラリンピック関連インフラ投資、建設機械、ロボット、航空機、風力発電機等、様々な業種で設備投資が内外需ともに増加した。受注額は 2 年連続史上最高額を更新。 また、自動車産業も従来の基幹部品に加え、CASE や MaaS 対応を見据えて、車載電池、モータ、半導体、電子部品など様々な関連加工の需要が増加。

年	受注額変化の背景
2019 年～2021 年	2019 年は米中貿易摩擦の先鋭化、半導体の在庫調整、自動車の投資抑制により受注は後退局面にあったが、さらに 2020 年は新型コロナウイルス感染拡大の影響で、世界的に経済活動が停滞、10 年ぶりに受注は 1 兆円を下回る。2021 年は新型コロナの影響から中国がいち早く立ち直り、それまで止まっていた設備投資は、年後半には世界各地域で半導体関連、自動車、航空機、といった主要業種で増勢に転じ受注は 3 年ぶりに増加に転じる。
2022 年	コロナ禍からの景気回復で押さえられていた需要が表面化、DX、環境、自動化、生産拠点再構築等の関連事業で設備投資が進み、受注額は 1 兆 7,596 億円で史上 2 番目を記録。
2023 年～2024 年	コロナ禍でのペントアップ需要（一時的な要因で消費や投資が抑えられた結果、後に一気に爆発的な需要として表れる現象）の一巡、半導体関連投資の停滞、EV 関連投資の鈍化などにより、高水準を維持しつつも足踏み状態が続いた。
2025～2026 年	中国の EV 関連投資、、自動車、半導体、データセンター関連重要、航空機、防衛公安関連などの投資増加により受注は増勢基調。

5－3　日本の NC 工作機械生産

日本の工作機械メーカーは、高性能でコンパクトにまとまった中小型 NC 工作機械を主力に開発し、「価格が安く、品質は良く、短納期でサービスも良い」という高い評判を得て、汎用NC工作機械(注)という、新しいカテゴリーをつくり NC 工作機械は急速に普及しました。

注：特定の用途に特化せず、「どのような加工にも使える NC 工作機械」の意味

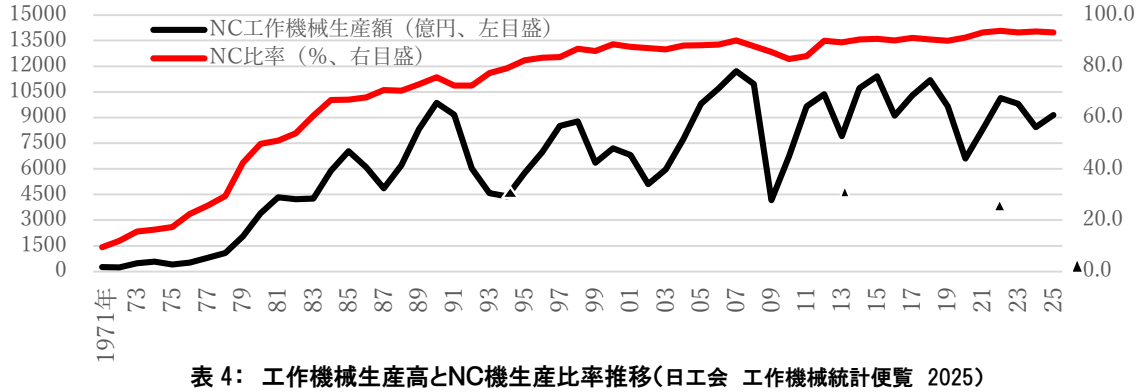


表 4：　工作機械生産高とNC機生産比率推移（日工会　工作機械統計便覧　2025）

そしてメーカーの積極的な海外展開の結果、NC旋盤とマシニングセンタを中心に工作機械輸出比率は 1980年には 39.5%（このうち欧米輸出分は 53.4%）に達しました。工作機械生産額も 1982 年には、当時世界最大の工作機械生産国であった米国を抜き世界一位となり、生産高の 53.9%がNC工作機械になりました。

その後、高精度加工の需要増を背景に 80 年代～90 年代にかけて、NC 工作機械の生産比率は上昇を続け 2000 年には9割の水準に達しました。2000 年以降その比

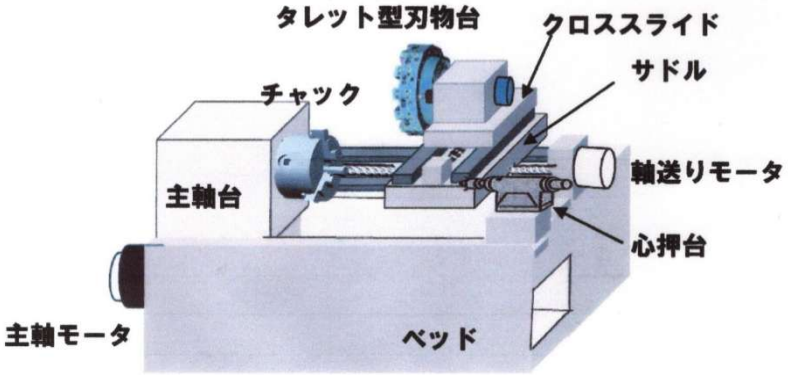
率は、年によって増減はあるものの概ね 9 割水準で推移しています。複合加工機や 5 軸制御マシニングセンタなど高度な加工を行う工作機械が普及している一方で、NC を必要としない加工需要も一定程度存在しています。

6. 工作機械の一般基本事項

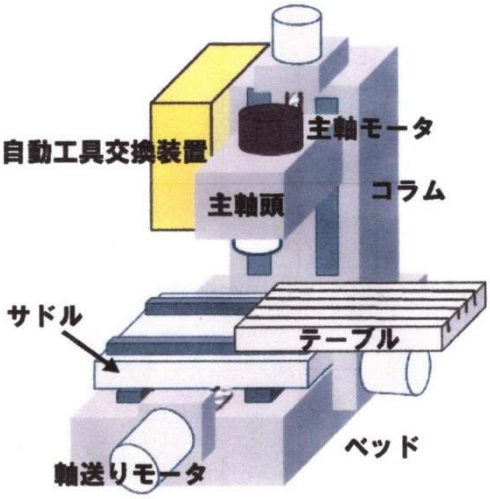
6－1 工作機械の基本構造

図5は NC 旋盤とマシニングセンタを例にした工作機械の基本構造です。
工作機械の基本構造は主要構造要素と主要運動要素からなります。主要構造要素には大型鋳物であるベッドやコラムなどがあり、それらは互いにボルトで固定結合されて機械のフレームとして、以下に述べる主要運動要素の動きをしっかり支え、運動の基準となります。この機械フレームは工作機械の「母性原理」を実現する上で重要な役割を果たしています。

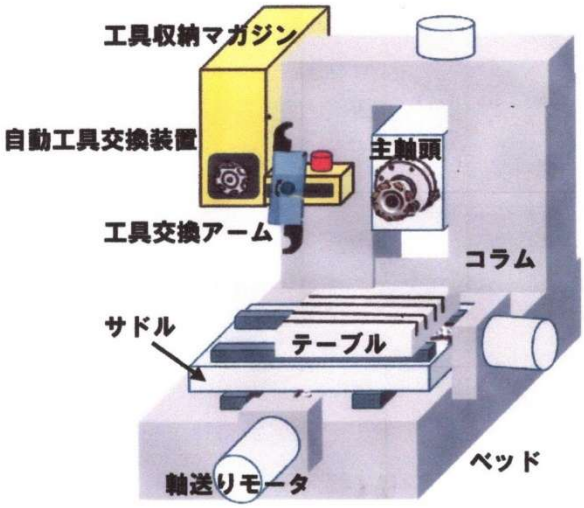
注：運動とは加工のために工作物や工具を動かすための動きです。



NC旋盤の基本構造



立て形マシニングセンタの基本構造



横形マシニングセンタの基本構造

図 5：NC旋盤と立て形・横形マシニングセンタ　基本構造

次に、主要運動要素には直進運動するテーブル、サドルや主軸頭などがあります。また回転運動するものには回転テーブルや主軸があります。

これらは切削により発生する抵抗力、振動や自重に抗して正確な運動を行い、切削工具と工作物が高い精度で相対運動できるよう大変重要な役割を果たしています。

6－2 切削工具

私たちが日常生活で使用する包丁、ナイフやカッターは総称して「刃物」と言われますが、 木材や金属を削るために使用される刃物は「切削工具」と呼ばれます。木工さんが使うノコギリ、カンナやのみも「切削工具」の一種です。

一方、工作機械に取付けて金属を削るために使用される切削工具には、穴をあけるための「ドリル」、開けられた穴の精度を向上し、表面仕上げする「リーマ」、穴を広げて精度よく寸法出しをする「中ぐりバー」、丸棒を削るための「バイト」、平面を削るための「正面フライス」、 溝や側面を削るための「エンドミル」などがあります。また、精密な部品に仕上げるための砥石も切削工具に含まれます。

色々な種類の工作機械が開発されてきたなかで、それぞれの工作機械に適応した切削工具が作られてきました。また、切削工具の性能向上に伴い、工作機械も進歩してきたように、工作機械と切削工具とは緊密な関係にあります。

バイト

ドリル

中ぐりバー

リーマ

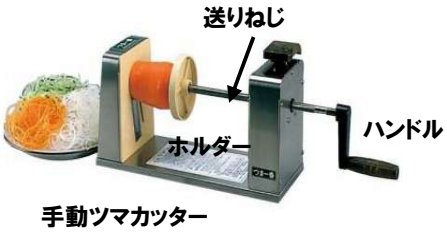
正面フライス

エンドミル

研削砥石

6－3 工作機械の送り

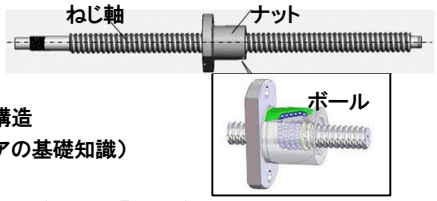
工作機械で「送り」とは、切削等の加工を切削工具または工作物を移動して進めることを言います。それは丁度右写真の野菜を千切りより薄く、細く切る「手動ツマカッター」のハンドルでねじを回してホルダーの前進により野菜を刃の方向に進めることと同じです。工作機械のほとんどの手動送り機構は手動ツマカッターと同じハンドルによるねじ送りです。　　この機構は NC 工作機械でも全く同じです。



手動ツマカッター

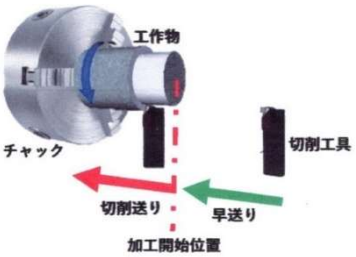
NC 工作機械の主要運動要素が NC 制御で直線移動するには、送りモータの回転を直線運動に変換する送りねじとして一般にボールねじが使われます。ボールねじは次頁図のようにねじ軸・ボール・ナットで構成され、ねじ軸が回転することによってナットが移動します。その時に中のボールも一緒に移動し、軸の溝からナットの中で循環し続けます。

ボールねじは、ねじの山とナットの間に摩擦力はほとんどなく、軽く回る精密ねじです。



ボールねじの構造
（工作機械設計エンジニアの基礎知識）

さて、工作機械の送りには工作物を切削加工するときの「切削送り」と「早送り」があります。「早送り」は、前頁「手動ツマカッター」の例では野菜を切り始めるために、ホルダーが野菜に当たる位置までハンドルで送りねじを速く回転ことに似ています。



つまり、図のような回転する工作物の加工（旋削）では、加工時間短縮のため切削工具を切削開始する位置まで迅速に移動させます。

工作機械のNC化が始まった 1958 年ごろは早送りの速度は 0.8m/min 位でしたが,1975 年頃には 12m/min と急激に高速化し、1980 年頃 15m/min に達しました。(注 1)
そして、最近ではNC旋盤で 30～40m/min、マシニングセンタで 40～50m/min が多いようです。(注 2)
量産部品加工が多いNC工作機械では切削を行わない時間は無駄になります。従って早送り速度が速いことは加工する部品数が多くなればなるほど大きな加工時間の短縮になります。

(注 1)高速化・高精度化を目指す最近のマシニングセンタ（「応用機械工学」1985 年 8 月　垣野義昭　京都大学教授）
(注 2)工作機械の最新技術動向 JIMTOF2016「機械と工具」 2017 年 5･6 月号　清水伸二　上智大名誉教授）

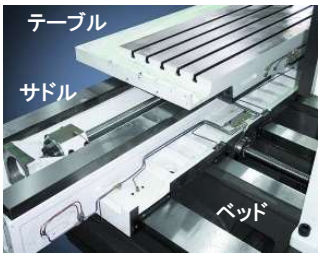
切削工具を移動させる速さを表す「送り速度」は、送り量やテーブル送りとも呼ばれます。そして、切削工具 1 刃あたりで何 mm 進むか（mm/tooth）、1 分間あたりに何 mm 進むか（mm/min）、被削材 1 回転あたりに何 mm 進むか（mm/rev）など、送り速度にはいくつかの表記方法があり単位が異なるため注意が必要です。（参照:6-7 金属切削加工 17 頁） なお、早送り速度が高速の NC 工作機械では製品カタログ等に上記のように m/min の単位で表されます。

6－4 工作機械の案内面

工作機械の構造は、6－1 工作機械の基本構造（10 頁）に述べたように、機械構造

のフレームとなる主要構造要素（ベッドやコラム）と主要運動要素（テーブルやサドル）からなります。案内面とは、主要構造要素上や側面における主要運動要素の運動、あるいは主要運動要素同士の運動が行われるレールに相当する基準軌道面のことです。この案内方式には以下のように(1)すべり案内、(2)転がり案内、(3)静圧案内の3種類があります。

(1) **すべり案内**：案内面に一定時間毎に微量な潤滑油を供給する方法と摩擦抵抗の少ないフッ素化合物の樹脂板を貼る方法があります。すべり案内は剛性・減衰性が高いことから重量のある工作物や重切削を行う大型のマシニングセンタで採用されています。



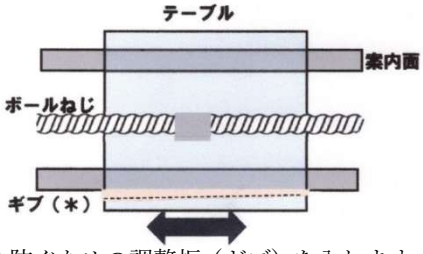
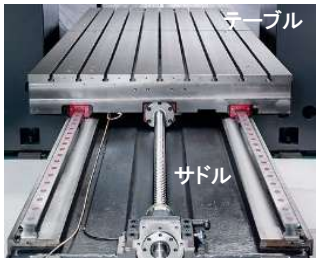


図 6：マシニングセンタのすべり案内面
（ベッドとサドル、サドルとテーブルが相対運動）

注(＊)：テーブルと案内面の間に切削力等による浮き上がりを防ぐための調整板（ギブ）を入れます。

(2) **転がり案内**：案内面に「LMガイド」や「リニアガイド」の商品名で市販される、転動体（玉やコロ）を使用する方法です。転がり案内は転動体を介するため摩擦抵抗が小さく、僅かな力で高速に運動できることが利点です。一般にすべり案内と比較して、剛性と減衰性から重量が重い工作物や切削抵抗の大きい重切削には不向きとされています。



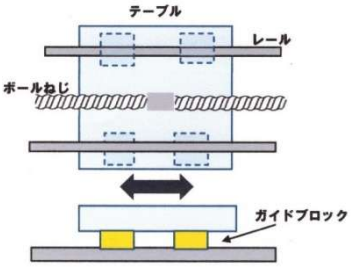


図 7：転がり案内面
（サドル上案内面をテーブルが運動）

(3) **静圧案内**：主要運動部と案内面の間に外部から潤滑油などの加圧された流体を送り込み、運動部を浮上させて支える方法で図 8 のポケット部に流体を送ります。静圧案内は運動部と案内面が非接触であるため転がり案内よりも摩擦抵抗が小さく、応答性が高く流体の粘性により減衰性も高いことが特徴です。

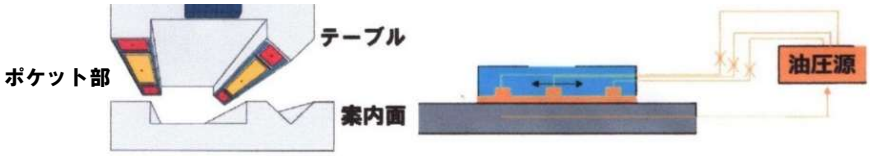


図 8：静圧案内面

6-5 工作機械の主軸回転速度

工作機械の主軸や主軸モータの回転速度を表すために使われる単位「min^{-1}」は「1分

間の回転数」を意味します。

例えば、3,000min^{-1}の主軸とは、1分間に3,000回転するという意味になります。min^{-1}はエンジンの回転数でよく使われるrpmとまったく同じ意味です。近年国際単位系（SI単位）を積極的に使っていく流れの中で工作機械では「min^{-1}」が主に使われるようになっています。

6－6 主軸出力とトルク

工作機械の「主軸」は工作物や切削工具が取り付けられモータで回転される軸（図10の赤字部）を指します。主軸を駆動するモータはNC旋盤やマシニングセンタのカタログ等に出力と回転速度が記載されています。

主軸には図10のように一端に主軸モータから駆動力が加わり、もう一端には切削力からの負荷が加わります。これら主軸をねじる力の強さがトルクです。

図9は標準的なNC工作機械の主軸モータ特性です。グラフから出力（縦軸）は回転速度（横軸）が高くなると上昇し、一定の回転速度（基底回転速度）に達すると安定します。一方、ねじりの強さを表わすトルクは回転速度が基底回転速度未満で安定し、基底回転速度を越えると徐々に減少する特性を持っていることがわかります。

NC旋盤やマシニングセンタはアルミニウムなどの柔らかい材料の高速加工や、航空機部品のように固い材料を削る重切削加工など色々な仕事に使われるため、主軸はモータから、その仕事に合った能力が出るような変速機構（図12）を介して駆動されます。

主軸能力は切削工具の選定や切削条件によりかわりますが、主軸を駆動するモータ出力(KW)と主軸を回転させる能力の大きさであるトルクが目安となります。

今、旋盤加工を例にとると、図10のように工作物を切削工具（バイト）で切り込むと、切削抗力が発生します。この力は主軸方向の送り分力、切削工具方向の背分力、工作物の接線方向の主分力に分解できます。

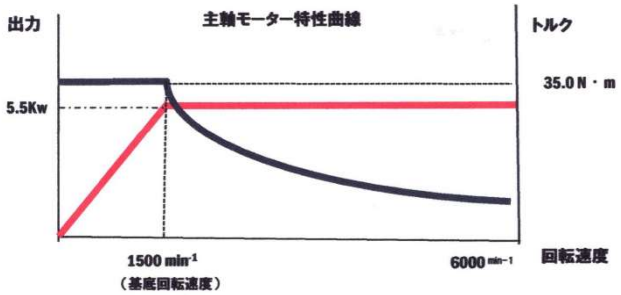


図9：主軸モータ特性

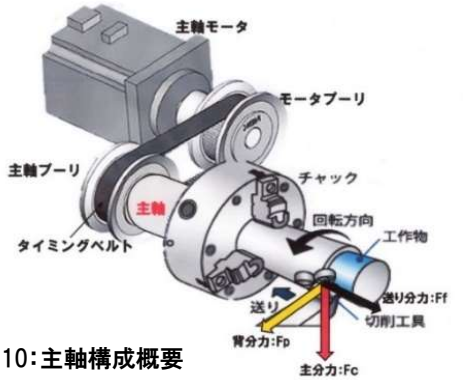


図10：主軸構成概要

この主分力に工作物の半径を掛けた値が切削で発生するトルクになります。（計算は主軸の周りの力のモーメントの計算です。） また、工作物を削るために切削工具が必要とする力である切削動力はモータ出力に関係します。切削動力は仕事率のことで、上記主分力と切削工具が工作物の円周上を毎分動いた距離を掛けた値を60秒で割

った値です。(1 秒間あたりの仕事の大きさの計算)
つまり、主軸能力は切削で発生するトルクが主軸を駆動するトルクより小さく、切削動力がモータから得られないと不足して加工できません。実際には切削中機械が止まらないように次項で述べる切削条件(主軸回転速度、送り速度、切り込深さ)も調整する必要もあります。

ここで簡単な計算例で旋盤加工の主軸能力を説明します。
長さ 100 ㎜ x 直径 70 ㎜の機械構造用炭素鋼 S45C を工作物として主軸回転速度 910 mim^{-1}、切削工具(バイト)を送り 0.25 ㎜/rev(主軸 1 回転当たりの送り量)で 2 ㎜切り込む場合, 詳細計算は省略しますが、主軸に働く切削トルクは 42.9Nmとなり、必要な切削動力は 4.1KW になります。従って、この旋盤の主軸にはこれらの値以上の能力が必要です。(ただし、機械効率は考慮していません。)

仮に、図 9 の特性を持つ主軸モータをそのまま主軸に直結(あるいは主軸と主軸モータに同じ径のプーリを使う)するとトルクは図 9 より主軸回転速度が 1500mim^{-1} まで35.0Nm なので不足することになります。さらに、主軸動力は 910 mim^{-1} で 3.3KW しかないため切削できないことがわかります。
そこで、主軸プーリ直径を主軸モータプーリ直径の 1.5 倍とすれば、図 11 のように主軸の最高回転速度は 2/3 になりますが、52.5Nm の主軸トルクが 0～1000mim^{-1} で得られ、910 mim^{-1} での主軸動力も 5.0KW になり、上記工作物は加工できることがわかります。

工作機械メーカーでは図 12 のように色々な加工に対応できる主軸駆動機構を用意しています。

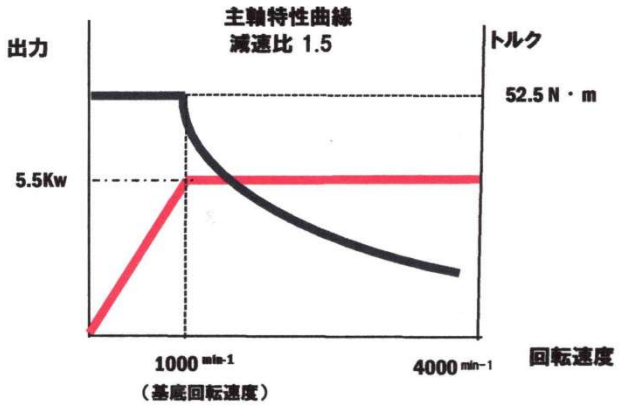
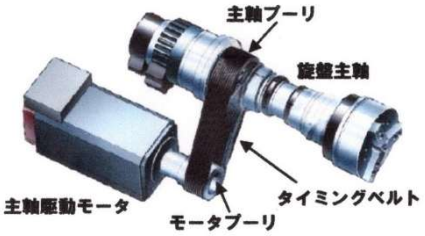
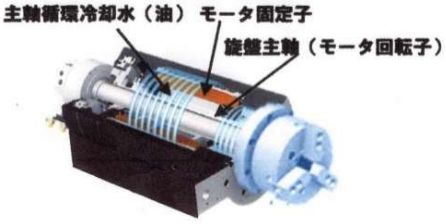


図 11:主軸特性

主軸機構名	構造概要	備考
プーリ変速機構		2 つのプーリ径比分主軸の回転速度を減速することで主軸トルクをプーリ径比の逆数倍上げます。（主軸プーリ径がモータプーリの 2 倍ならトルクは 2 倍になります。）
歯車変速機構		低・高速に歯車で回転速度を切り替え、広範囲の回転速度域で切削能力を上げられるように、歯車を何段か設け変速させた主軸。
ビルトイン主軸機構		モータは主軸に内蔵され、主軸自身がモータ回転子の働きをします。主軸駆動に機械的構造を介さないため高速回転域で振動が抑制されますが、モータの発熱が直接主軸に伝わらないように主軸冷却を行う必要があります。

6－7 金属切削加工

金属の切削加工では、削る条件である切削速度（周速）、送り速度、回転速度、一刃あたりの切削送り量などのパラメーターが適切な数値であることが重要です。

「切削速度」は「周速」とも言い、1 分間に刃が工作物上を進んだ距離で表されます。旋盤加工の場合、工作物が 1 回転するとその円周長さ分切削工具（バイト）が進んだことになります。例えば、工作物の直径が 200mm で主軸回転速度が 1 分間に 100 回転の時、切削工具が進んだ円周距離は 3.14x200 ＝628 ㎜です。この値をメートルに換算するため 1000 ㎜で割ると、0.628m になります。主軸が 1 分間に 100 回転するので周速＝100x0.628＝62.8m になります。なお材料ごとの推奨速度は多くの工具メーカーが提供しています。

「送り速度」は切削工具や工作物が送られる速さです。

また「1刃あたりの切削送り量」は、フライス工具など複数枚ある刃のうち、ある刃が切削位置に来たときと次の刃が切削位置に来たときの刃先位置の移動量で、刃数倍するとフライス工具の移動量が計算でき、さらに 1 分間当たり回転数をかけると送り速度になります。（図参照）上記それぞれのパラメーターには関係式がありますがここでは省略します。

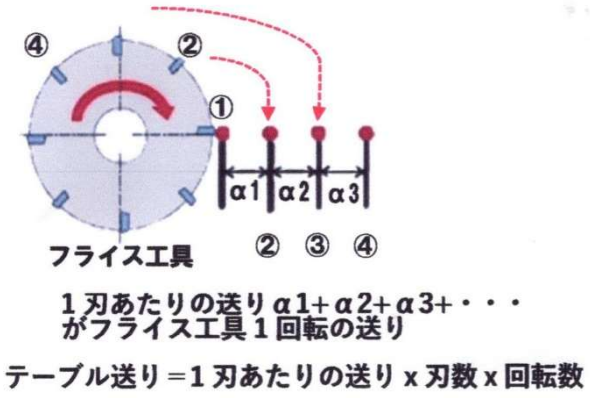


図 12：旋盤主軸機構の種類

6－8 工業デザイン

灰色や深緑色の設備機械に囲まれた加工現場の仕事は、油まみれの作業が多く、3K（きつい、汚い、危険）イメージが連想され、好景気に見舞われた 1980 年代後期以降若い技能者の製造業への興味が薄れていると言われました。

このころから、NC 工作機械の付加価値を高めるため、その外観に工業デザインが導入されはじめ、丸みを帯びた優しい形状と明るい機械本体色で機械加工現場のイメージ改善を図ろうとする動きが広がりました。

図 13：門形マシニングセンタのスプラッシュガード

そして 1990 年代以降、機械の外観デザインはさらに大きく変化したと思われます。切屑や切削油の飛散対策のため、機械本体を覆う切削水カバーは機体全体を覆うデザインを配慮した大きなカバーとなりました。このカバーには、外部から加工状況が良く確認できる大きな窓や段取り時の作業者負担を軽減する大きなドア開口部が設けられ、安全性・機能性・環境対策を高め、「スプラッシュガード」という呼称が一般化しました。このように、工業デザインはブランドと機械イメージを作り出すため、工作機械の設計において今日では重要な位置付けとなっています。

6－9　工作機械で使用する電源

一般家庭で使われている電気は、単相 100V か 200V のどちらかです。単相 200V は単相 3 線式と言い、芯線が 3 本（上下の電圧線と真ん中の中性線）通っています。そして、中性線といずれかの電圧線間の電圧が 100V、上下の電圧線間の電圧が 200V になります。　つまり、単相 200V に対応している建物は電圧が 100V と 200V のどちらにも使用できます。これに対して単相 100V は中性線と電圧線が 1 本ずつしかなく、使える電圧は 100V だけです。200V の電気機器を使う場合には配線工事が必要になります。

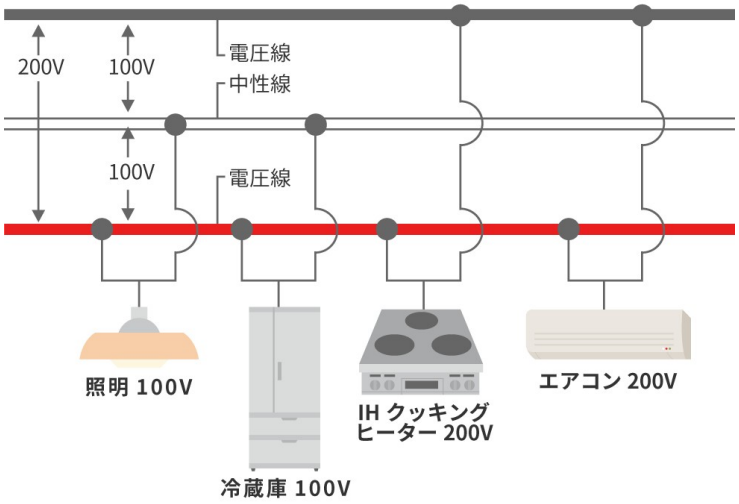


図 14：家庭用単相 100v　200v（中部電力）

一方、三相 3 線式では、三本の電線を使った配電方式で、工場で最も使用されている三相誘導モータを動かす目的で利用されます。
二本の線に一つの装置を繋ぐ単相 3 線式と異なり、3本の線すべてに装置を繋ぎます。

次頁参考（★）に理由を述べますが、三相3線式では時間ごとに単相交流波形が 120 度ずれて3つの線に供給されるので、図 15 のように3つある電極間全てが 200V です。　従って、図のように線 2 本を接続して、単相 200V として使用することもできます。

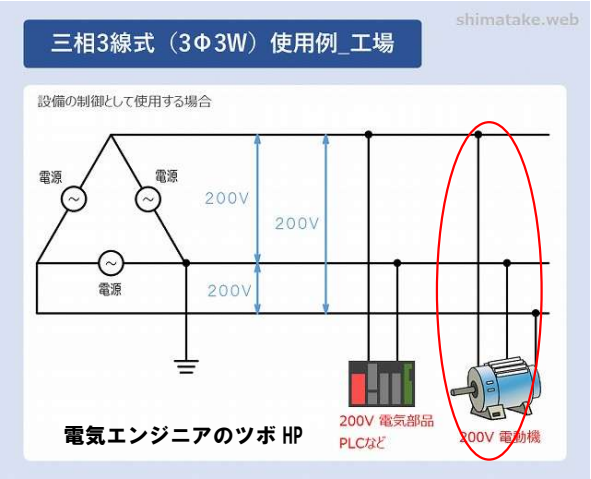


図 15：三相3線の工場使用例

三相 200V を使う電気機器は、以下のような設備です。

- 工作機械や産業機械
- 業務用大型エアコンや大型冷蔵庫
- エレベーター

三相3線式は3つの相がそれぞれ単相3線式1つと同じ仕事をするため、単相の 3 倍の電力量があります。つまり単相と比較して少ない電流で同様の電力を得られるということになります。そのため、消費電力が少なくて済み、多くの電力を使う場合に利用されている交流電気です。

（参考）

発電所で発電される電気は交流です。発電機の原理（誘導電流）により、図 16 の固定されたコイルの中を磁石が回るとコイルに電気が流れ、電気の流れる向きが周期的に変化する現象が起こります。

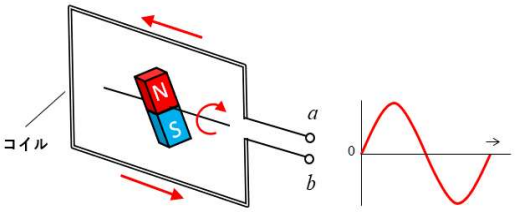
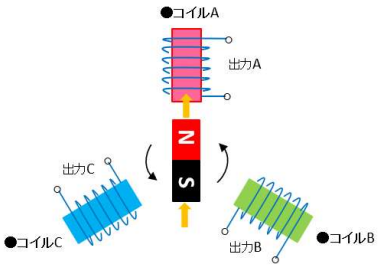


図 16：単相交流の発生

発電所では水力発電なら水車、火力発電ならタービンで図 16 の磁石を回します。この時、互いに 120 度ずれた位置に置かれたコイルには、3 つの交流電気が 120 度ずれて流れます。

これが図 17 の時間軸の位相角度を 360 度の3分の1の 120 度ずらして3つの電源を均等に供給している理由です。この電気を送電ロスのないように発電所のそばの昇圧変電所で高圧に上げて各都市近郊に送電します



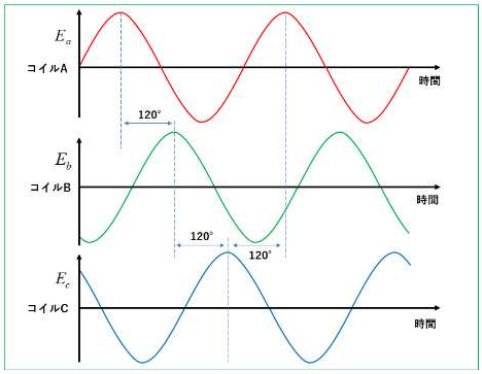


図 17：三相交流の発生

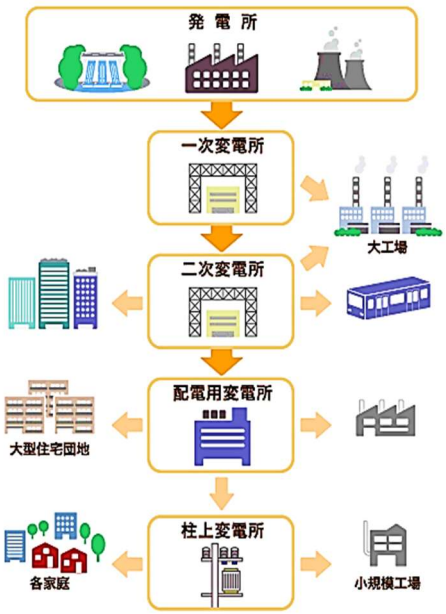


図 18：送電のしくみ概要
（スマートジャパン HP）

その後1次変電所 2 次変電所で降圧して都市にある配電所（3 次変電所）へ送ります。そして、さらに降圧して各家庭や小口使用の工場に電柱などについている柱上変圧器（トランス）を介して単相 100V 200V や三相200V に変圧します。

ここで、多くの工作機械などの設備機械を持ち、電気を大口使用する大中工場へは 1 次、2 次と配電用変電所からそれぞれ送られます。

単純比較では、同じ消費電力の場合100V 使用に比較、単相200V では 0.5 倍 の電流三相 200v では 0.29 倍の電流で済みます。

6－10　きさげ加工

　きさげ加工とは図の切削工具（スクレーパー、またはきさげと呼ばれます）を用い、手作業で写真のように削る加工です。きさげを施す場所は、「すべり案内面」としてこすれあう部分と面同士が接する部分です。
きさげ加工面には、細かいウロコ状模様が観察できます。これは微妙に異なる作業者ごとに得意の削り方が仕上がり面の模様の違いに現れるからです。

スクレーパー

きさげ作業

　機械がすべり案内面（以下摺動面）を円滑に動くには摺動面はスムーズにこすれあわなくてはなりません。しかし、滑らかに磨き上げた面同士を重ねると、滑りが悪くなり、密着すると簡単には動かせなくなる現象が知られています。この現象を「リンギング」と呼び、仮に工作機械の摺動面で発生すると機械の動作が阻害される原因にもなりかねません。

　きさげ加工は、この「リンギング」現象を防ぐため、摺動面に微細な窪みをたくさん作ることで摩擦を抑えるとともに、窪み部分に潤滑油がたまりやすくして、スムーズな摺動面の動きを確保しようとする手法です。

磨かれた面同士では密着させると「リンギング現象」が起こる。

きさげ加工すると接触面が減り、窪み部分に潤滑油がたまり、滑りやすくなる。

① 摺動面の精度出し

　テーブル、コラム、ヘッドなどが摺動面を直線運動する際の真直度や姿勢精度（図 19）は大変重要です。摺動面の挙動が難しいのは、主要構造要素と主要運動要素の運動や主要運動要素同士の運動が摺動面をまっすぐに進むことが求められるからです。そこで、機械構造が組みあがると、それぞれ主要運動要素の XYZ 軸方向直進運動の真直度と、それぞれ 2 軸の直進運動の直角度に問題がなく、姿勢誤差にも問題がなく組み立てられているか検査され、きさげ加工で最終調整されます。

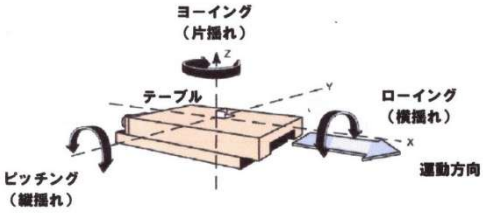


図 19：テーブルの姿勢誤差

　さて、NC　工作機械の摺動面には　PTFE（四フッ化エチレン）を主材料とした、低摩擦で防振に富み、摩耗に強い「ターカイト」という樹脂のような帯板を専用ボンドで貼り付けて「きさげ加工」を行います。

写真 1：ターカイト摺動面のきさげ加工

写真 1 のターカイト上のくぼみが「油だまり」で、ここに潤滑油がたまり、工作機械の動きを良くする効果があります。

写真 2:NC 工作機械のベッド案内面とテーブル裏面

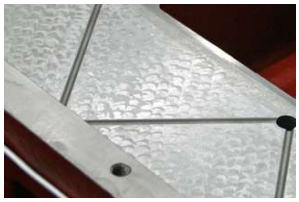


写真 3:汎用工作機械案内面のきさげ加工

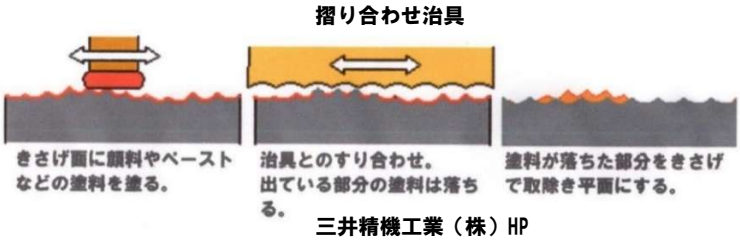
写真 2 は焼入れ研削されたベッド案内面上を摺動する、きさげ加工済みのターカイトが貼られたテーブル裏面です。

これに対して、一般の汎用工作機械では写真 3 のように、従来から行われてきた鋳物の摺動面にきさげ加工で仕上げていきます。

② 接合面の精度出し

正確な面をきさげ加工で作る場合、基準になるものとして特殊な方法でつくられた平面の板、「摺り合わせ治具」が使用されます。

きさげ加工面は微小な凹凸の高い部分と低い部分があります。その面に朱を塗り、摺り合わせ治具と摺り合わせると高くなっている面の部分の朱がはがれます。朱がはがれた部分に再度きさげを行い、これを繰り返していくことで平面が作られます。



三井精機工業（株）HP

きさげを行うコラム底面

平面が出ていない部材同士でも、ボルト等で強制的に面と面を合わせることは可能です。しかし、部材には常に元に戻ろうとする力が働いているので、これが「ストレス」となり、長い期間では精度悪化の要因となります。

図 20 は立て形マシニングセンタのコラムとベッド取り付け面の真直度が出ず、コラムが前倒れして Z 軸が傾き、主軸ヘッドの上下運動精度に狂いが出る例です。この場合主要構造要素同士の接する面（赤破線）をきさげ加工で修正します

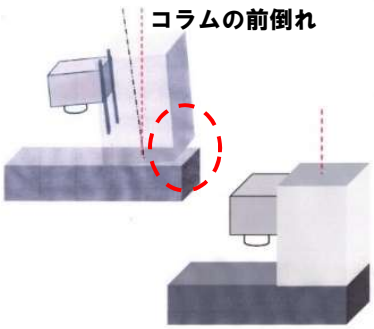
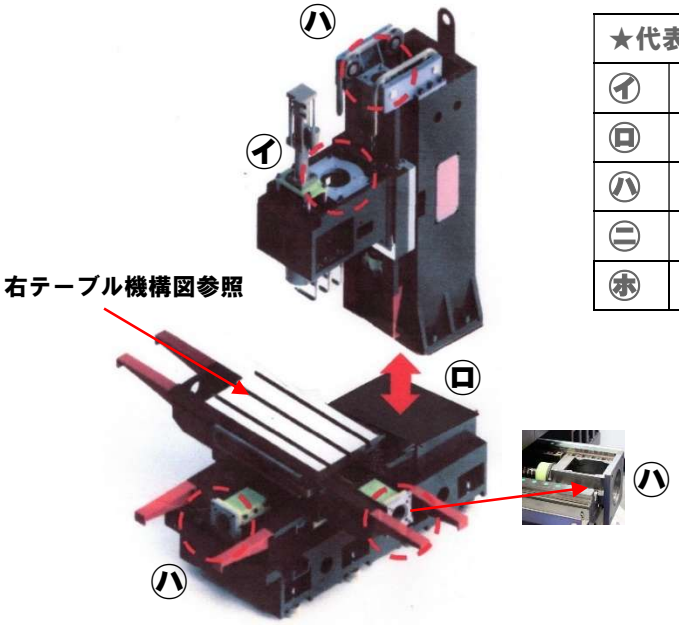


図 20:接合面のきさげ加工修正後

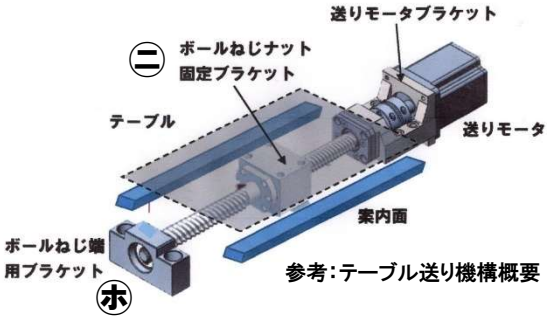
図 21 は、きさげ加工で接合面精度を出す立て形マシニングセンタの代表的な部分を示しています。
コラムとベッドの合わせ面㋺は前頁例の通りきさげ加工仕上げされます。㋑㋩は主軸モータと送りモータが取りつくブラケット面（注）で、真直度が出ていないとモータ軸が傾いて主軸やボールネジに取りつき不具合が発生するため、きさげ加工で調整されます。
また、㋥㋭のボールネジのナットブラケットや端末支持ベアリングブラケットも相手要素の取付面と真直度が必要なため、きさげ加工による調整が必要です。

（注）ブラケット：機械部品同士を結合するために使用する支持部品



★代表的なきさげ加工仕上げ面	
㋑	主軸モータ取付け面
㋺	コラムとベッドの合わせ面
㋩	送りモータ取付けブラケット面
㋥	ボールネジのナットブラケットの取付け面
㋭	ボールネジ端ベアリングブラケットの取付け面

図 21：きさげ加工を行う接合面



参考：テーブル送り機構概要

参考図のテーブル送り機構でボールねじナット固定用ブラケットは主要運動要素（テーブル）の裏に取付けられます。
また、ねじ端支持用ブラケットは相手側主要運動要素（ここではサドル）に取付けられます。

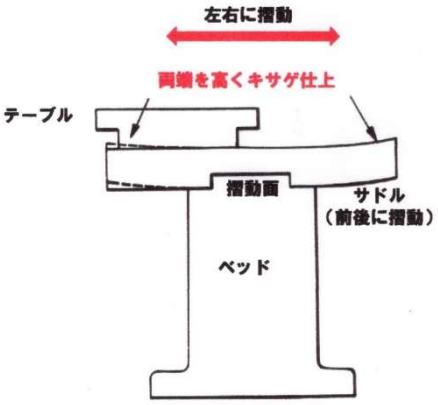


図 22：案内面の修正

図 22 のフライス盤サドル（クロステーブル）案内面は、上をテーブルが移動すると、テーブルの重さで中央部の精度は良くても、両端部の精度は案内面が下がり、落ちてしまいます。そこで、サドル案内面をきさげ加工によって、わずかに（数 μm ほど）中央部を低くしたカーブ形状に仕上げます。こうすることで、その上をテーブルが運動してもサドル両端部で精度が落ちずに全体でまっすぐに動かすことができます。

6－11　工作機械の輸出管理

先進国の高度な製品や技術が大量破壊兵器などを開発する国やテロリスト等に渡った場合、国際的に大きな脅威となります。この脅威を未然に防ぐのが、「核兵器関連」「生物・化学兵器関連」「ミサイル関連」「通常兵器関連」に分類された輸出管理の国際的枠組み（レジーム）です。先進国を中心とした参加国はそれぞれの枠組みに準拠して、たとえば日本の外為法、米国の輸出管理規則のような法律を運用しています。

工作機械やその技術は「核兵器関連」や「通常兵器関連」(注)の軍事用途目的に転用される可能性があるため、製品の性能や輸出相手国などに関する詳細な規制が定められ、規制に該当する製品や技術の輸出には、経済産業省の輸出許可が義務付けられ厳格に管理されています。

また、先端技術を持つ企業、大学、研究機関等からの、技術・データや製品等の流出は国の優位性や安全保障に大きな影響を及ぼすため、これに対処するための経済安全保障の重要性が近年高まっています。

(注)通常兵器：一般に大量破壊兵器以外の武器を意味し、地雷、戦車、軍艦、戦闘機、大砲、ミサイルから、けん銃などの小型武器まで多岐にわたります

6－12　日本国際工作機械見本市（JIMTOF）

わが国で開催される工作機械展示会の中で、最も規模が大きいものは「日本国際工作機械見本市（JIMTOF)」です。第1回 JIMTOF は 1962 年大阪で開催されました。これ以前は、いわゆる玩具や家電などから工作機械までの総合産業見本市として東京と大阪で交互に毎年開催されていました。しかし、工作機械の出展が特に多くなったことから、JIMTOF が工作機械の専門展示会として産声をあげました。

この後、東京と大阪での隔年開催を続けましたが、展示館環境等の理由から開催地の一本化を求める機運が高まり、2000 年の第 20 回以降、開催地は東京に一本化され、東京ビッグサイト全館を使用して隔年で開催しています。東京ビッグサイト全館を使用する展示会は、東京モーターショーやコミックマ―ケットなどごくわずかです。そして、2022 年からは従来の東館・西館に加え南館も増築され展示面積も広くなりました。

主催者は（一社）日本工作機械工業会と㈱東京ビッグサイトで、金属切削工作機械に加え鍛圧機械、工作機械関連機器、工具等も出展されます。

JIMTOF は来場者の規模では欧州の欧州国際工作機械見本市（EMO）、米国国際製造技術展（IMTS） そして中国国際工作機械展覧会（CIMT）といった世界の主要展示会にほぼ並ぶ規模を誇る国際展示会として、日本から世界に向けて世界最高水準の技術・製品を発信しています。（表 5）

展示会名略称	JIMTOF	IMTS	EMO	CIMT
開催年	2026	2026	2025	2025
会期	10/26～10/31	9/14～9/19	9/22～9/26	4/21～4/26
開催地	東京	米国・シカゴ	ドイツ・ハノーバー	中国・北京
展示場面積（㎡）	92,850	248,000	524,285	310,000
出展社数（社）	1,087	約 1,800	約 1,600	2,432
来場者数（人）	130,000	―	約 80,000	345,864

表 5： 世界の主要国際工作機械見本市　比較表

（注）JIMTOF の来場者数は目標値

6－13　ピクトグラム

ピクトグラム（英語: pictogram）は、グラフィック・シンボルの典型で、意味するものの形状を使って、その意味概念を理解させるための記号です。
表示には、以下のように各言語とともにシンボルを配置する例と、シンボルのみの場合があります。

図 23：各言語の区画をシンボルの左右に配置した例

図 24：危険源を表すシンボルのみのラベルの例

（一社）日本工作機械工業会では 2018 年工作機械用警告ラベル設計ガイドラインを作成しています。

このガイドラインは、工作機械の安全な使用に関する表示（警告ラベル）を可能な範囲で統一することで，機械の使用者にわかり易くし，人身への危害と財産への損害を未然に防ぐことを目的とし，その為に必要な警告ラベルの設計に関する情報を容易に得ることができるようにしたものです。

また、警告ラベルは工作機械の使用される国または地域の法律，規格，基準などに準じて選択されなければならないとしています。

6－14　主な加工方法

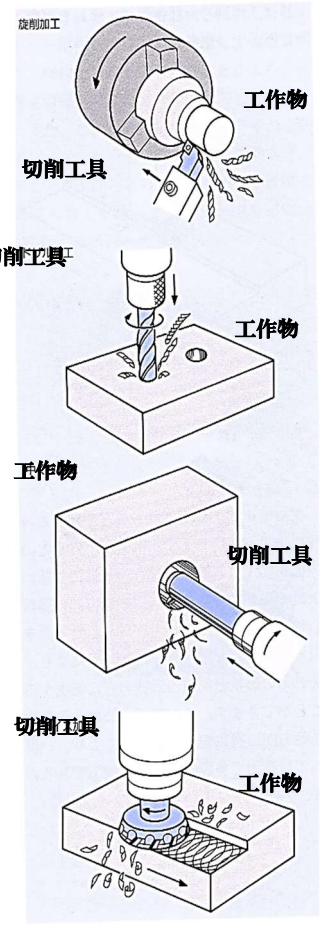
工作機械により金属などの材料（工作物）を削り、必要な形に作ることを特に「切削加工」と言います。工作物は主として金属ですが、プラスチックやセラミックのような非金属材料の場合もあります。また、砥石を用いて工作物を研磨することも、広い意味では切削加工ですが、特に「研削加工」と呼びます。

切削加工や研削加工では、モータで回転する主軸に工作物を取り付けて、切削工具や砥石を移動させ加工するか、工作物を固定して主軸に切削工具や砥石を取り付けて移動させ加工します。

なお、電気や化学のエネルギーを利用する「放電加工」「電解加工」や「レーザ加工」、特殊な音波のエネルギーを利用する「超音波加工」なども切削加工の1種として位置づけられています。以下に代表的な切削加工の方法を挙げます。

(1) 旋削加工

旋削加工は、切削工具（バイト）が回転する円筒形および円板状工作物の半径方向に切り込み、軸方向に動かす（送る）ことで加工します。



(2) ドリル加工

ドリル加工は、切削工具（ドリル）で工作物に穴をあける方法をいい、一般的には工作物を固定し、ドリルを回転させると同時に軸方向に動かす（送る）ことで加工します。

(3) 中ぐり加工

すでにあけられている穴をさらに目的に応じてくり拡げ、それと同時に精度の高い穴の表面仕上げを行う方法で、中ぐりバイトまたはボーリングバーと呼ばれる切削工具を回転させながら、軸方向に動かし（送り）切削します。

(4) フライス加工

フライス加工は、円筒形の端面または円周上に多数の刃を持った、それぞれフライス、エンドミルと呼ばれる切削工具を回転させ、工作物を送り、工作物表面、溝などを切削します。

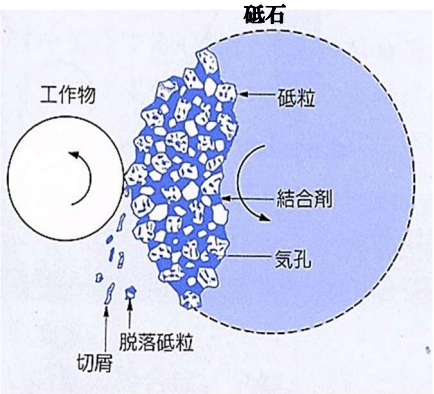
(5) 歯車加工

歯車加工はホブカッターに代表される切削工具を使い、これを回転させながら工作物の円周上を軸方向に送り、工作物をゆっくり回転して歯車の加工を行います。

(6) 研削加工

研削加工に使われる高速回転する研削砥石は多数の「砥粒」を「結合剤」で固めたもので、その構造は、ちょうどお菓子の"おこし"のようです。

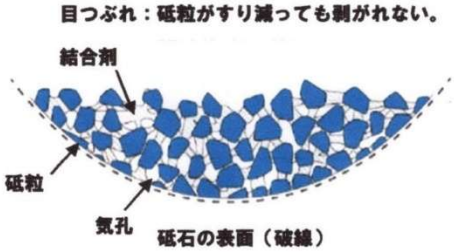
図のように研削砥石は、砥粒・結合剤・気孔という構造になっています。そしてこの砥粒が刃の役割を果たし、刃先が減り、刃ではなくなった砥粒は脱落して、次の新しい砥粒がでます。従って多くの小さな切れ刃によって少しずつ切れ込みを入れることで、寸法や形状精度が非常に高いものに仕上げることができます。この絶えず新しい砥粒が出現することを「自生作用」、「自生発刃」といいます。



研削砥石の作業中の問題点には以下のものがあります。

① 目つぶれ

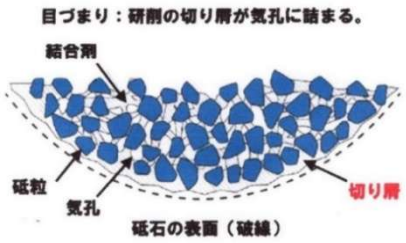
砥粒の尖っている部分、つまり刃の役割を果たしている部分が削られ、平坦な状態になってしまうことで、研削できなくなる現象のことを言います。目つぶれが生じると研削抵抗が大きくなり、加工物に変形が生じやすくなるとともに研削温度が上昇し、加工物表面上に研削焼けなどの熱的損傷を生じるようになります。



② 目づまり

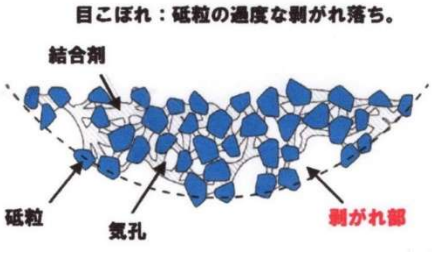
砥石にある気孔の部分に切りくずが詰まることで砥粒が埋没して、切れ味が悪くなってしまう状態を言います。主にアルミニウムや銅などの軟らかな金属の研削で起きやすくなります。

たとえ切れ刃が鋭利であっても、目づまりした切りくずが一種の平滑化した切れ刃と同じとなり、加工物にくいつきにくく、また切りくずの流出する空間がないために砥石の研削性能が急激 に低下します。



③ 目こぼれ

結合剤によりついている砥粒が必要以上に落ちてしまう現象を言います。砥粒が落ちるので、表面の仕上げり面や寸法精度は悪化し、砥石の消耗も早くなります。

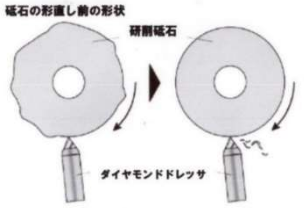


①や②が起きた場合はダイヤモンドドレッサと呼ばれる円錐状の道具によって、砥粒を戻し、加工可能な状態に再生します。また、③が発生している場合は、母材である結合材を削りだし、砥粒を表面に出す必要があります。基本は粗目の砥石やドレッシング砥石で表面を削ります。

(参考)ダイヤモンドドレッサの使用

研削砥石は「砥粒」と「結合剤」を混ぜて型(かた)に入れ、炉で焼いてつくられます。このため、研削砥石は全体を均一な組織にすることは難しく、ムラが発生し、一見、真円に見えますが、精密に見ると歪な形状になっています。そこで、形を直すこと(形直し)が必要になります。

形直し(ツルーイング)は回転させた研削砥石の外周面をダイヤモンドドレッサで削り、研削砥石を真円にする作業です。砥石を研削盤の砥石軸に付け、バランス調整を行った後に行われます。

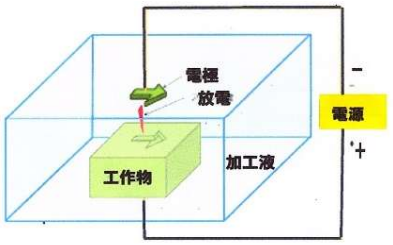


ダイヤモンドドレッサー

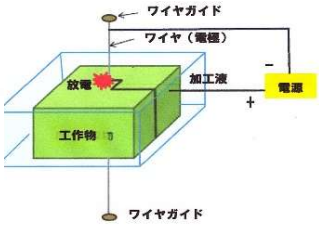
形直し後、目直しが必要です。目直しは「砥粒」をダイヤモンドドレッサで微小に削り、砥粒に鋭利な凸凹を付けて研削砥粒の切れ味をよくして、精密な研削加工ができるようにします。目直しはダイヤモンドレッサの送り速度を変え、「砥粒」の凹凸を調整することができます。荒研削を行うときには、「砥粒」の凹凸が大きい方がよいので、ダイヤモンドドレッサの送り速度を大きくし、精密研削(仕上げ研削)を行うときには、「砥粒」の凹凸が小さくするために、ダイヤモンドドレッサの送り速度を小さくします。

(7)放電加工

放電加工は、電極と工作物の間で火花を放電させて、工作物を加工する方法です。加工される形状と相対した電極を使用する形彫り放電加工と、銅線などのワイヤを電極とするワイヤ放電加工があります。



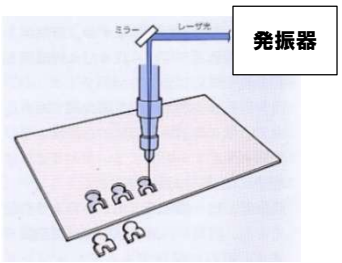
形彫り放電加工



ワイヤカット放電加工

(8)レーザ加工

レーザ加工はレーザ光により工作物を所定の形状に切断加工する方法です。金属材料の切断には、発振方法の異なる炭酸ガス(CO_2)レーザとファイバーレーザがあります。



レーザ加工

(9)ウォータージェット加工

高圧の水により工作物を所定の形状に切断する加工です。高圧水に砥粒を混合して加工を行う場合もあります。

加工で熱が発生せず多くの切りくずが出ないのでクリーンな加工方法です。

6－15　工作機械の剛性

産業機械などは、「壊れないこと」、「安全であること」、そして「正しく機能すること」を念頭に、それぞれの機械構成部品にはどのような荷重が加わるのか考慮して設計しなくてはなりません。そのため、設計には適切な材料を使い、強度計算が重要になります。このことを「強度設計」と言います。

さて、工作機械では第1章の「母性原理」にも述べた通り、作り出される部品に工作機械の精度が転写されます。そこで工作機械には変形、振動の起きにくい剛性（注1）がある構造とするため「剛性設計」が行われます。

剛性設計には、工作機械を一定の荷重（注2）や切削力による曲げやねじりなどの変位をできるだけ小さくして静的剛性のある構造にすること、急加速・停止時に起こる慣性力や切削等から発生する振動（注3）による動的変位が起きにくい動的剛性がある構造にすることが必要です。

ただし、剛性は図 25 のベッドやコラムなど機械を構成する単一要素だけでなく、これらの要素同士を結合するための要素（例えば、コラムをベッドに取り付けるボルト、軸受や送りねじなどの駆動要素）にも必要です。そして、さらにはそれらを組み合わせた工作機械全体にも剛性が必要です。

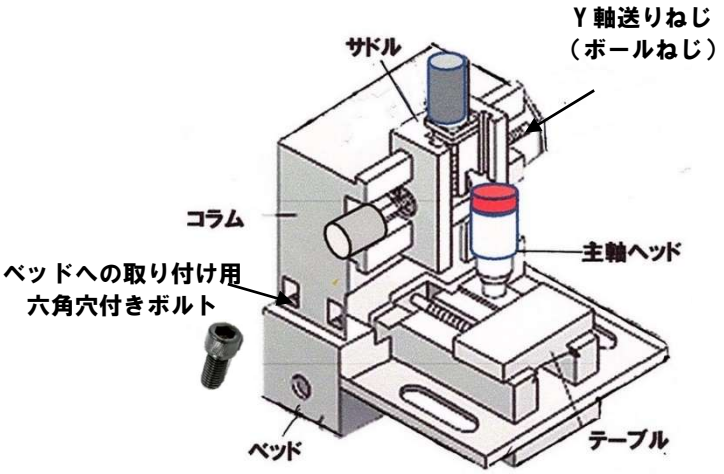


図 25：立て形マシニングセンタ　基本構造

★注記

（注 1）剛性とは「物のある点に力を加えたときの変形しにくさ、あるいは変形を拒もうとする性質」です。たとえば、ゴムの塊は小さな力でも大きく変形するので剛性はありません。

（注 2）たとえば工作物の重量をはじめ、図 25 のサドルが移動した時、コラムにかかるサドル荷重やテーブルがベッド上を動く時ベッドにかかるテーブル荷重があります。

（注 3）振動は断続的に起こるフライスの切削抵抗や切削工具が工作物の固い部分に当たり生じる衝撃荷重で発生する振動、機械内部から起こる振動、そして、床など機械以外から伝わる振動などがあります。

機械構成要素は、重量軽減やその内側に色々な部品を内蔵するため、中空構造（図 26・図 27）となり、強度を高めるため内部に補強骨（リブ）が設けてあります。

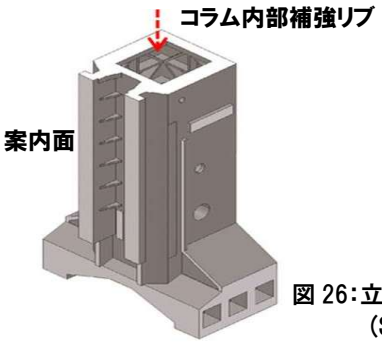


図 26：立て形マシニングセンタのコラム
（SIGMA-Feeler HV-40A）

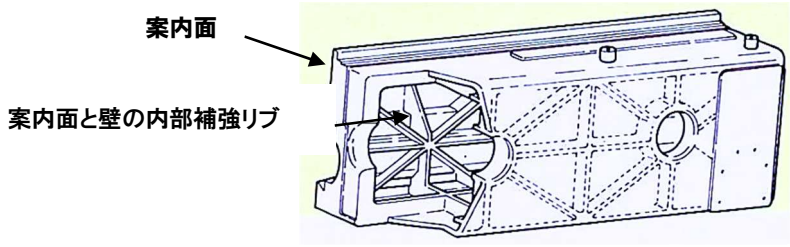


図 27：門型工作機械の横桁内部構造

以上の剛性に加えて加工精度に影響を及ぼすのが熱変形です。熱変形は熱剛性と呼ばれることもあります。

熱変形の主な原因には、加工により機械上に残る切屑からの熱、モータなど機械稼働で発生する熱、そして環境室温変化があります。これらの熱源による機械の部分変位が重なり合い工作機械全体の熱変形になります。そこで、今日の工作機械ではどのような熱源の影響を受けても熱変形を最小にするため、機械構造上の設計配慮が行われています。

7. 代表的な工作機械の種類

代表的な工作機械は大きく以下に分類できます。

- 旋盤： 円筒または円盤状の工作物を回転させて加工する機械です。
- ボール盤：ドリル工具を回転させて穴あけ加工を行う機械で、リーマ仕上げ、ねじ立てなどの加工も行えます。
- 中ぐり盤： ドリル工具などであけられた穴の内面を、より精度良く、所定の大きさに「中ぐり加工」を行う機械です。
- フライス盤：フライス工具と呼ばれる切削工具を回転させ、平面や溝を加工する機械です。なお、曲面は NC フライス盤でのみ加工できます。
- 研削盤： 研削砥石車を回転させて加工する機械で、加工精度が良く、切削加工に比べ優れた仕上面が得られます。
- 歯切り盤：歯切り用の切削工具である、ホブカッタ、ピニオンカッタ、ラックカッタを用いて歯切り加工する機械です。
- 放電加工機：電気エネルギーを利用して加工が行われ、放電を行う電極の形状により「形彫り放電加工機」と「ワイヤ放電加工機」に分けられます。
- レーザ加工機：レーザエネルギーを利用して切断、穴あけなどを行う機械です。
- ウォータージェット加工機：高圧水のエネルギーを使用した加工を行う機械です。
- マシニングセンタ：中ぐり、フライス削り、穴あけ、ねじ立て、リーマ仕上げなど多種類の加工を必要な切削工具を自動で交換できる機能を備え連続で行える NC 工作機械です。
- ターニングセンタ：NC 旋盤の機能をより高め、多くの工具を備え、旋削加工の他に回転工具主軸を持ち、工具を自動で交換してフライス削り、穴あけ等の加工も行うことができます。

工作機械は操作方法によって、作業者が手動で加工する箇所を調整しながら操作する「汎用工作機械」と、数値制御によって自動で加工を行う「NC 工作機械」の 2 つに分けられます。

以下の章に、上記分類のうち最も代表的な汎用工作機械を例に取るとともに、今日広く使われている数値制御（NC）工作機械について、それぞれ概要を説明します。

7－1 旋盤

旋盤は「丸物」と言われる、円板状または円筒状工作物の加工に使われます。旋盤加工では、切削工具は固定され、工作物が回転します。そして、図 31 のように切削工具（バイト）を回転する工作物の半径方向に切り込み、軸方向に動かす（送る）ことで加工します。この加工を「旋削加工」と言います。

工作物は図 29 のように、主軸につけられた「つかみ」装置であるチャックで保持されます。

工作物を旋盤チャックに取付ける場合、図 29 のようにチャックハンドルを用いて、チャックの爪を開閉して工作物を取り付け、固定します。なお、チャックには爪が 4 個の「四つ爪チャック」もあります。一方、切削工具であるバイトは図 30 のように、前後左右に動く刃物台にハンドルとボルトネジで固定されます。

心押台（図 31）は、ベッド上の主軸台対面にあり、ベッド上を長手方向に移動することができます。心押台の心押軸にはセンタを取付けて工作物を支持したり、ドリルを取付けて穴加工を行うこともできます。また、長い工作物については、図 31 のように主軸と心押し台で両端を支持しますが、振れ止めを併用して工作物を支えることもあります。

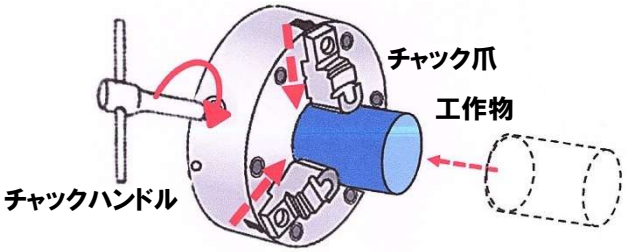


図 29：旋盤チャックに工作物を取付け

図 30：刃物台と取付けられたバイト工具

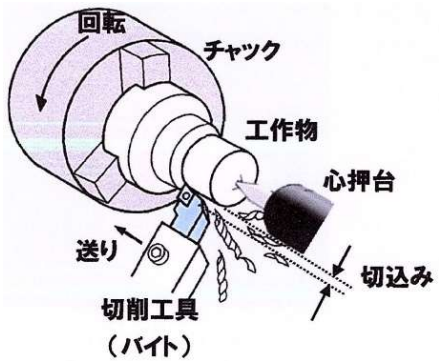


図 31：旋削加工と心押し台の利用

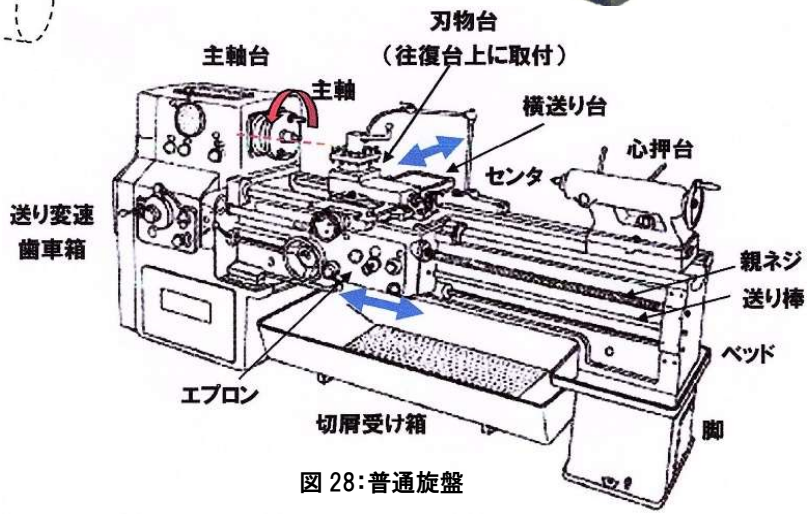
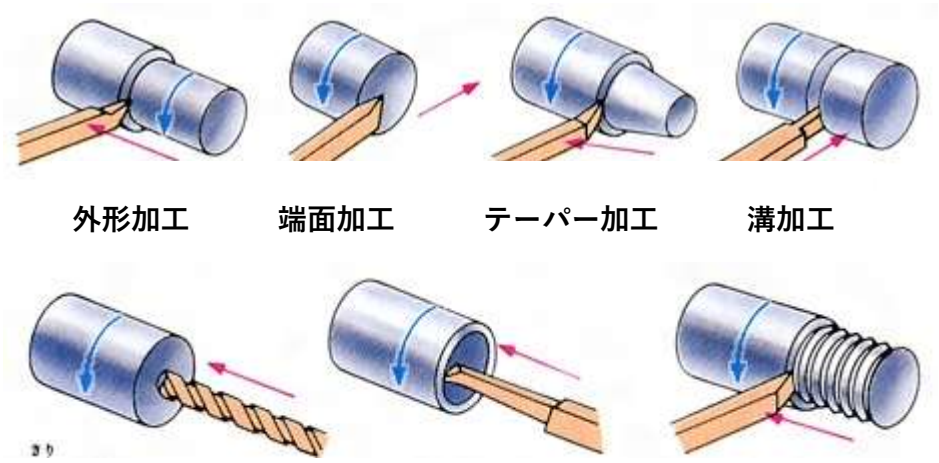


図 28：普通旋盤

図 28 は一般的な普通旋盤ですが、旋盤には大きな重量物の加工に用いられる、主軸を垂直にした形状の立旋盤もあります。

図 32 に代表的なっ旋盤加工の例をまとめます。



（注）表のドリル加工と中ぐり加工以外は専用バイトを使用しています。

図 32：普通旋盤による代表的な加工

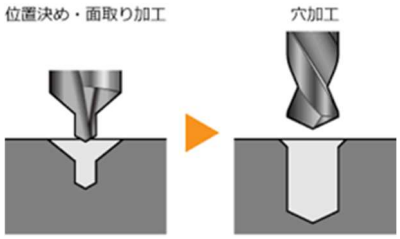
（参考）旋盤によるドリル加工と中ぐり加工について

① <u>旋盤によるドリル加工</u>

写真のように心押し台にドリル工具がつくドリルチャックをつけて加工します。

加工は、写真のようにドリルによる穴あけの前にセンタ―ドリルで加工物のセンター穴を決め軸がぶれることなく穴あけを行います。

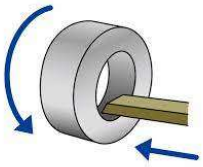
センタドリル



センター穴を作る。下穴にそろえてドリル加工

② 旋盤による中ぐり加工

中ぐりバイトは円筒状工作物の内面をドリルでは加工できない大きな穴や、精度が必要で綺麗な加工面が必要な穴の場合使用されます。他のバイト同様刃物台に中ぐりバイトを取り付けて加工します。



円筒工作物の中ぐり加工

刃物台に中ぐりバイトの取付

旋盤の中ぐり加工例・

ドリル加工による下穴作成

中ぐりバイトにより徐々に穴径を大きくする

7－2 ボール盤

工作物の穴あけや穴を堀り広げるための工作機械をボール盤といいます。ボール盤加工は旋盤加工とは逆で、工作物は固定され切削工具が回転して加工します。

工作物は上下に移動する図35の取付台（テーブル）の上に取付具（例：工作物を挟み込むバイス、工作物を上から押さえるクランプ具）でしっかり保持されます（図33）。また、主な切削工具である、ドリルは主軸先端に取りついているドリルチャックをチャックハンドルで開き挿入され締められます（図34）。　そして、加工は主軸を回転させてドリルを下方向に動かし（送り）ます。

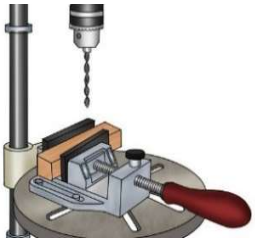


図 33: バイスによる材料の保持
(Wonkee Donkee Tools WEB Site)

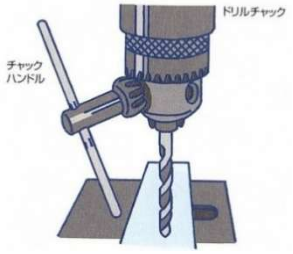


図 34：ドリル工具をドリルチャックに装着
（清盛伸二著、「トコトンやさしい工作機械の本」
第５章３８節図３）

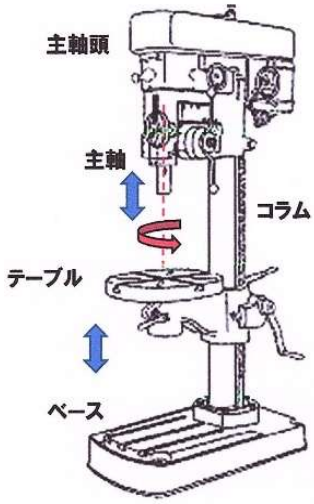


図 35： 直立ボール盤

ボール盤では、ドリルで開けられた穴（下穴）にめねじ（ネジが入るらせん溝）を切る「タップ加工」や、ドリル穴を所定の穴寸法に広げながら、滑らかな面を作る「リーマ加工」もできます。

7－3 中ぐり盤

中ぐり加工は旋盤加工と同じ原理ですが、工作物は固定され中ぐりバイトが回転します。特に、ドリルでは加工できない大きい穴や、精度と綺麗な加工面が必要な穴の加工などは「中ぐりバー」を使用して穴の内面を削ります。汎用性が高いマシニングセンタの登場後も、マシニングセンタでは加工できない大型の工作物や、より高い精度が求められる穴加工では、中ぐり加工に特化した中ぐり盤が必要です。

なお、中ぐり盤では中ぐり加工の他にドリル加工やフライス加工もできます。

図 36：中ぐり加工

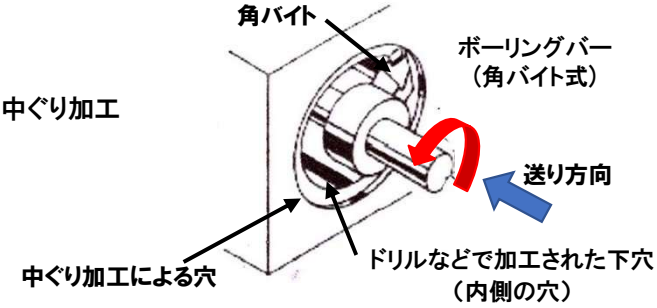


図 36 の角バイト式ボーリングバーでは穴の直径や精度によって、ボーリングバーのバイト突き出し量を調整して徐々に仕上げていきます。また、何種類かのバイト突き出し量を設定したボーリングバーを交換しながら、徐々に削り量を少なくして、仕上げていく場合もあります。

図 37 は最も汎用的なテーブル型横中ぐり盤です。この機械ではテーブルが2方向に、主軸頭は上下方向に動き、3軸制御横型マシニングセンタと同じ軸構成となりますが、主軸頭端面からの「主軸繰出し機能（主軸クイル）」があります。この機能で、切削工具を長く突き出し、深い穴の中ぐり加工やフライス加工が可能になります。

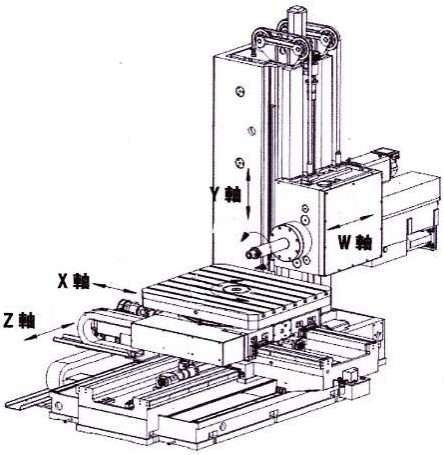


図 37：テーブル型横中ぐり盤

横中ぐり盤には、図 38 のような中ぐり棒支持装置付もあります。この装置は、長さがある加工の際、中ぐり棒の他端近傍が回転可能で、かつ軸方向に摺動して支持します。（図 39）
加工の際には主軸繰出しによる作業が行われ、工作物を動かす必要がなく、大型の工作物加工にも適しています。

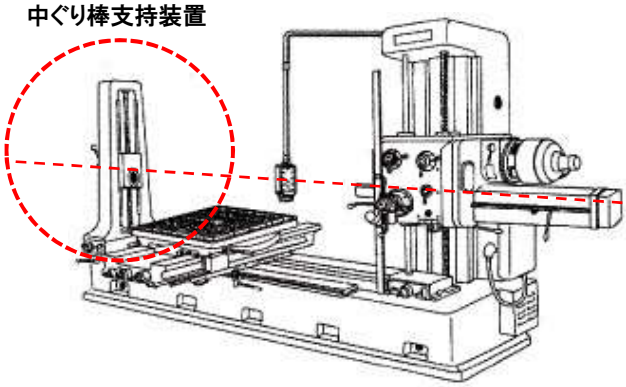


図 38：中ぐり棒支持装置付
テーブル型横中ぐり盤

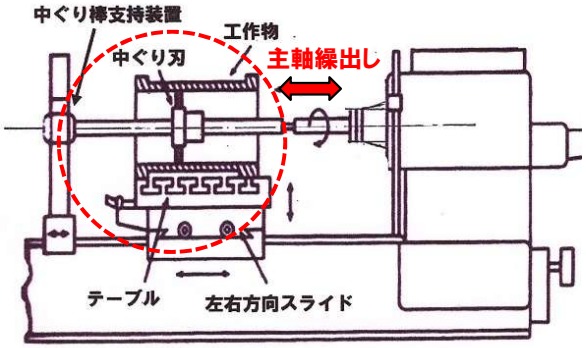


図 39：両持ち中ぐり作業
（㈱大谷機械製作所）

7－4 フライス盤

(1)　概要

フライス盤は、「角物」といわれる四角形状の工作物を固定し、切削工具が回転して加工する機械です。工作物は最も汎用的なひざ形立てフライス盤（図 40）の場合、前後左右と上下に動くテーブルの上にボール盤同様、取付具（例：バイス、クランプ具）でしっかり保持されます。

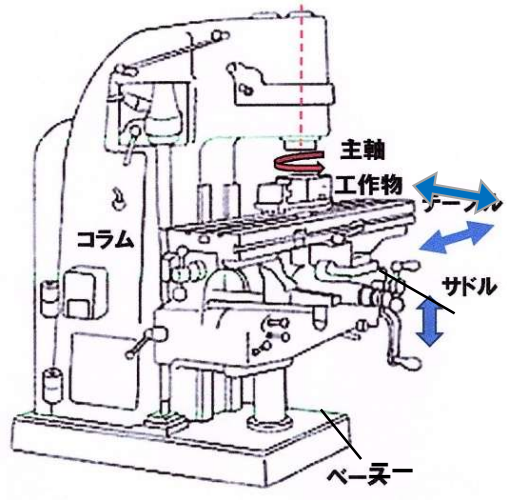


図40：ひざ形立てフライス盤

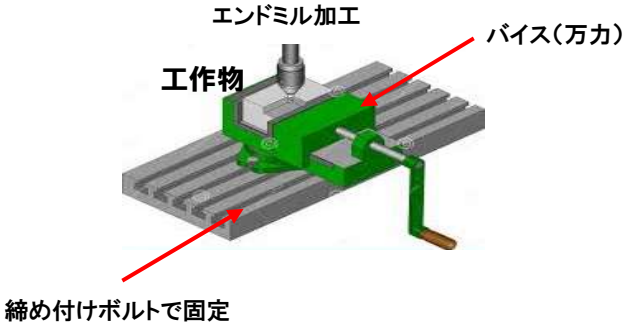
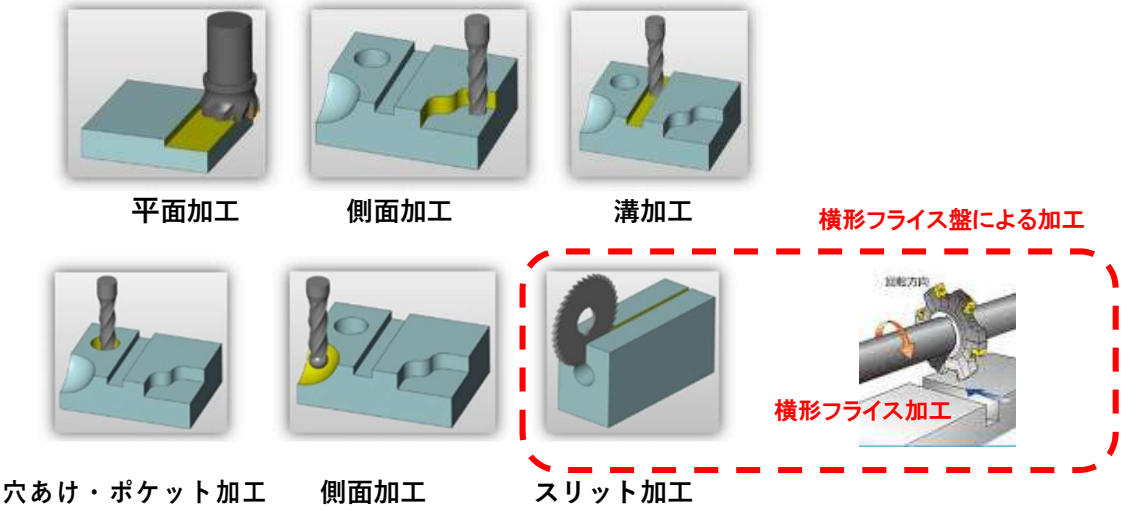


図 41:バイス（万力）による工作物固定

さて、フライス盤による加工は、円筒形の端面または円周上に多数の刃を持った、それぞれ正面フライス、 エンドミルと呼ばれる切削工具を回転させ、テーブル上の工作物を必要な方向にテーブルを進める（送る）ことで、工作物表面や溝を切削します主なフライス加工は以下の正面フライス工具とエンドミル工具により行われます。図 42 中で、エンドミルによる曲面加工は 2 軸を同時に動かさなくてはならないため、手動操作の汎用フライス盤ではできません。



そ

図 42：　代表的なフライス加工

(2)　ツーリング工具

フライス盤での加工にはツーリング工具が必要です。ツーリング工具は切削工具を主軸に取り付けるために使用する保持具の総称で、図のように切削工具を保持するツールホルダーと工作機械の主軸に固定するシャンク部で構成されます。

① ツーリング工具のシャンク部

ツーリング工具にはシャンク部があります。この部分は、機械主軸につながるテーパ形状(径・幅・厚みなどが、先細りになっている状態でテーパー角度 7/24 とは軸方向 24mm に対して直径が 7mm 小さくなることです。)の部分で、切削工具をマシニングセンタなどの主軸にテーパ形状により芯のブレがないよう確実に固定保持するのが目的です。

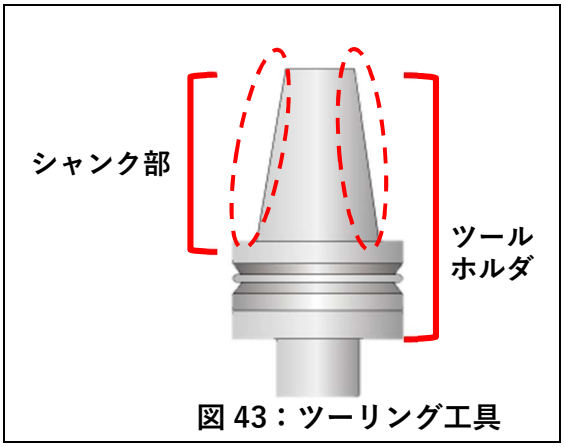


図 43：ツーリング工具

ツーリング工具のシャンク部は、汎用フライス盤用と マシニングセンタ用の 2 種類に分けられ、形状や機構により「BT」「NT」「HSK」のように呼ばれます。

また、「30 番」や「40 番」など、シャンク部を番手で呼ぶこともありますが、これは主軸に差し込むシャンクの大きさによる分類によるものです。

歴史

フライス盤が発明されたのは 1818 年頃と言われていますが、今日のような工作機械とツーリング工具を分離できるシャンク部のあるツーリング工具が開発されたのは 1860 年代と言われています。米国ブラウン&シャープ社製フライス盤のテーパである、モールステーパが米国規格として制定されたのは 1922 年でしたが、このシャンク部のテーパー角度は緩かったので、機械主軸に挿入するとクサビ効果で抜けない現象が起こりました。そこで、工具の交換を容易にするためと横送りの加工にも十分耐えられるように現在の 1/24 テーパシャンクが 1939 年米国で開発されました。

その後マシニングセンタが開発され、日本でも 1959 年にはマシニングセンタが実用期に入ったため、1969 年世界に先駆けて日本が自動工具交換用テーパシャンクの業界規格を制定しました。これが(社)日本工作機械工業会規格(MAS 規格)です。一方米国は 28 種類ものメーカー規格の統一に時間のかかり 1978 年に、NC工作機械にあまり積極的ではなかったドイツが 1979 年に、さらに国際規格の ISO 規格が 1983 年に制定されました。業界規格の制定が早かった日本の「BT シャンク規格」は 1986 年に JIS 規格(国家規格)に制定されましたが、日本製マシニングセンタの急速な世界市場への浸透にもかかわらず、国際規格である ISO 規格にはなかなか盛り込まれず 2007 年にようやく制定されました。

② シャンクの種類

ツーリング工具のシャンク部の形状にはいくつかの種類があり、それぞれに特徴があります。ここではマシングセンタとフライス盤に関する主な4種類の形状を紹介します。

・BT シャンク

BT は「ボトルグリップテーパ」を略した規格名称です。主にマシニングセンタや複合加工機に使用されるツーリング工具の規格で、ATC（自動工具交換装置）で使用するボトルグリップがありシャンク部のテーパ部で主軸に固定します。シャンク部端にプルボルトがあり、これを主軸内のコレットが引っ張ることで主軸へ引き込みしっかりと保持します。

主軸との接触箇所は、軸方向 24mm に対して直径が 7mm 小さくなる 7/24 テーパ形状となっています。

注：マシニングセンタ、複合加工機については 7-8 章参照

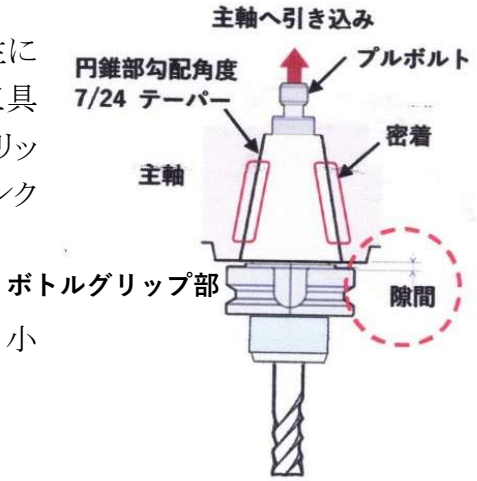


図 44：BT シャンク（「はじめの工作機械」）

・BBT シャンク

BT シャンクは上記図 44 のように主軸とホルダの互いのテーパ部分が接触しますが、切削熱による加熱や重切削による応力によってシャンク部が主軸に強く食い込んでしまい、Z 軸方向の加工精度の誤差が発生したり、ツーリングの取り外しが困難になったりする問題がありました。そこで、テーパ部に加えてホルダのツバ（フランジの端面）と主軸の端面を接触させる「2 面拘束」により保持することで剛性を上げ、主軸テーパ部へ食い込みにくく且つ曲げ剛性を向上させました。これが BT シャンクを改良した BBT シャンクです。

BT シャンクと BBT シャンクには取り付け互換性はありますが、2 面拘束の機能を十分発揮するには、「BBT 対応主軸」と「BBT シャンク」の組み合わせが必要です。

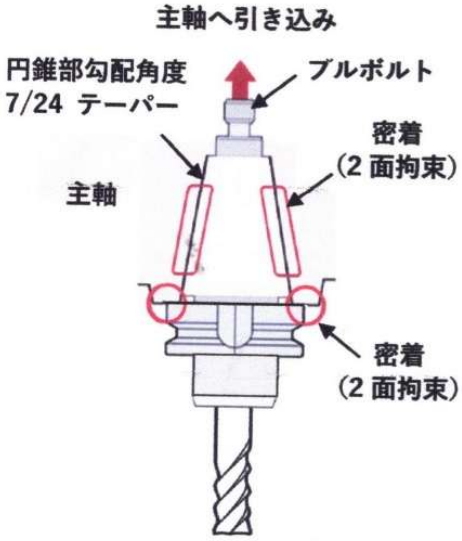


図 45：BBT シャンク（「はじめの工作機械」）

・HSK シャンク

HSKシャンクは短く軽量が特徴でドイツ語の Hohlschafte-Kegel（中空のテーパシャフト）から名付けられました。

シャンク本体が中空故、軽量であるため ATC（自動工具交換）の交換時間は短いと言われています。中空構造により切削工具やツールホルダにかかる遠心力が小さく、好

バランスと軽量さが求められる高速回転の切削にも対応できます。また、シャンク部勾配は 1/10 と小さいため、繰り返しの工具脱着位置精度にも優れています。

HSK シャンクは BBT シャンクとおなじ「2 面拘束」方式で、図 46 のようにシャンクのテーパー部とフランジ部の 2 カ所で保持するため、工具の振れや振動に強く金型などの高精度加工で使われます。また、シャンク部にはBTやBBTシャンクで使われている「プルボルト」はなく、主軸の回転数が上がることでシャンクの内部から外側に押し付け、締め付けがより強くなクランプ（固定）します。主軸の回転数が上がることで、締め付けがより強くなります。

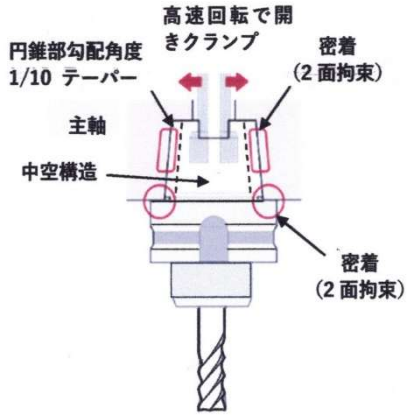


図 46：ＨＫＴシャンク（「はじめの工作機械」）

NT シャンク

NT とは「ナショナルテーパ」を略した規格名称です。引きねじ（ドローバー）を手動操作によって固定するタイプのシャンクで、汎用フライス盤など、手動で工具を交換する工作機械への取り付けに用いられます。

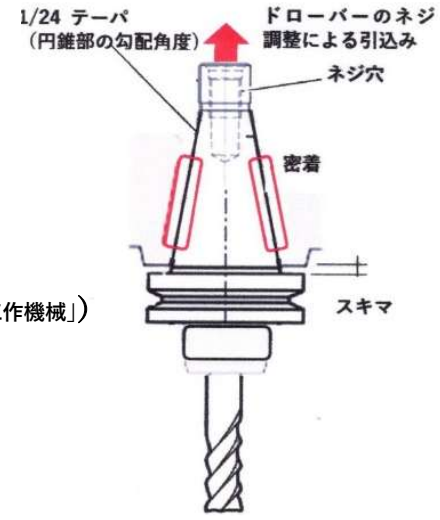


図 47：ＮＴシャンク（「はじめの工作機械」）

◆ツールホルダーとアダプター（図 50 参照）

・ツールホルダー

ツールホルダは切削工具をマシニングセンタなどの主軸に取り付ける際、切削工具の保持に使用され、切削工具を保持する部分の形状により、ホルダとアーバーの 2 種類があります。

ホルダーは切削工具または以下に述べるツールアダプターを保持する部分が写真のような凹形状のものです。そして、アーバーは、切削工具を保持する部分が図 48 のように凸形状となっているものです。

図48：ツール・ホルダーとアーバー

・アダプター

ツールホルダに取り付けて切削工具を保持する 装置のアダプターにはいくつかの種類がありますが、代表的なものは切削工具を固定するコレットとチャックユニットです。

・コレット

すり割り（スリット形の溝）を利用して切削工具の柄の部分（シャンク）が真っすぐな切削工具を取り付けるための円筒状のアダプターです。外径がまっすぐなものを「ストレートコレット」、テーパー状のものを「テーパーコレット」と言います。また、写真右端のようにスリ割りを多くすることでコレットが均一に締まり、工具を高精度に保持できるスプリングコレットもあります。

図49：コレットとチャック

・チャック

直径方向に収縮して切削工具やツールアダプタなどを保持します。

以下表は立て形マシニングセンタ/NCフライス盤のツーリングの構成例です。

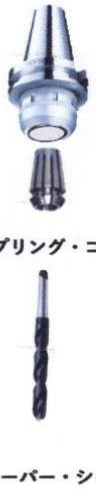
切削工具名	精密ボーリング	正面フライス	ドリル	テーパードリル	エンドミル
ツーリング名	アーバー	アーバー	アダプター＋ホルダ	コレット＋ホルダ	コレット＋ホルダ
構成例	マイクロボーリングアーバー	正面フライス・アーバー 正面フライス	ドリル・アダプター ストレート・シャンクドリル	 スプリング・コレット テーパー・シャンクドリル	ストレート・コレット ストレート・シャンクエンドミル

図 50：フライス加工のツーリング構成

(3)ツーリング工具の主軸への取付け

(2)②「シャンクの種類」(38 頁)でも述べたように、マシニングセンタやフライス盤の主軸端はテーパ形状になっているので、ツーリング工具は主軸の中にねじやバネで引き上げられ、主軸とシャンク部が図の赤色破線部(テーパー部)でしっかり密着して固定されます。

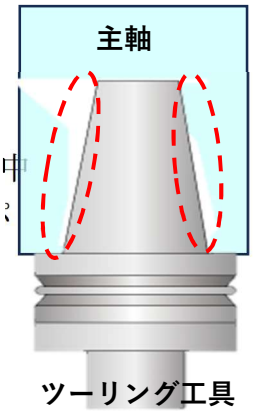


図 51：主軸端形状

さて、ツーリング工具の主軸取付けは、わかり易く単純化した以下図のように、一部の汎用フライス盤(図 52)では主軸ドローバーのカップリングナットを手で締めて、切削工具がつけられたコレットのテーパー部と主軸テーパ部を密着させます。

また、マシニンセンタやNCフライス盤等(図 53)ではドローバーの先端につくコレットチャックがツーリングに取りついたプルボルト(注)をバネ(皿バネ)が引っ張り、ツーリングのテーパー部と主軸テーパ部を密着させます。なお、ツーリングは油圧/空圧によりドローバーが押されると外れます。

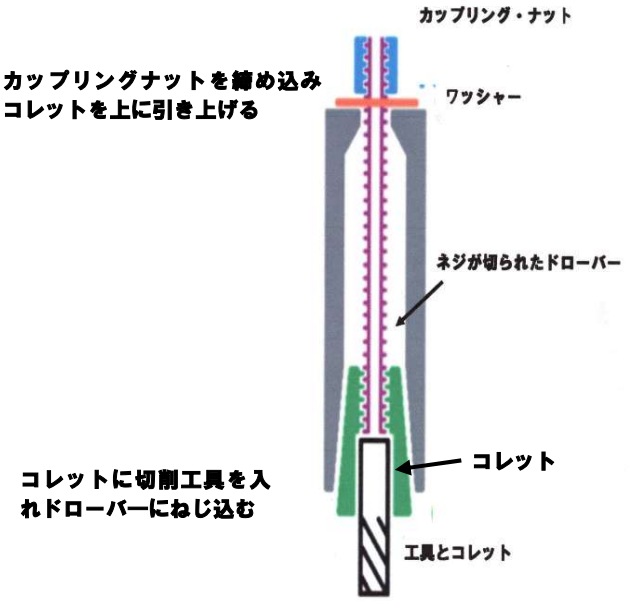


図 52；汎用フライス盤　ドローバーの働き

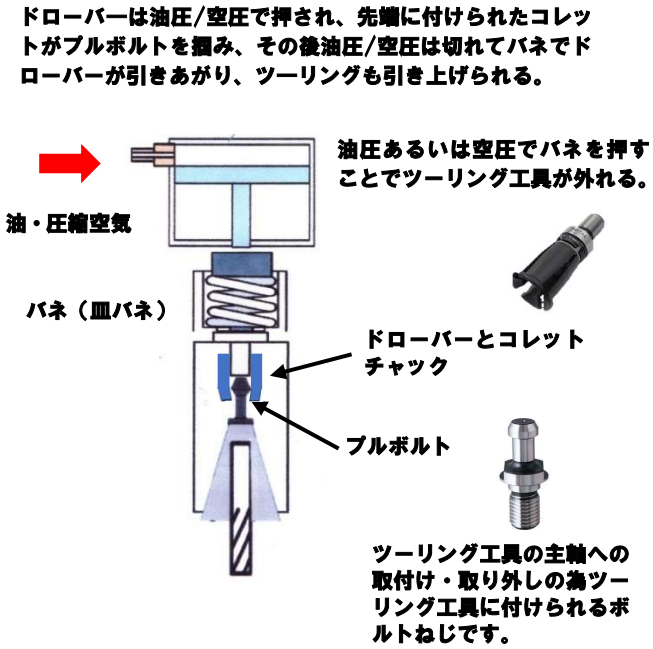


図 53；ＮＣフライス盤・マシニングセンタドローバーの働き

7-5. 金切りのこ盤

切削加工するためにはまず大きな素材から必要な大きさの素材を切り出します。
この作業は「材料取り」と呼ばれ、一般に以下の「金切りのこ盤」が使用されます。

(1) 弓のこ盤

弓のこ盤は のこぎりや糸のこなどの手作業用工具を自動で切削できるようにしたものです。図54は弓のこ盤で手のこ工具が自動で動く機械です。

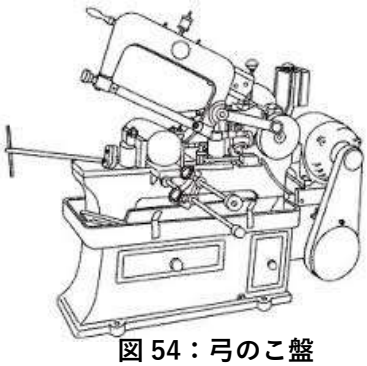
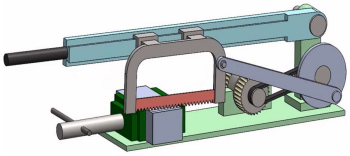


図 54：弓のこ盤



弓のこ盤基本構造
（Power Hacksaw- Sai Shankar Rudra）

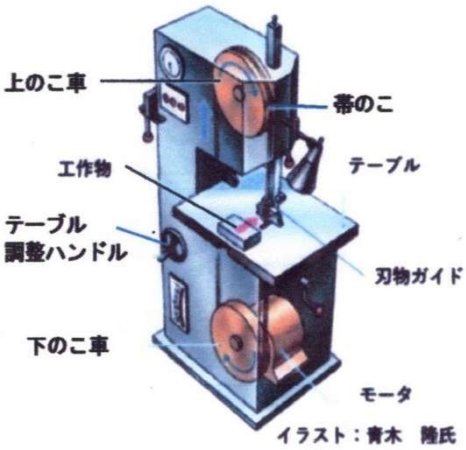
(2) 帯のこ盤（バンドソー）

帯のこ盤（バンドソー）は鉄素材切断用のほか木工素材切断用や食品加工用がありますが、ここでは鉄製品加工用について述べます。
のこ刃を帯状にして回転しながら金属を切断する帯のこ盤は丸棒やパイプ、鋼材の素材を切断する際に使われます。
帯のこ盤の帯のこ刃は、写真のようにすべて同じ方向を向いたループ状で、一方向に素材を切断します。切断方向が一方向なので、切断面がきれいという特徴があります。

◆立形帯のこ盤 （図 55）

上下にそれぞれのこ車があり、下ののこ車がモータ駆動され、刃物ガイドで帯のこの動きを支持して循環させます。また速度、送りが可変であるため、各種材料に対して最適な条件を設定することができます。

立形帯のこ盤（立形バンドソー）は汎用性があり、輪郭形状の曲面切断や長尺素材の切断などの複雑な加工もできます。特殊な工具や治具が不要で素材をのこ刃に押し付けるだけで切断できるので、多品種少量生産に向いています



◆横形帯のこ盤(図 56)

帯のこが水平方向を向き、のこ車は左右にあり切断位置も水平です。素材をバイスなどで固定し、循環する帯のこ刃を上から下ろして素材を切断します。

横形帯のこ盤は素材が固定されて一定間隔、一定方向にのこ刃が動くため、正確な寸法に切断できます。細かい素材の切断にも適しています。また、自動化のための送り装置など周辺機器は、横形が充実しているため少品種大量生産の場合は、横形帯のこ盤が使用されています。

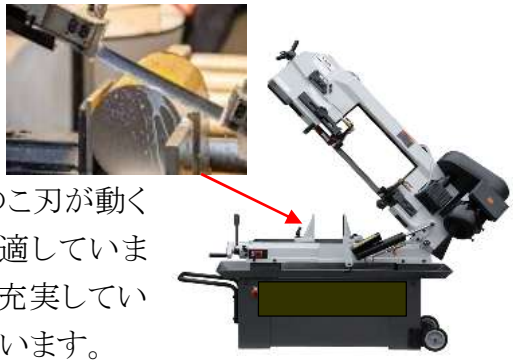


図 56:横型帯のこ盤と切断

7-6. 形削り盤、立削り盤、平削り盤

形削り盤、立削り盤、平削り盤はともに切削工具としてバイトを使用する機械ですが加工能率が良くないため、今日ではフライス盤が用いられることが多くなっています。

(1) 形削り盤

形削盤はシェーパーとも呼ばれ、水平なテーブル上に工作物を固定し、切削工具(バイト)を直角にあてて表面を加工します。テーブルは固定され、切削工具が前後(水平方向)へ間欠的に往復運動します。比較的小さい工作物の表面加工に用いられます。バイトを戻す時は加工をしないため、早戻りして作業効率を上げる工夫がなされています。

小物の少量生産に用いられています。

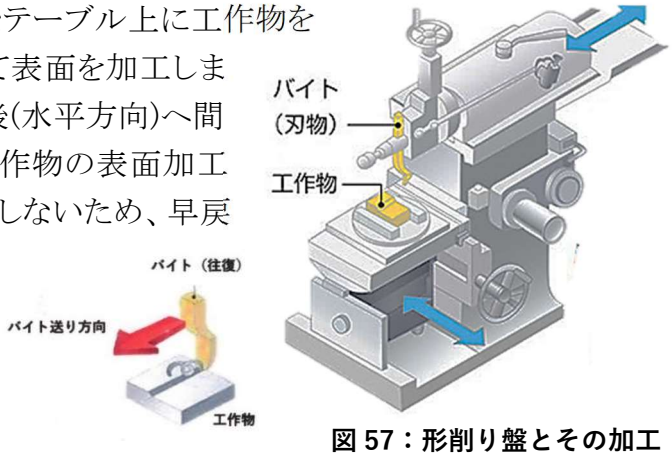


図 57：形削り盤とその加工

(2) 立削り盤

立削り盤は、水平なテーブル上に工作物を固定し、刃物台に切削工具(バイト)を取り付け、ラムが垂直方向に往復運動をして、穴の内外面を加工します。

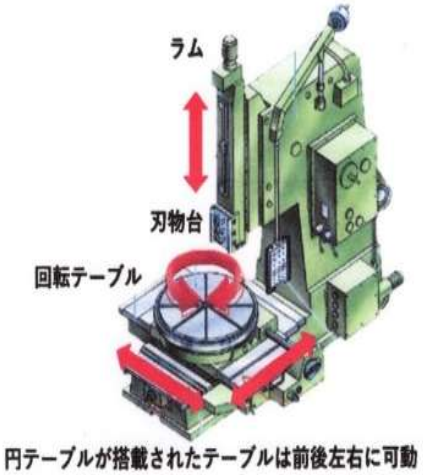
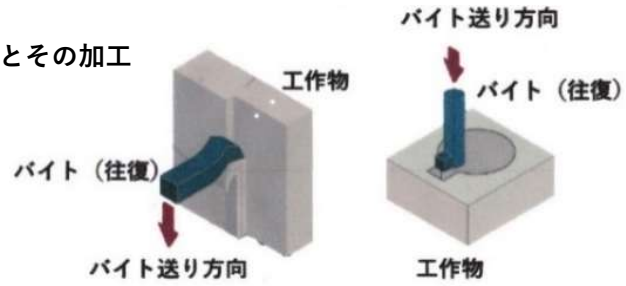


図 58. 立削り盤とその加工



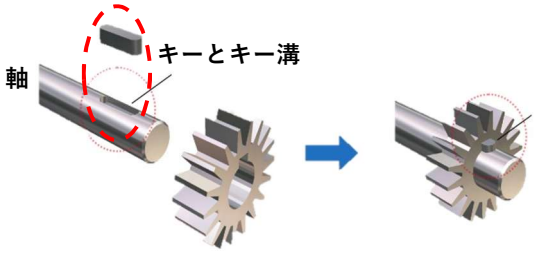
立削り盤は主として穴の内面にキー溝(注)などの溝加工を行うために用いられ、スロッターとも呼ばれます

立削り盤には図 58 のようにテーブルに回転割り出し機能があり、複数溝(写真)の加工では、それぞれの溝位置に位置決めできます。

複数溝からなる部品
(株) 城南キー

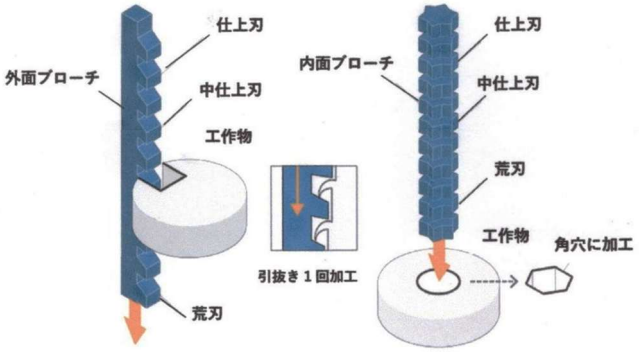
(注) キー溝加工

キーとは、軸と回転する機械要素をすべらないように締結させるためのもので、これにより歯車などへ軸から動力を効率良く伝えることができます。キーは単純な部品で、軸に図のような溝を加工して叩き込まれます。この溝作ることをキー溝加工と呼びます。なおキーの大きさは、軸の太さによって決まります。



前頁に述べたように、立て削り盤加工は、主にキー溝加工に用いられ、所定のキー溝の形に沿って切削工具を上下運動させて加工を行います。ただし、加工に時間がかかるので大量生産には向いてませんが、個々の形状ごとに加工するキー溝の大きさや長さを変えることができるのが長所といえます。

(参考)ブローチ加工



ブローチ加工(内面・外面)

ブローチ加工は、左図のように荒加工から仕上げまで必要な刃が 1 本の切削工具についたブローチ工具を引き抜くように動く「ブローチ盤」で、工作物の内面や外面を 1 回で一気に加工します。ブローチの切削工具は、加工形状にあわせて専用に設計・製作されるので、キー溝加工する場合、立て削り盤の加工に比べ、作業時間が大幅に短縮でき大量生産向きです。但し、切削工具は工作物を貫通するので底のある工作物の内面加工には使えません。

(3) 平削り盤

平削り盤は大きな工作物の表面加工に向いた大型機で、プレーナーとも呼ばれています。テーブル上に工作物を固定し、切削工具(バイト)を直角に押し当てて工作物の表面を削ります。切削工具は固定され、工作物の幅方向にのみ移動し、テーブルが間欠的に前後に往復運動します。

またコラム(支柱)部にも切削工具を取付けられ，工作物の側面も同時に切削することもできます。機械は門形と片持ち形があり，コラムが 1 本の後者のほうが幅広いものを加工できます。最近では，バイトの代りにフライス工具を取付け，フライスにより多様な加工が行える平削り盤型フライス盤、「プラノミラー」(参考)が一般的になっています。

門形平削り盤

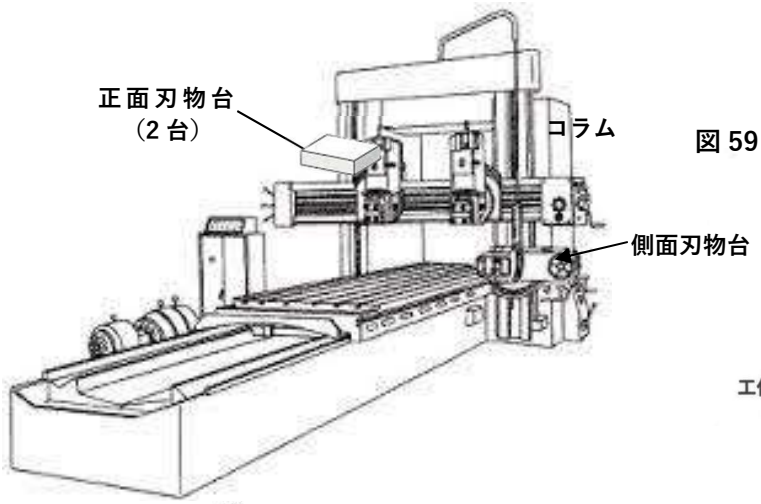
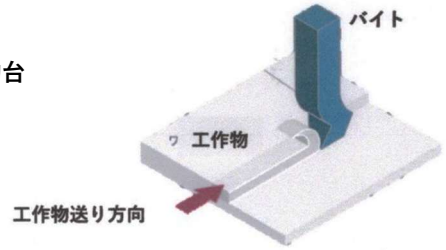
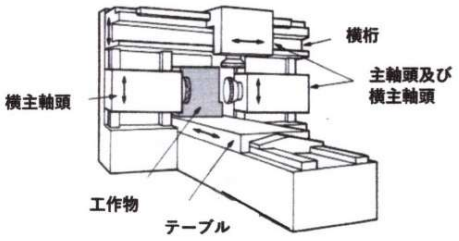
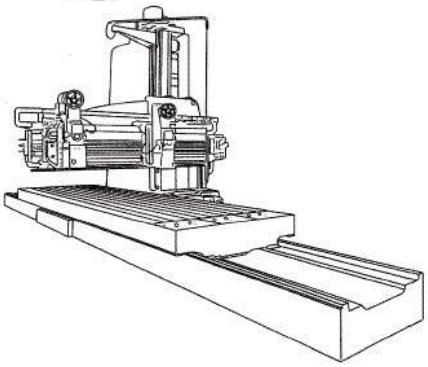


図 59　平削り盤とその加工



プラノミラー





片持ち形平削り盤

門形の横桁を片持ちで支える構造の平削り盤

Manufacturing Engineering and Technology 3rd Edition
S. Kalpakjian

(参考) 図のプラノミラーは横主軸頭が両側にあるので、工作物の両側面と上面を共に加工できます。

7－7　歯車加工工作機械

歯車の形状は図 60 のように「平歯車」と「傘歯車」に大別されます。そして、つるまき状の「はすば歯車」、回転運動を直線運動に変える「ラック・アンド・ピニオン」、回転方向を垂直に変換する「円筒ウォーム」など多種多様なものがあります。

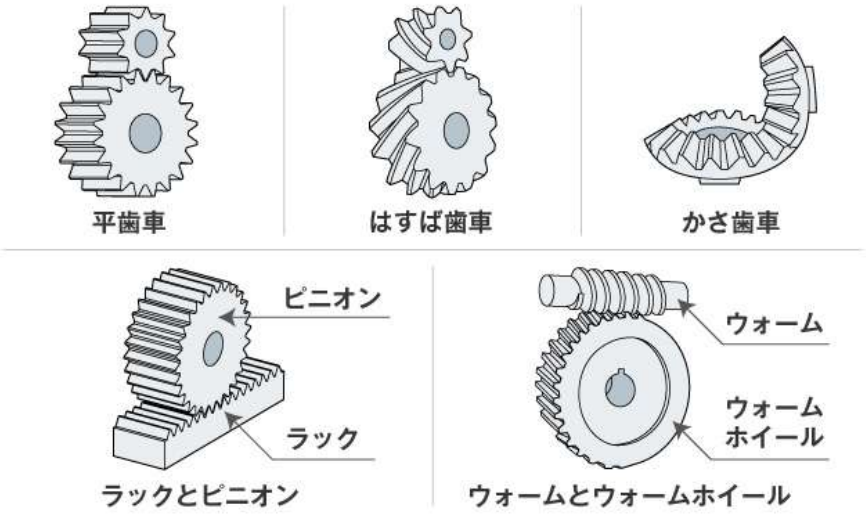
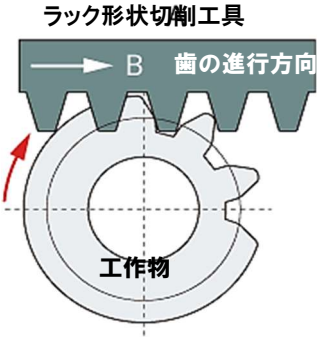


図 60：主な歯車の種類

歯車は、円柱鋼材の切断、旋盤によるブランク（歯車加工前の穴あき状態）加工、歯切り（歯部の削り出し）、焼き入れ（熱処理）、研削、歯研ぎといった工程を経て作られます。それぞれの形状の歯車を加工するには専用の歯切り盤として「平歯切り盤」および「傘歯切り盤」があります。

(1) ホブ盤による歯車加工　（創成法）

歯車の歯切りには、「創成法」と「成形法」の2種類があります。創成法は、歯車の素材になる円盤（工作物）にラック形状の切削工具（ホブ）を押しつけ、切削工具と工作物の相対運動で歯型形状を作りながら、円盤の周囲を削り込む加工法です。一般的な歯車加工にはホブ盤が使用されています。また、傘歯車の加工も同じ加工方法で傘歯車歯切り盤が使用されます。（図 61 参照）　創成法は精度の高い歯車ができる反面、加工コストがかかるデメリットがあります。精密歯車では、歯を刻んだ後に歯面を研磨して仕上げることがあります。



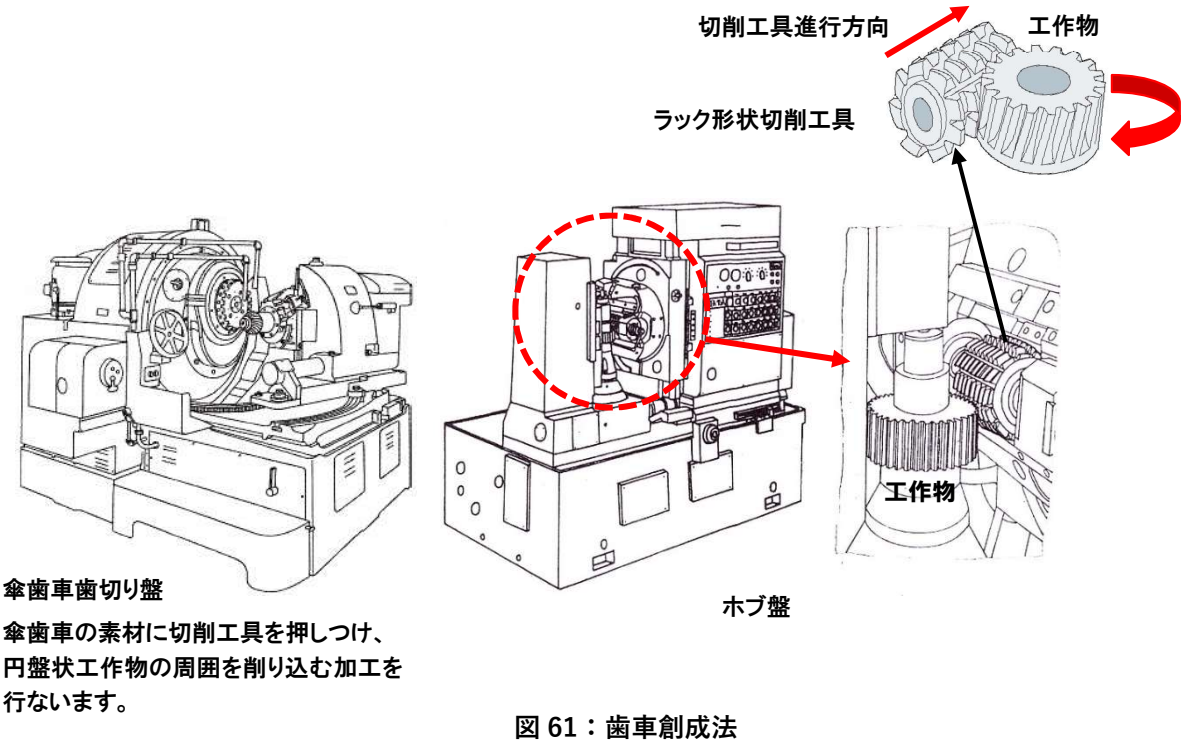


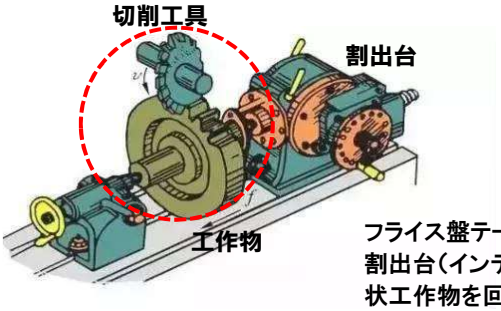
図 61：歯車創成法

(2) フライス盤による歯車加工 (成形法)

成形法は歯車の溝と同じ形状をした切削工具を用いて、歯を一枚ずつ加工します(図 62) そして、一枚の加工が終えると、次の歯の加工のために、刃物を適切な位置に移動します。例えば、汎用フライス盤でこの作業をするには、図 62 の割出台(インデックステーブル)を使用して歯切りの位置決めを行います。この方法は手間がかかる割に「歯車創成法」に比べ精度が落ちますが、NC フライス盤と NC 割出台を使用することで生産性は向上します。

歯車溝形状の工具で円盤状工作物を歯切り

(TKMCE Mechanical Eng. Labs)

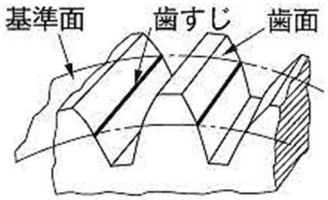


フライス盤テーブル上に置かれた割出台(インデックステーブル)で円盤状工作物を回し、歯切り位置を決めます。

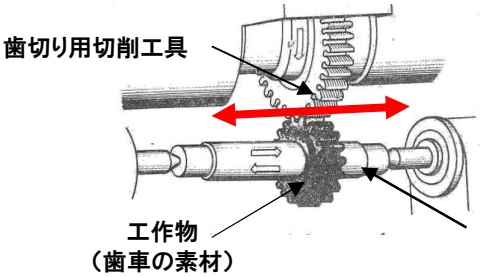
図 62：歯車成形法

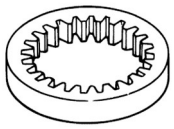
(3) ギア・シェイパーによる歯車加工

歯切り盤には、ホブ盤の他に「ギヤ・シェーパー」もあります。この加工は歯切り用切削工具を軸方向に動かすこと(赤矢印)により歯すじ(注1)を切削します。平歯車の他、円筒形の内側に歯すじを持った内歯車(注 2)や軸と歯車が一体の部品(注 3)などホブの可動域が保持できない場合に使用できます。



注 1:歯すじ





注 2:内歯車

注 3:軸と歯車が一体の部品

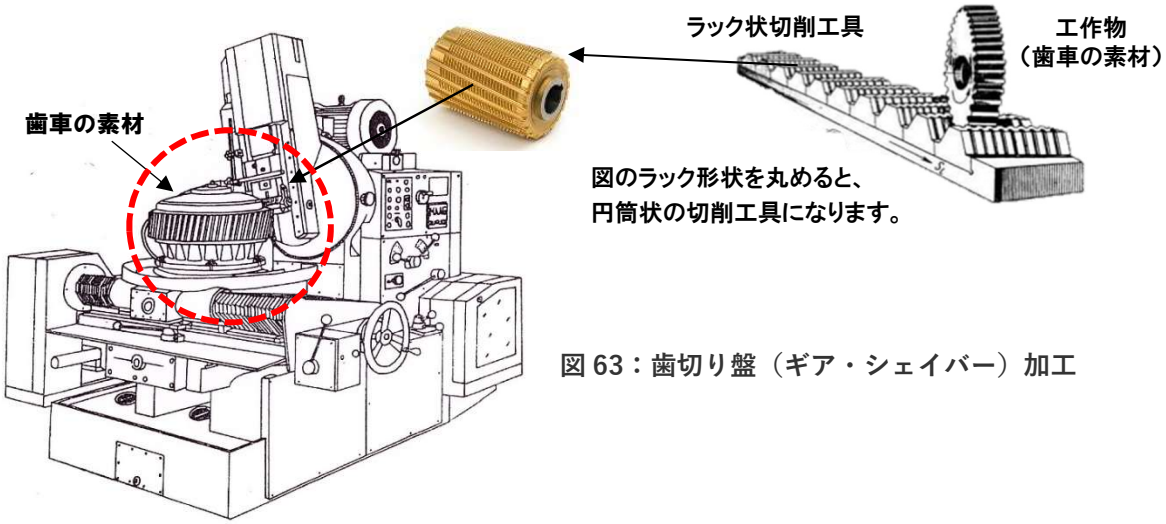


図 63:歯切り盤(ギア・シェイバー)加工

7−8 研削盤

部品加工では、加工の条件や素材などの様々な要因により、部品は図面の寸法通りにぴったりと作れません。そのため、加工図面には部品の各部寸法に加え、それぞれの寸法に対して許される誤差である「寸法公差」が記載されています。

しかし、部品寸法が公差内に出来上がっても、その部品がしっかりと所定の形状をしていないと、部品同士組み付かないというような問題が起こります。

そこで、「寸法公差」に加えて形、姿勢や位置に許される誤差を定義した「幾何公差」も使うことで、幾何学的に整った形状にも仕上げられ設計通りの正確な部品を作ることができます。研削盤はこれら公差をより高いものにするため、旋盤やフライス盤等で切削加工し、熱処理(注)を行った後に少しづつ研削を行い仕上げる工作機械です。

(注) 熱処理とは金属材料に加熱と冷却を加え、形を変えずに性質を向上させる方法をいいます。 熱を加えて硬くすることが多く、切削加工が難しいので、研削加工で仕上げます。

研削盤には対象とする工作物の形状によって様々なタイプがありますが、大きく分けて、平らな平面を削る(1)平面研削盤、円筒状の工作物の外側を削る(2)円筒研削盤、円筒状の工作物の内側を削る(3)内面研削盤、歯車の歯面を仕上げる(4)歯車研削盤があります。

(1) 平面研削盤

平面研削盤は、工作物の平面を研削する機械です。平面研削盤のテーブルに工作物を固定、砥石を高速回転させてテーブルを動かして表面を一定幅毎に(図 65)精密加工することができます。平面研削盤は面のそり・ゆがみを修正し、面を均一に滑らかに 仕上げます。

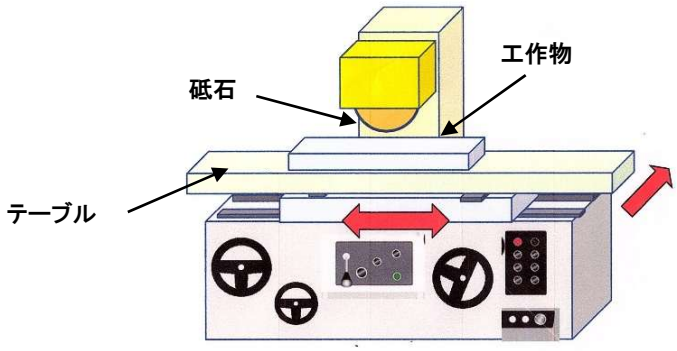


図 64:平面研削盤

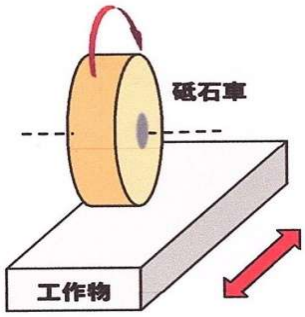


図 65:平面研削盤加工

(2) 円筒研削盤

円筒研削盤は、円筒形状の工作物や細長い形状の工作物の径・幅・厚みなどが、先細りになっているテーパ形工作物の外周面を研削する機械です。旋盤のように円筒研削盤の主軸に工作物を固定して回転させ、砥石も高速回転させて工作物の表面を研削することで、工作物の円形断面に正確な丸み(まんまるさ)をつけて真っ直ぐな丸みのついた円筒形状に仕上げることができます。

円筒研削盤には工作物が回転しながら砥石が切り込みを行い、左右に移動する、長い工作物の研削に使用されるトラバースカット(図 67)と、工作物も砥石も左右に動かないで、砥石の切り込みだけで研削する量産部品等の加工に向くプランジカット(図 68)があります。

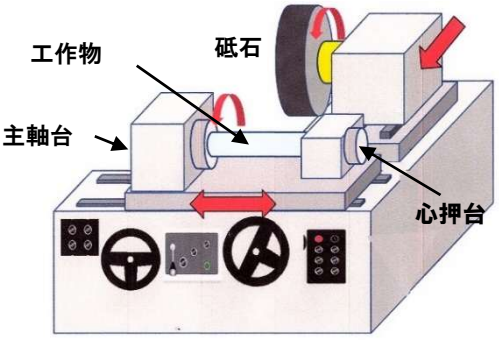


図 66:円筒研削盤

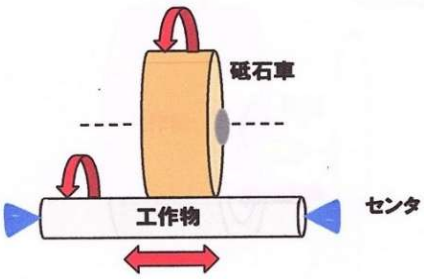


図 67:円筒研削 トラバース研削

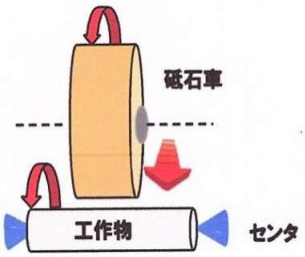


図 68:円筒研削 プランジ研削

(3) 内面研削盤

内面研削盤は、穴の内面を研削する機械です。研削は工作物と砥石を同時に回転させながら行います。工作物の大きさにより、普通形とプラネタリ形に分類されます。

普通形(図 70)は工作物の穴の中に砥石を入れ、工作物と砥石を共に回転させ、砥石の切り込みと前後の動き(送り)により研削を行います。

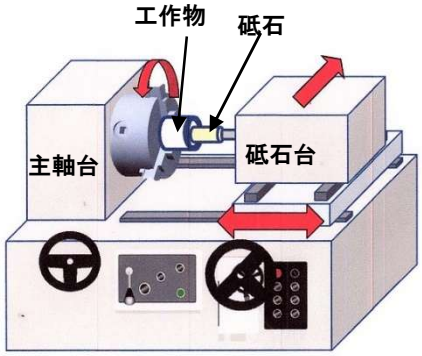


図 69:内面研削盤

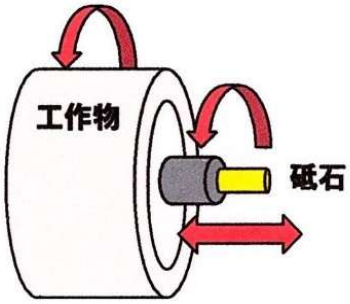


図 70:普通形の内面研削

工作物のサイズが大きくて回転が困難な場合は、工作物を固定して、砥石を回転させながら公転運動させるプラネタリ形の研削方法(図 71)を使います。

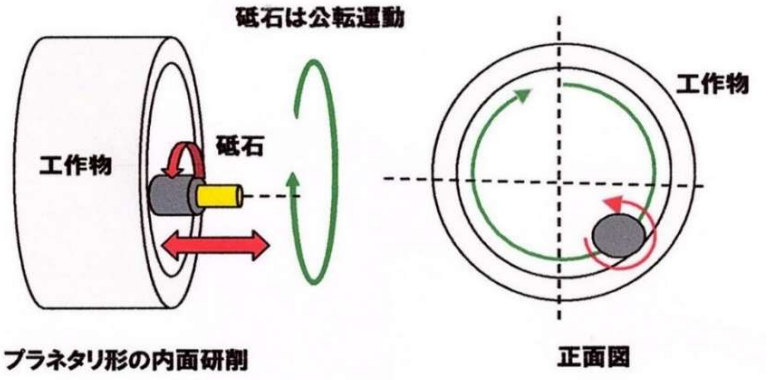
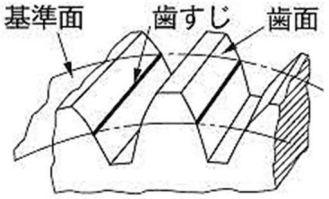


図 71:プラネタリ形の内面研削

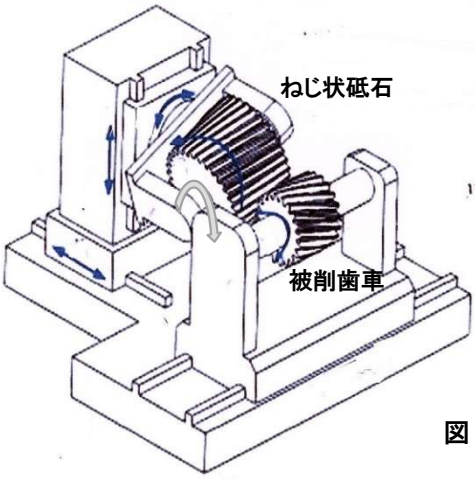
(4)歯車研削盤

歯車研削盤は砥石が高速回転し、ホブ盤等の荒加工で歯切りされた歯面部分(注)を研削する機械です。歯車研削にも、歯切り加工と同様に「創成研削」と「成形研削」の2種類があります。



注:歯面

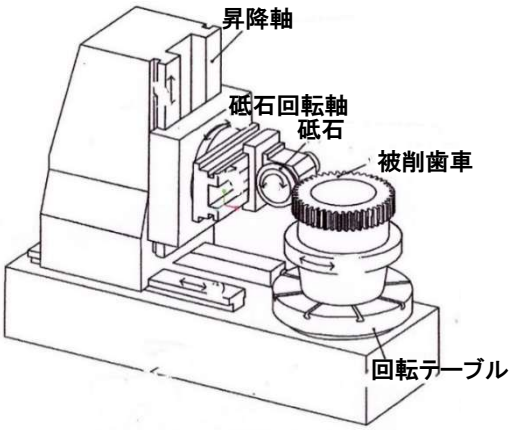
創成歯車研削盤は歯車とネジ状の砥石が相対的に動き研削する方法で、自動車関連の歯車量産で広く使用されています。



ねじ状砥石で工作物(歯車)に研削を行います。
(図:MORESUPERHARD)

図 72:創成歯車研削盤

成形歯車研削盤は歯車の歯形と同じ形状の砥石を使用して、歯面を一歯ずつ研る方法です。創成歯車研削盤が量産で広く使われているのに対して、成形歯車研削盤は単品歯車や試作歯車の加工に用いられています。



歯車溝形状の砥石で工作物(歯車)に研削
(図:MORESUPERHARD)

図 73:成形歯車研削盤

研削盤の種類には、このほか工作物をつかまずに円筒外周を研削する「心なし研削盤」や摩耗や損傷した切削工具を再研削する「工具研削盤」などがあります。

7－9 NC工作機械

1952 年に米国マサチューセッツ工科大学(MIIT)で、航空機用複雑形状部品の切削が制御できる装置を付けたフライス盤（シンシナティ・ミーリング社製）が完成しました。この制御方法が数値制御(Numerical Control)と名付けられ今日に至っています。

試作機の NC 装置には回路素子に膨大な数の真空管が使われ、写真 4 からもわかるように、制御装置は機械本体以上の大きさになりました。

その後トランジスタや IC の登場で、半導体や電子部品を使用した回路をプリント盤に実装し、プリント盤を互いに配線してつなぎ、特定機能を出すことが NC 装置の基本となりました。このため、この時代の NC は一般的にハードワイヤードＮＣ（Hardwired Numerical Control）と呼ばれます。

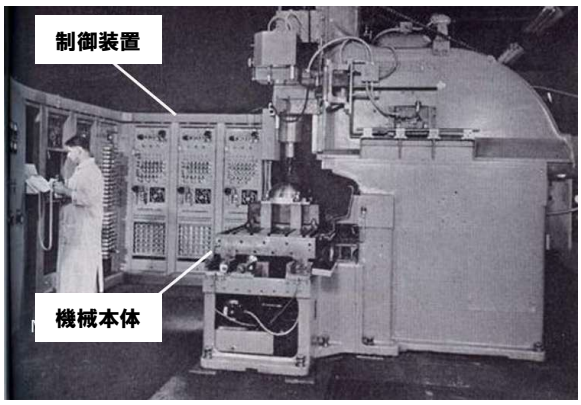


写真 4：MIT 開発の NC フライス盤

1970 年代にマイクロプロセッーサー(MPU)が開発され、ソフトウェアプログラムを入れ替えることで別の加工機能を担うことが可能になったことから、CPU を持った小型コンピューター内蔵のNC装置という意味からCNC（Computerized Numerical Control ）と呼ばれ、制御装置の大きさも小さくなりました。さらに、初期の CNC 装置（写真 5）にも搭載されていた紙テープ読み込み装置（テープリーダー）も、記憶容量が多い記憶媒体の開発でなくなり、プログラムの保存や編集もできるようになりました。このため装置全体がさらにコンパクトになりました。

そして、今日では CNC とパソコン（Windows OS 対応パソコン機能）の最適な融合が実現されたことにより、例えば、タブレット端末のようなタッチパネル画面を工作機械メーカーが独自に作成でき、ヒューマン・インターフェイスを自由に構築できるようになりました。また、ネットワーク接続機能の向上で NC 工作機械と上位管理システムの統合が実現し、工場内での機械情報収集や管理、遠隔地における稼働監視や保守も可能になりました。

写真 5：Excellon Automation 社 初期の CNC 装置
（テープリーダー付）

(1)　NC 工作機械の制御概要

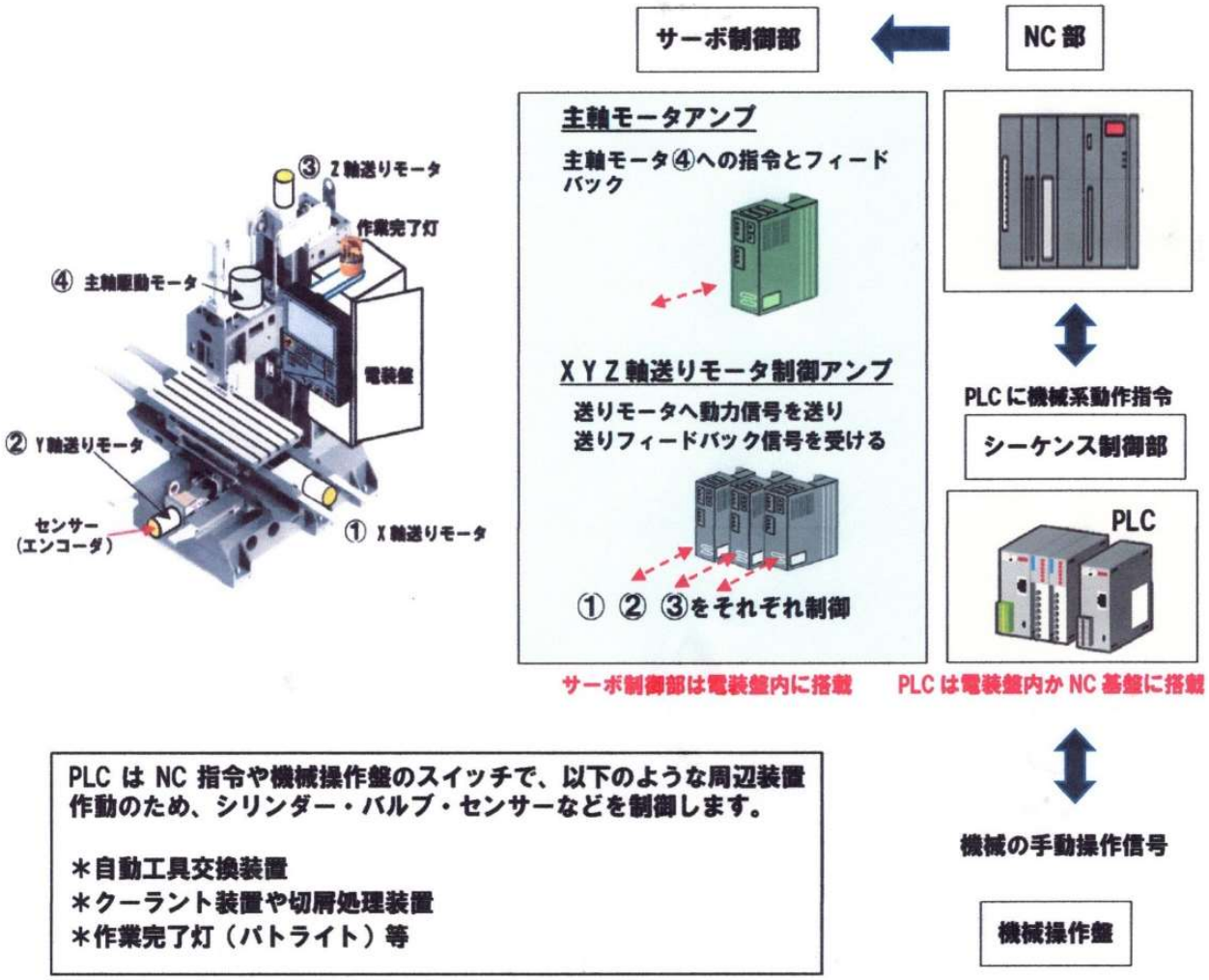


図 74: NC工作機械の制御概要

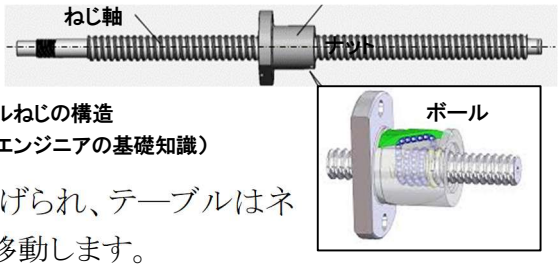
図 74 は工作機械を制御する上で重要な NC 部、サーボ制御部とシーケンス制御部からなるNC装置の機能概要をまとめたものです。

NC 部は NC プログラムに従って送りモータと主軸駆動モータを制御するサーボ制御部に動作指令を出します。また、自動工具交換装置など工作機械の周辺装置の起動・停止を制御するための指令をシーケンス制御部に出します。

① NC送り駆動系について

NC 工作機械の主要運動要素が NC 制御で直線移動するには、「6－3 工作機械の送り（11 頁）で説明しましたように、送りモータの回転を直線運動に変換するボールねじが一般には使われます。次頁に再度ボールねじの構造を図示しますが、ボールねじはネジの山とナットの間に鋼球が入り摩擦力がほとんどなく、軽く回る精密ねじです。

ねじのナット部は図 75 のNCテーブル送りの例ではテーブル下面の台座に取付けられます。



ボールねじの構造
（工作機械設計エンジニアの基礎知識）

そして、送りモータは継手を介してボールネジに繋げられ、テーブルはネジが回ることでガイドレール（あるいは摺動面）上を移動します。
)

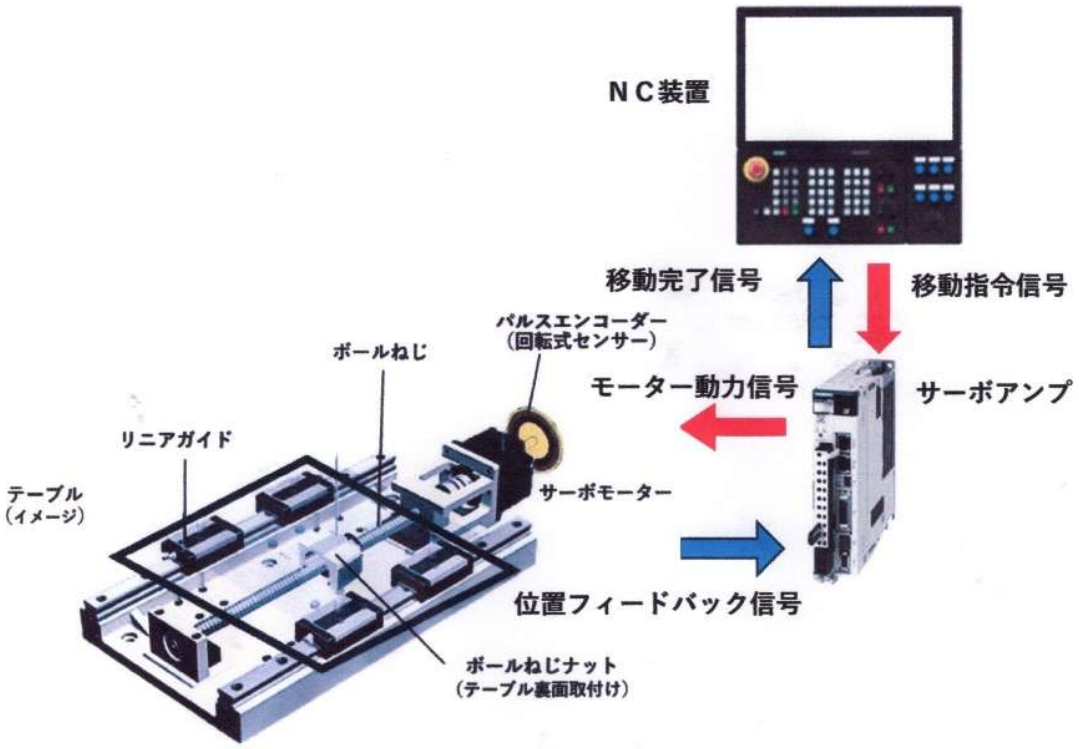


図 75: NC送り駆動系構成概要 セミクローズド・ループ

今図 75 で、NC装置の NC 制御部はサーボ制御部（サーボアンプ）に NC プログラムに書かれた運動体（図 75 ではテーブル）の運動速度と移動量を指令します。サーボ制御部はその内容に従い、ボールねじに連結された送りモーターであるサーボモーターを回します。そして、サーボモーターについた回転センサ（ロータリーエンコーダ）はテーブルの移動量と速度情報を逐次サーボ制御部に戻し（フィードバック）、NC制御部からの指令値と比較して誤差補正をサーボモーターに行います。このように構成されたフィードバックシステムを「サーボ機構」といいます。

以上説明しました「セミ・クローズドループ方式」と呼ばれる制御方式は、構造が簡単で応答が速いことで広くNC工作機械に使われています。しかしながら、ボールねじの誤差、高速回転によるボールねじの熱膨張やたわみの影響により、指令値と実際の座標値に誤差が生じる場合があります。

そこで、ボールねじの機械的誤差に依存せず高い位置検出ができるように、実際に動く運動体（図 76 ではテーブル）の位置検出に熱膨張や摩耗などの機械的誤差が出ない材料で作られたスケール（光学スケール等）を固定部（運動体の案内部）に取り付け、運動体の実際の位置を検出することで指令した移動値と実際の移動値に誤差が生じにくくした「フル・クローズドループ方式」があります。
スケールの取付位置については参考に述べる定理に基づき決められます。

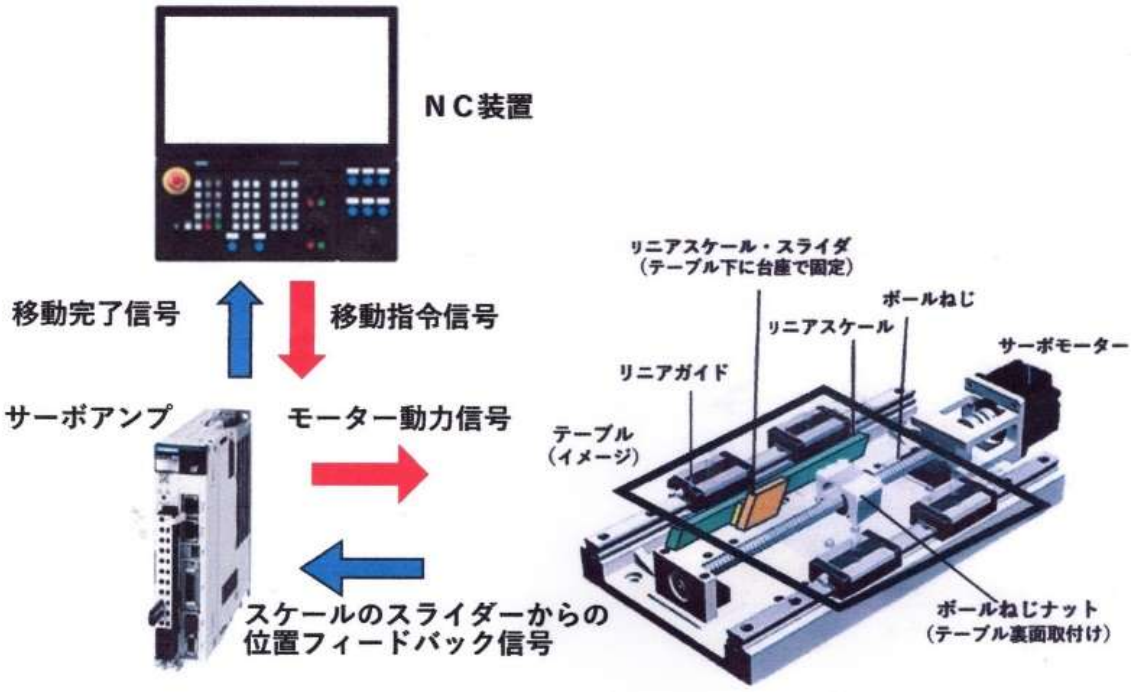
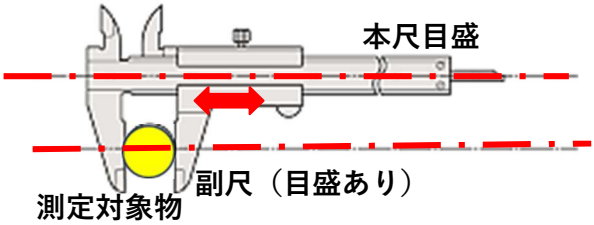


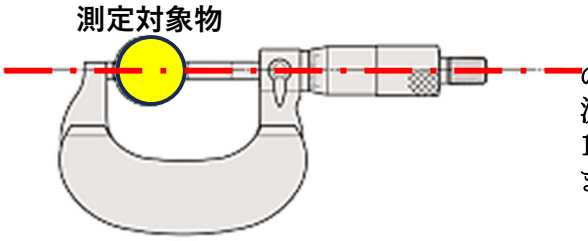
図 76： NC送り駆動系構成概要 クローズド・ループ

（参考）スケールの取付位置 アッベの定理
アッベの原理とは、「測定対象物と測定器の目盛りを一直線上に配置する方が精度良く測定できる」という原理です。以下具体例で説明します。



左図は「ノギス」と呼ばれる部品などの長さを測定する「長さ測定器」です。
構造は目盛りの付いた本尺と副尺から構成されています。物の厚さや径などを測定するため、測定対象物を外側から本尺と副尺で挟んだり、内側に当てたりして測定します。

図からもわかるように目盛りと測定対象物の位置が一直線ではありません。つまり、ノギスはアッベの原理を満たしていない測定器です。



次に左図のマイクロメーターは前頁のノギスのように対象物をはさみ込んでその大きさを測定する工具で、機種によっては、1μm(0.001mm)単位の側定が可能なものもあります。

マイクロメータでは図を見てわかる通り、測定対象物と目盛りが一直線上に配置されています。つまり、マイクロメータはアッベの原理を満たしている測定器です。

このように、マイクロメータはアッベの原理を満たしているので、ノギスと比べて精度が高い測定器と言えます。

このように、工作機械ではスケールを切削工具の刃先の同一線上に配置すれば高精度な位置決めのNC制御機構を設計することができますが、スペースの問題や加工中に切屑水がかかる等の設置環境問題を勘案して、図 76 の NC テーブル送りの例のように案内面により近い位置にスケールを配置して、テーブルの位置と指令値との誤差を少なくしています。

② シーケンス制御部について

NC工作機械では、送りモータ、主軸駆動モータの他に、切削油装置、切屑自動排出装置、自動工具交換装置(ATC)など油圧や空圧等で作動する周辺装置(77 頁)が使われています。

シーケンス部が機械操作盤スイッチによる手動運転信号や、NC部からの指令を受けると、PLC(プログラマブルロジックコントローラ)はそれら周辺装置類の起動や停止の制御を行います。PLC は FA 機器メーカーから工作機械メーカーが調達する場合もありますが、NC 装置メーカーが供給している場合もあり、その場合には NC 基盤に搭載されます。

(2) NC工作機械の座標系

NC 工作機械の座標系は、図 77 に示すように直交する 3 つの直進軸 X 軸、Y 軸、Z 軸と、それぞれの軸回りの 3 つの回転軸A軸、B 軸、C 軸から成ります。
それぞれの軸の正(＋)方向は、次のように決まっています(図 78, 図 79 参照)。
ただし、各軸の方向は機械の種類によって異なりますので注意が必要です。

Z 軸: 工作機械の主軸と平行な軸。
工作物から遠ざかる方向が正(＋)方向。

X 軸: Z 軸に直交する平面内で主に加工作業をする軸。
立て形マシニングセンタでは左右方向が X 軸で、右が正(＋)方向。

Y 軸: Z軸に直交する平面内でX軸に直交する軸。
立て形マシニングセンタでは前後方向が Y 軸で、奥側が正(＋)方向。

A,B,C 軸: 回転軸は、直進軸の正方向に向かって時計回り方向が正(＋)方向。

座標軸と運動の記号は、JIS-B 6310 に規定されています。図 77 のように座標軸の直進3軸は、右手の親指をX軸、人差し指をY軸、中指をZ軸とし、指先の方向が各軸の正(＋)方向と決められています。これを右手直交座標系といいます。

図 77: NC工作機械の座標軸と右手直交座標

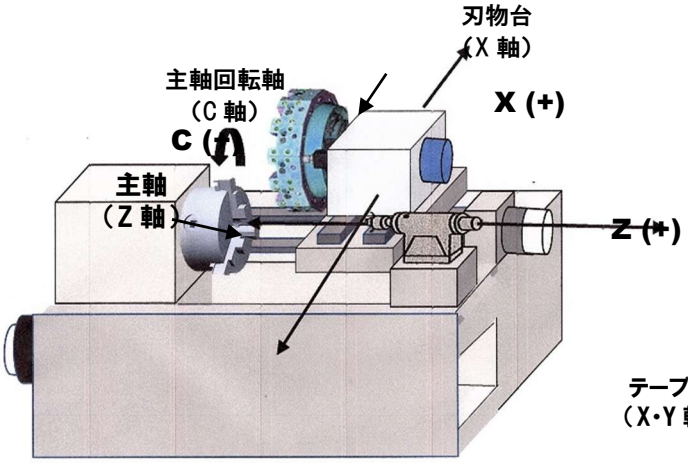


図 78: NC工作機械の座標軸

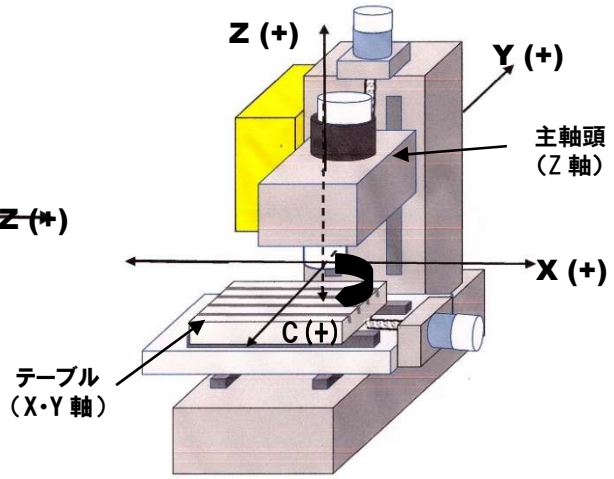
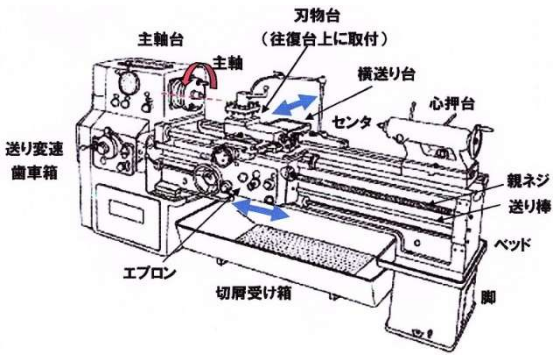
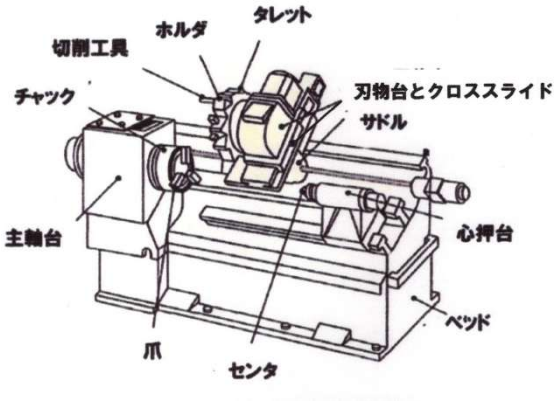


図 79: 立て形マシニングセンタの座標軸

(3) NC 旋盤

図はNC旋盤の基本構成です。比較のために普通旋盤(図 28)も併記します。
NC旋盤は 1952 年米国旋盤メーカー老舗であった Monarch 社が開発をはじめ、
1955 年米国シカゴ工作機械見本市(現　IMTS:米国国際製造技術展)に円弧・テーパ加工を含む完全輪郭制御の試作機を





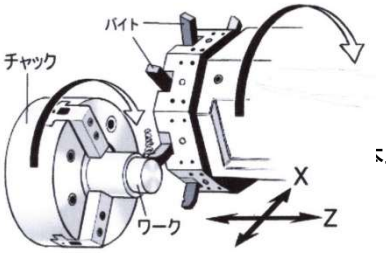
展示して注目を浴びました。

NC旋盤と普通旋盤の外観上の大きな違いの一つに刃物台形状があります。NC旋盤は図 81 図 82 のように複数の切削工具を搭載できる多角型の刃物台(タレット)を持ち、自動回転して切削工具の交換ができます。

図 28：普通旋盤

「工作機械

図 81：タレット型刃物台

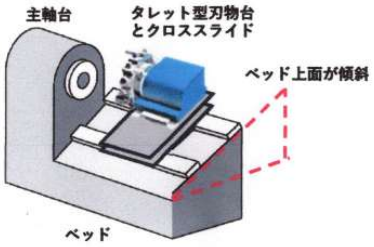


工作機械工業会編

図 82：タレット型刃物台による加工
(図：たなか　じゅん氏)

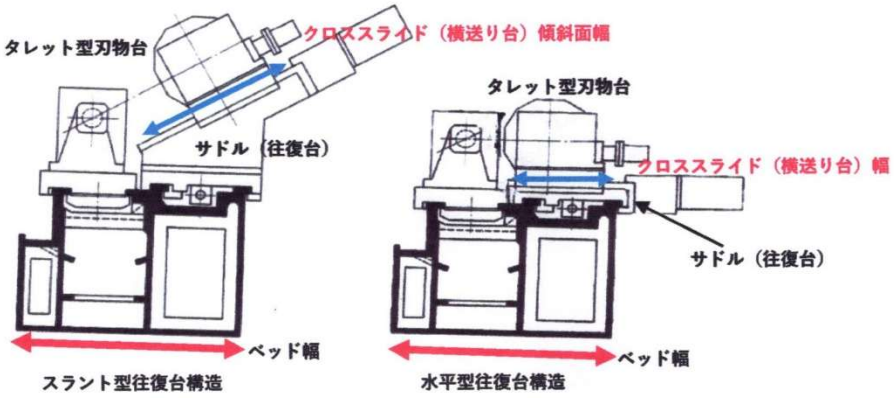
図 80 でもわかるように、NC旋盤はタレット型刃物台が機械正面に立つ作業者から見て機械の奥にあるので作業者は刃物台が邪魔にならず、工作物を容易にチャックに装着できますが、切削工具交換のための刃物台への接近性は悪くなります。一方、普通旋盤では刃物台には切削工具が 4 本までしか取りつかないので、切削工具の取り換え頻度はNC旋盤に比べ多くなります。

さて、今日、小・中型NC旋盤では、ベッド構造を手前側に傾斜させた「スラント・ベッド」型が多く採用されています。
この構造の特徴について、同じ大きさの箱型ベッドにサドル（往復台）がスラント型のものと水平型のものを搭載した図を使い以下に説明します。



参考：スラントベッド構造

① 水平型サドルは断面形状が長方形であるのに対し、スラント型サドルは直角三角形（変形）のため、箱型ベッドの底辺幅（下図赤矢印）が同じにもかかわらず、スラント型の傾斜面長さ（青矢印で示す幅）は水平型の幅より長く、X軸方向移動距離が長く取れるので、同じ形状のタレット刃物台を搭載すると、水平型より大きな径の工作物が加工可能です。



出典：旋盤マニュアル　構造・精度編　大河出版

図 83: スラントベッド構造の説明図

② 水平型サドルに比べて、タレット型刃物台が大きく後退できるので、工作物への接近性が良い。（主軸への加工物脱着が容易。）
③ タレット型刃物台が傾斜面（傾斜角は一般的に 30 度～60 度）を往復するので、切屑が斜面に沿って落下しやすく、切屑のはけが良い。

NC旋盤やターニングセンタの自動化対応では、ロボットを使用する例もありますが、機械の上を走行する軸と主軸への工作物の取付と取り外しのための上下軸、工作物をつかむハンドで構成される「ガントリ・ローダー」が使用される例も数多く存在します。

図 84：ガントリ・ローダー

(4) マシニングセンタ

米国ではマサチューセッツ工科大学(M.I.T)がNCフライス盤試作機を完成した後、1958 年に各種加工機能を 1 台に集約したマシニングセンタ(写真 6)をカーネイ&トレッカー社が世界で初めて開発しました。一方、日本では 1960 年日立製作所が国産第一号「自動工具交換装置付 NC 万能工作機械」を試作しました。

マシニングセンタが NC フライス盤と異なる点は、フライス加工以外に穴あけ・中ぐり・ねじ立てなど種々の作業ができ、切削工具を何本も工具マガジンに収納して NC の指令に従って工具を自動工具交換装置(ATC)で交換が行える点でしょう。(図 85)

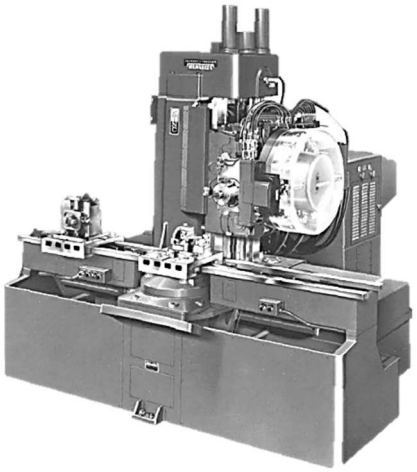
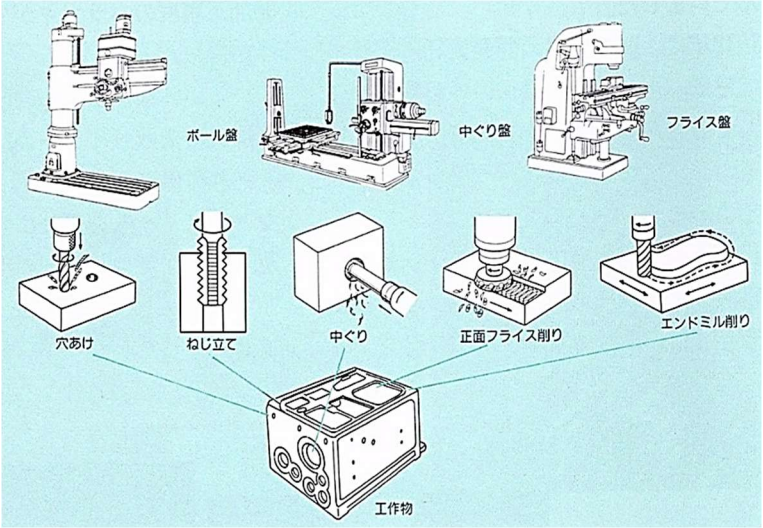


写真 6:Kerney and Trecker
Milwaukee Matic Ⅱ



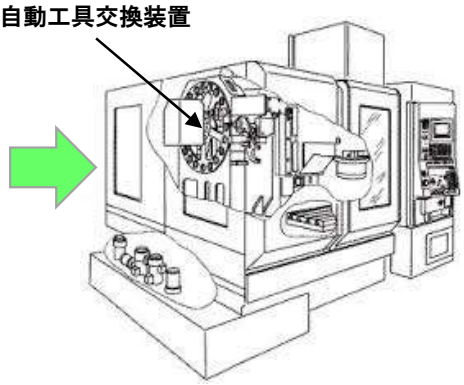
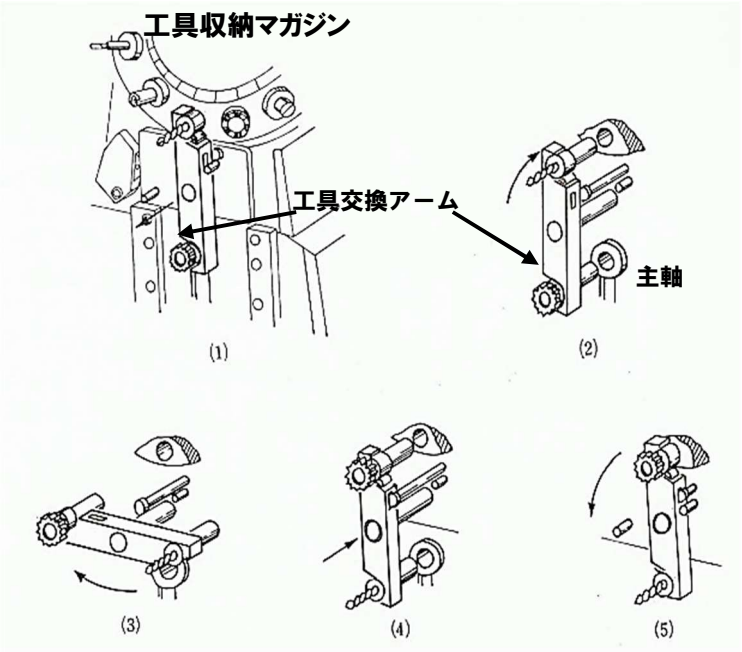


図 85: 数種類の工作機械機能が 1 台に集約された 立て形マシニングセンタの例

ここで、ATC の動きは例を図 86 の横形マシニングセンタにとれば、まず加工中に、次の加工に必要な切削工具が工具収納マガジンの旋回で所定位置に移動します。そして、現在の加工が終了すると主軸は工具交換位置に移動、工具交換アームが主軸と工具収納マガジンから新旧切削工具を引き抜きます。(1)～(2) 次に工具交換アームが 180 度旋回することで、主軸に新しい切削工具が装着され、工具収納マガジンには古い切削工具が戻されます。(3)～(5)



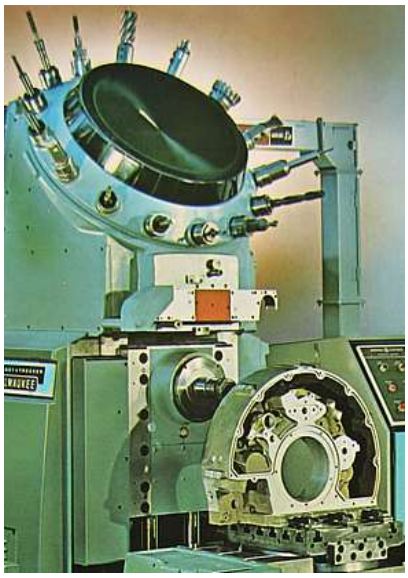


図 86：自動工具交換装置の仕組み　（Kerney and Trecker Milwaukee Matic Series Eb）

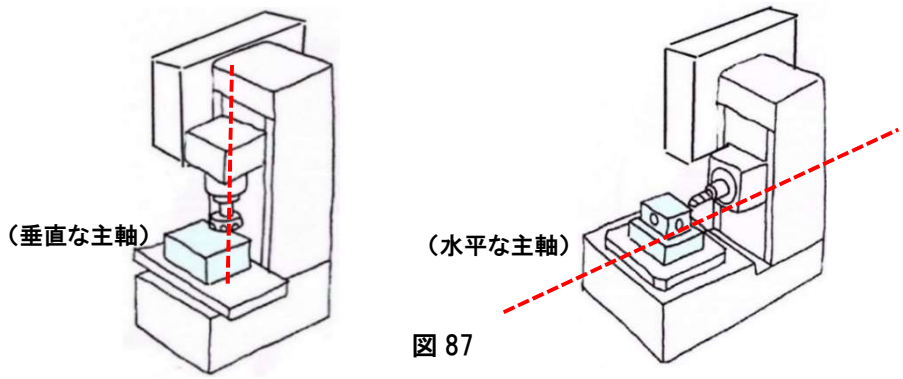


図 87

立て形マシニングセンタ　　**横形マシニングセンタ**

図 87 のように、マシニングセンタは主軸の位置で立て形と横形に分類されます。
立て形マシニングセンタは垂直方向の主軸を持ち、工作物を上から加工します。
従って、加工は高さの高くない（平物）工作物に向きます。 また、水平方向の主軸を持つ横形マシニングセンタと比べ機械の設置スペースが少なくて済みます。
さらに、立て形では機械テーブルへの接近性が良いので、設計図面と見比べながら加工ができます。

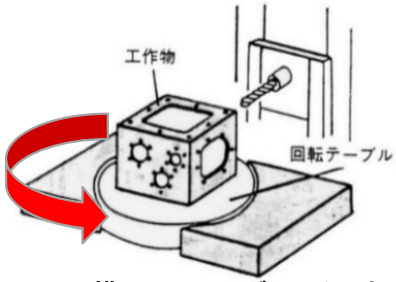


図 88 ：横形マシニングセンタの加工

さて、工作物の上面のみしか完全な加工ができない立て形マシニングセンタに比べ、横形マシニングセンタは水平方向の主軸を持つため、工作物を横から加工できます。そして、テーブルが一般的には 90 度ずつ回転するので、図 88 のように角型工作物の

4側面が加工できる利点があります。

横形マシニングセンタには無人加工の目的で、自動パレット交換装置が多く装備されます。自動パレット交換装置(図 89)は機械の外側に置かれ、装置上のパレットに、あらかじめ工作物を取付けることができます。自動パレット交換装置は前の工作物の加工が終わるとパレットを機械内部から引き抜き、新しい工作物をパレットとともに機械内部に送り込みます。

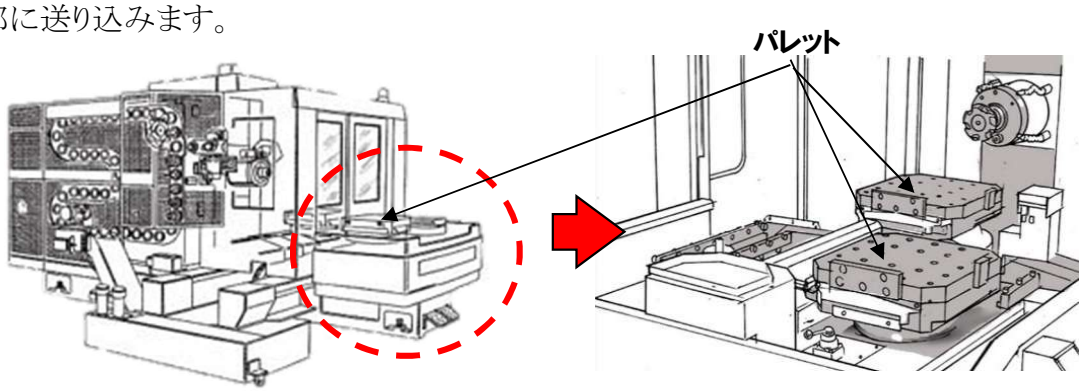


図 89: 横形マシニングセンタと自動パレット交換装置

「7－4-(2)-①:ツーリング工具のシャンク(37 頁)」に述べたように、マシニングセンタの主軸端には規格で定義された色々なサイズ(長さと径)があります。代表的なものには 30 番、40 番、50 番の 3 種類があり、50 番が最も大きいサイズになります。そこで、機械を「50 番マシン」や「主軸テーパ 30 番」などと呼ぶこともあります。

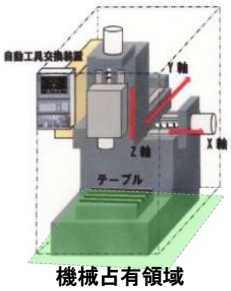
大径の切削工具が使用できる 50 番マシニングセンタでは、機械剛性もあり重切削が可能です。また、主軸径の小さい 30 番や 40 番のマシニングセンタは主に高速回転で精密小型部品加工に向きます。

(参考)ライン対応形マシニングセンタ)

(13)生産システム(80頁)で述べるように量産部品の多品種化に対応するため、特定の加工を行う数台の専用機からなる自動化ラインは、今日数台の汎用形マシニングセンタや専有面積が狭い「ライン対応形マシニングセンタ」に置き換わりつつあります。

図 90 のような「ライン対応形マシニングセンタ」は、一般に故障による生産ラインの停止を避けるため、簡単な機構の自動工具交換装置を持ち、工作物を取り付ける治具(注記)の固定や配管・配線を考慮してテーブルは固定され、数台並べた時のライン長さを短くできるよう 図のように主軸・コラムで 3 軸(X 軸 Y 軸 Z 軸)移動できる構造で、機械の占有領域が狭く設計されています。

図 90: ライン対応形マシニングセンタ例

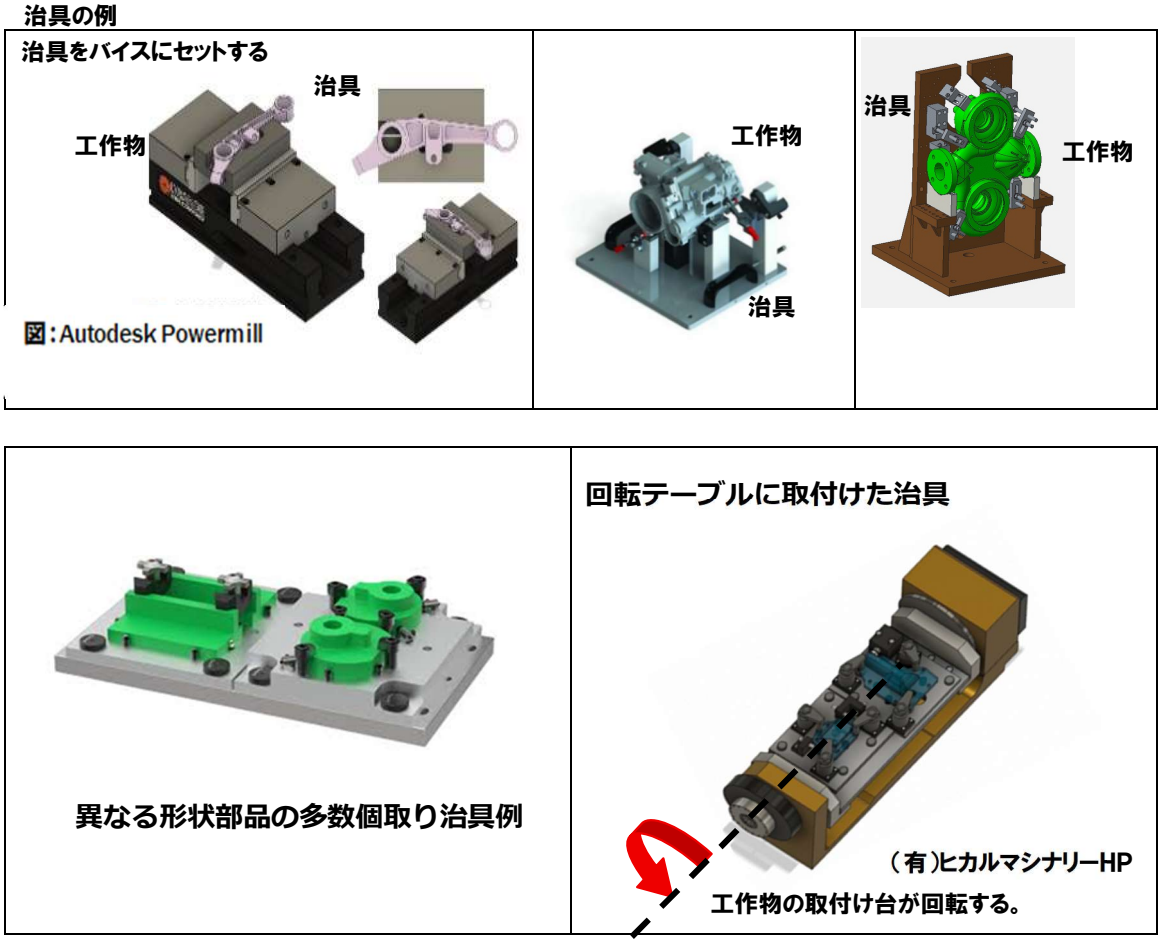


機械占有領域

注）：治具-

　複雑形状や曲面形状の工作物をフライス盤やマシニングセンタのテーブルに固定する場合、直接テーブルに固定しようとしてもしっかりと固定するのは難しくなります。そこで、以下のように工作物形状に合う形の「取付け台」を作り、しっかりテーブルに固定して作業しやすくします。このこのような「取付け台」を「治具」と言います。

治具の例



5 面加工機の構造は、主軸が垂直方向に取り付けられている立て形マシニングセンタと同じですが、主軸頭を支える構造が「門形」になっている「門形マシニングセンタ」です。 門形マシニングセンタは駆動軸が XYZ の直線3軸でテーブルが門を通り抜ける方向に動くので、この軸方向を制限なく長くとることができます。このため、航空機や船舶など大型の長い部品を加工するときに使用されています。

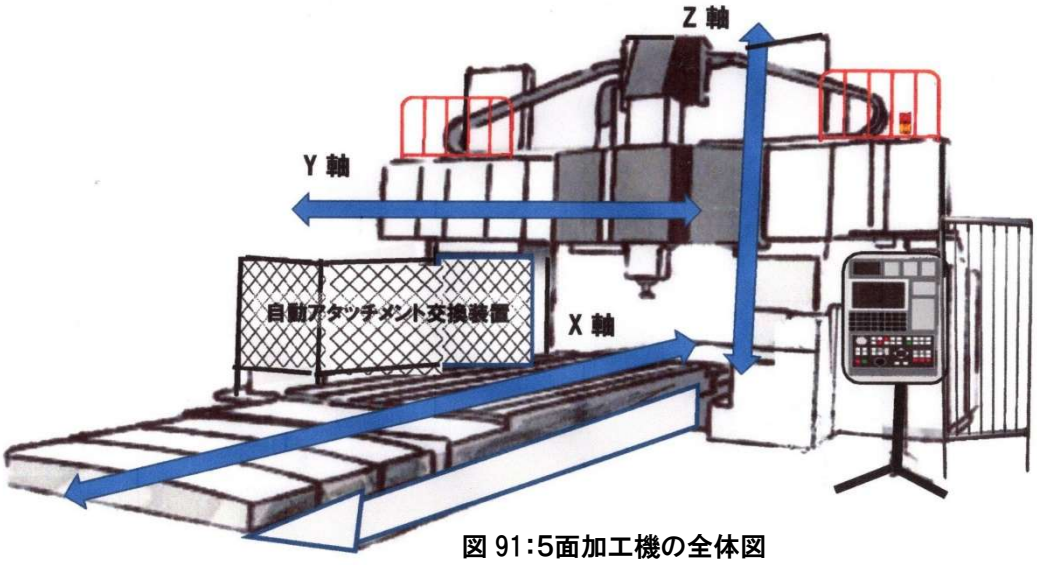


図 91:5面加工機の全体図

5面加工機は図 92 のように、テーブルに取り付けた工作物の上面と側面 4 面が自動加工できます。

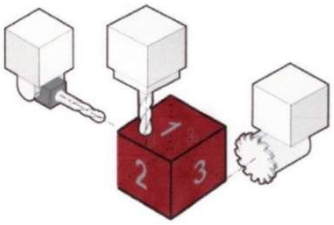


図 92: 主軸の特殊加工ヘッドで5面が加工可能

主軸に取付けるアタッチメントヘッド(加工ヘッド)には写真 7 のような様々な形状があり、自動アタッチメント交換装置により加工中に自動交換されます。特に材料の再取り付けに手間がかかる、大型設備の架台やフレームの加工品などの製作に有効です。

標準立主軸

90° アンギュラ

ユニバーサルインデックス

5 面加工主軸

写真7: 5面加工機 主軸アタッチメントの例

(6) ターニングセンタ

NC 旋盤(58 頁)の機能をより高めるため、フライス加工や穴あけ加工の機能を加えた工作機械がターニングセンタです。

機械の形態として図 94 のタレット型刃物台に下記写真のような独立したエンドミルやドリルの回転アタッチメントがつくもの、フライス加工用モータがタレット型刃物台に載せられているものがあります。

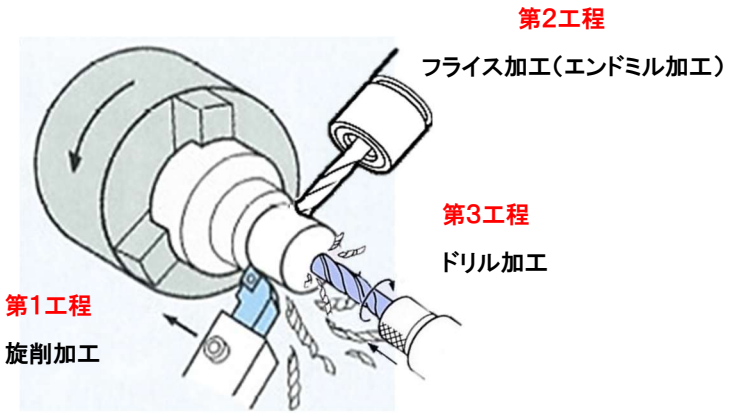


図 95:ターニングセンタによる加工例

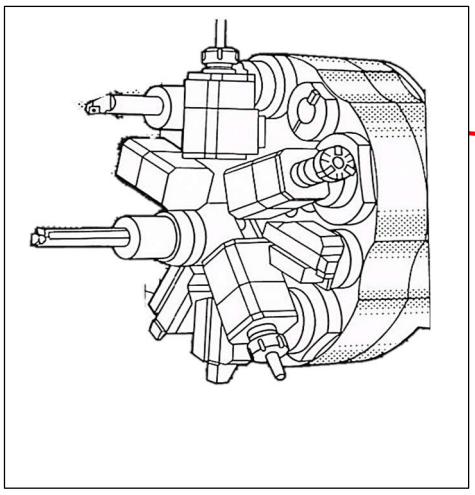


図 94:タレット型刃物台

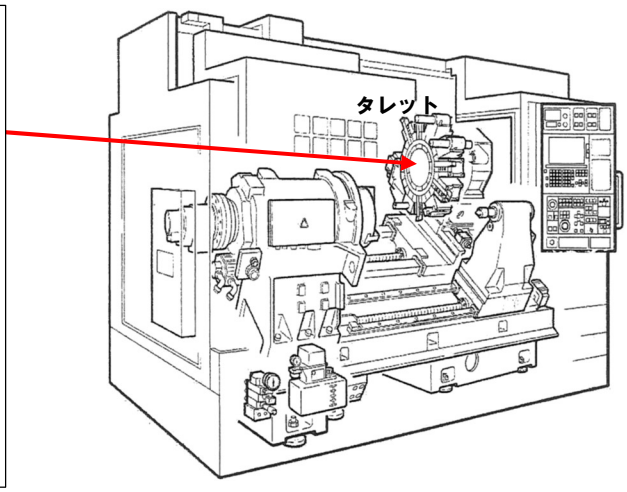


図 93:ターニングセンタ

このほか、より複雑形状の加工ができるＹ軸制御のターニングセンタ(図 96)もあります。このターニングセンタは黒矢印方向の移動軸の追加で、仮想の Ｙ 軸(X 軸に直角な軸:赤矢印)をつくり以下に述べる加工を可能にしています。(参考までに図 97 のターニングセンタは図 96 と同じ構造でタレットは X 軸方向のみ動きます。)

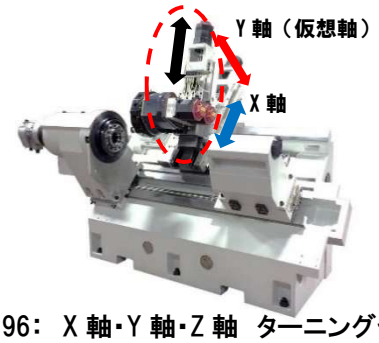


図 96:　X 軸･Y 軸･Z 軸　ターニングセンタ

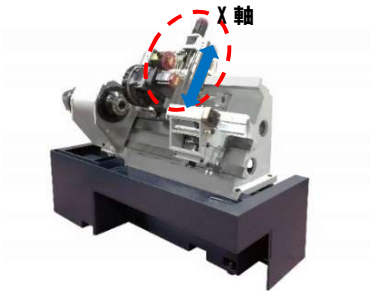
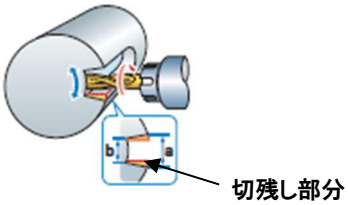
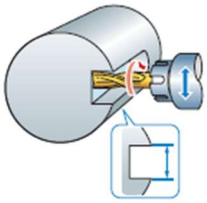


図 97:参考:X 軸･Z 軸　ターニングセンタ

下図のような加工の場合、左図は機械が主軸回転軸に直角方向(X 軸)にしか動かないため削り残しが出ます。これに対して右図のようにＹ軸が動くと工具が回転軸に対して上下方向に動く為、切残しのない溝加工が可能です。

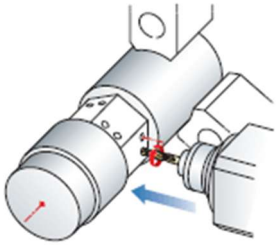


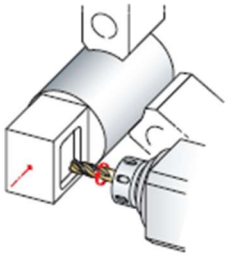
X 軸･Z 軸　による加工



X 軸･Y 軸･Z 軸　による加工

この他 Ｙ 軸が動くと下図のような偏心した穴加工や偏心ポケット加工も可能です。





画像：(株) 中山製作所 HP より

ターニングセンタは、さらに次項に述べる、フライス作業用主軸頭が回転制御される旋盤型の 5 軸制御複合加工機に発展しています。

(7)　5 軸複合加工機

マシニングセンタとターニングセンタの機能を持つ複合工作機械で、直進 3 軸と回転 2 軸が同時に制御でき複雑形状部品の加工が可能です。構造形態として「マシニングセンタ型」と「NC旋盤型」があります。以下にそれぞれの一例を示します。
なお、近年では旋盤作業とフライス作業のみでなく、研削加工やレーザ加工、また積層造形機能等を持つ複合加工機もあります。

① 5 軸制御マシニングセンタ

直進 3 軸制御マシニングセンタに回転 2 軸を追加したものを 5 軸制御マシニングセンタと呼びます。そして回転テーブルのC軸が高速回転機能を持つものがマシニングセンタ型複合加工機です。
なお、この基本形態を含め、その他の例を 69 頁表にまとめます。

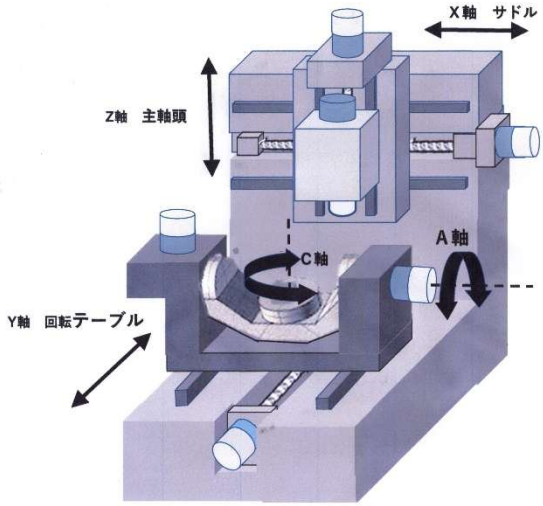


図 98: 5 軸制御マシニングセンタ

② NC 旋盤型複合加工機

ターニングセンタにマシニングセンタと同等のフライス加工能力を備えた機械です。工具マガジンと自動工具交換装置を持つ構造もあります。

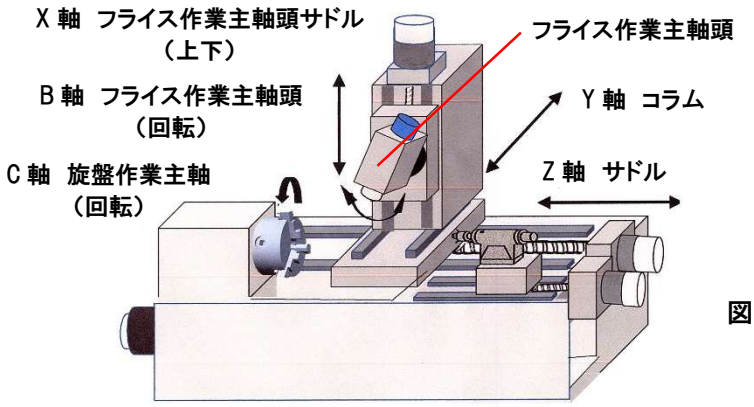


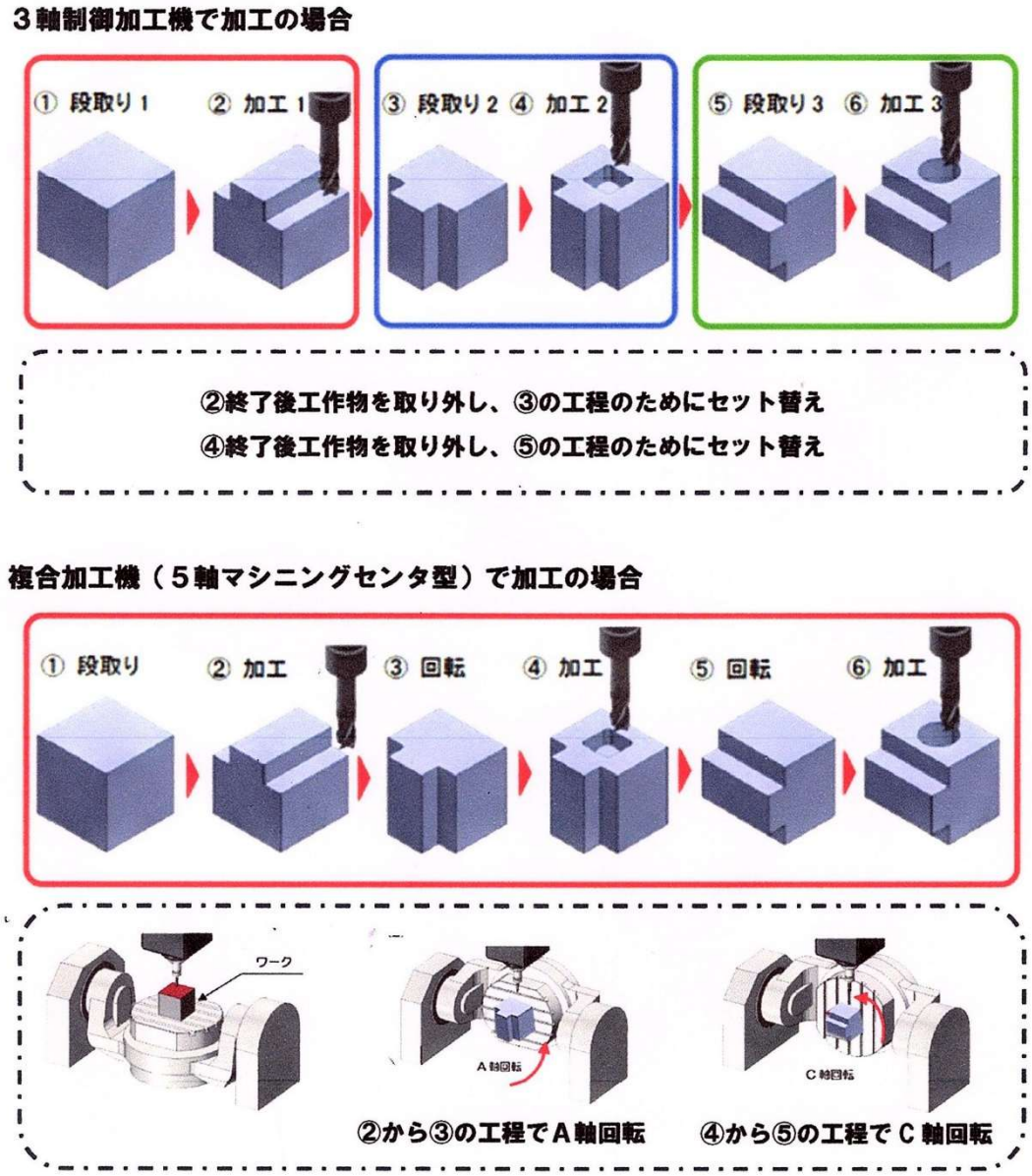
図 99: NC 旋盤型複合加工機

一般に複合加工機は以下の利点があります。
■工程集約・人件費削減

素材から何台かの機械を使い加工完成品を作る場合に比べ、複合加工機は段取り替え、次工程への工作物の着脱作業や機械間の工作物移動の必要がなく、作業者への負担が軽減できます。ここで、段取り替えとは次工程の加工をするため、工作物のセット方向や固定を測定具等を使い微調整したり、加工用 NC プログラムを準備したりする一連の作業を言います。

図は同一部品を3軸制御加工機と5軸制御複合加工機（図 98）で加工した場合の比較です。5軸制御加工機では2回の段取り替えが削減できます。

図 100: 3 軸制御機と 5 軸制御機の加工工程比較



■高品質

図 88 のように、5軸制御加工機では1度素材を取り付けると全加工ができるため、3軸制御機を使用した場合に起こりがちな、工程ごとの工作物取り付け・取外し時に発生するわずかな取り付けズレや切屑のかみ込みがなく、完成品の精度を均一に保つことができます。

■省スペース

工程に合わせた工作機械が何台も必要ないため、工場のスペースを有効活用することができます。

■短い切削工具の突き出し量

3 軸制御加工では工具ホルダと工作物の干渉を避けるため、切削工具の突き出し量をとらなくてはなりませんが、突き出し量を長くすると切削工具のたわみが大きくなり（剛性が下がる）、精度維持が難しくなります。また、切削工具先端が工作物に届かない場合もあり最終的に放電加工による 2 次加工が必要になります。

これに対して、5 軸制御加工では、切削工具あるいは工作物を傾けることで、切削工具が短い突き出し量で加工できるため、高精度加工ができ、2 次加工が不要になります。

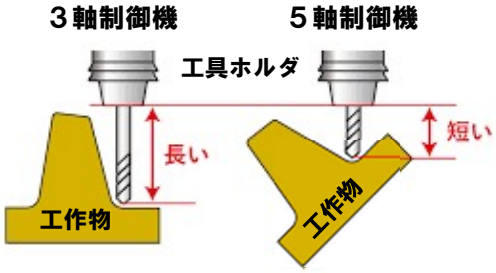


図 101: 3 軸制御機と 5 軸制御機の工具突き量比較

■切削工具の加工位置が選べる

3 軸制御加工機では切削工具が図 102 のようにいつも垂直（Z 軸）方向を向きます。先端が球状のボールエンドミルを使用した場合、①の部分と②の部分では 1 回の回転で動く距離が異なります。特に先端部分では刃が回転していない状態になります。（周速ゼロ点）

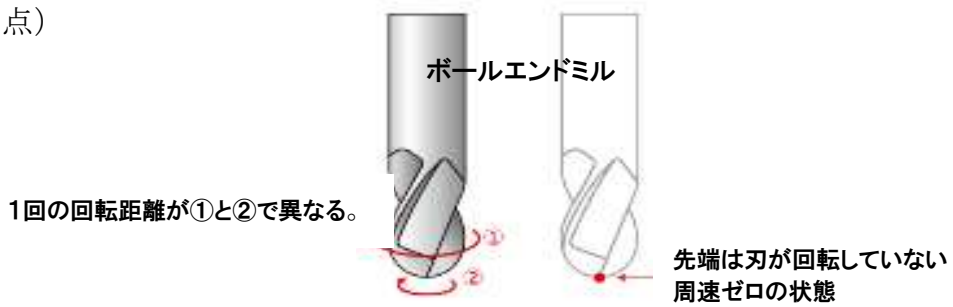


図 102: ボールエンドミル加工

この状態でボールエンドミルを回転させても刃は 1 点で止まっているのと同じような状態で、丁度刃がないところで削らずに押し切っていることになり、先端で加工した部分は汚くなりがちです。

しかし、5軸加工機では切削工具の傾き角を自由に変えられるため、図 91:のようにボールエンドミル加工では周速0点を逃げて刃が切れる部分で加工ができます。

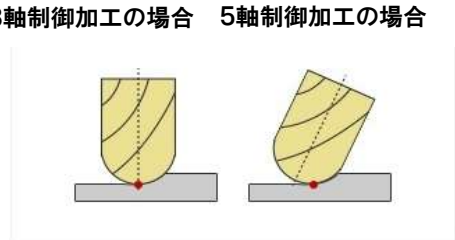
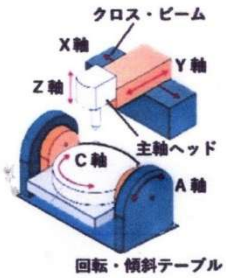
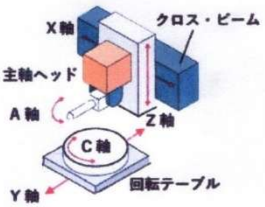
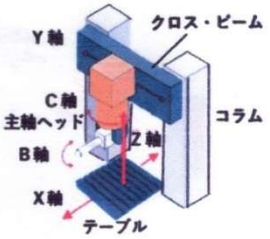


図 103: 3 軸制御機と 5 軸制御機のボールエンドミル加工比較

(参考)5 軸複合加工機の基本形態例

構造名	回転傾斜テーブル型	傾斜ヘッド回転テーブル型	回転傾斜ヘッド型
形態図	直線軸がX・Y・Z軸の3軸で、回転・傾斜の2軸をテーブル側で制御 （座標:立て形マシニングセンタ）  回転傾斜テーブル型の例 	直線軸X・Z軸と主軸ヘッド傾斜、直線軸Y軸と回転の2軸をテーブル側で制御 （座標：立て形マシニングセンタ） 横形に多く見られる形態  横形ヘッド回転テーブル型の例 	テーブルが直線軸X、その他のY・Z軸・回転・傾斜の4軸を主軸ヘッド側で制御 （座標は門形マシニングセンタ）  回転傾斜ヘッド型の例
特徴	テーブルの横移動がないので比較的コンパクト 主軸が回転軸でないため座標が解り易い 回転と傾斜角が大きく取れる（丸テーブル回転」360度傾斜角240度）	テーブルが傾斜しないので重量物の加工可能 横型の場合工作物の深い部分まで加工可能	テーブルの傾斜がないので重量物の加工可能 門形マシニングセンタの形態に多く、テーブルが縦長で長い移動距離が取れるため航空機部品のような大型部品の加工に向く
短所	大型、重量物の加工には不向きです。	主軸の傾斜可能範囲は狭い	主軸ヘッドの傾斜・回転軸の可動範囲は狭い

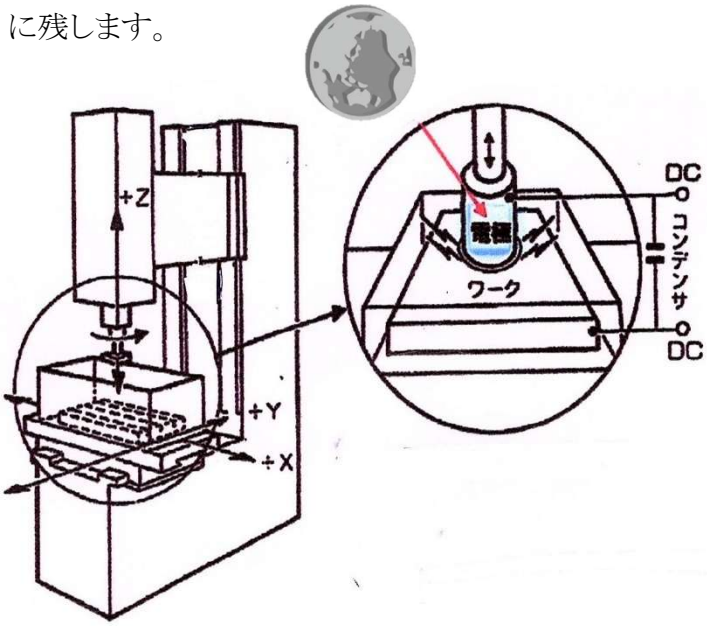
(注)各座標軸名についてはメーカーにより一部異なることもあります。

(8) 放電加工機

① 形彫り放電加工機

形彫り放電加工は、グラファイトやタングステンなどの電気を通しやすく、柔らかい材料（簡単に加工できる材料）を必要な形状に加工した電極と工作物を、それぞれ短時間に瞬間的な電力を出力するパルス電源の正極（プラス極）と負極（マイナス極）につなぎ、電気あるいは熱を通しにくい性質を持つ（絶縁体）加工液の中に入れます。

そして、加工したい部分に電極を数十ミクロン（ミクロン＝0.001mm）にまで近づけると、絶縁状態が切れて火花（放電）が起こり（この隙間を「放電ギャップ」と言います。）ます。放電はパルス電源により連続発生して終了し、この後も少しだけ電極を材料に近づけると、再び放電が連続発生します。工作物の金属部分から溶け出した材料は加工液の放電熱により発生した気泡の爆発で飛散し、小さなクレーター状の窪みを工作物上に残します。



このようなパルス状の放電を繰り返すことで金属の溶解・冷却・飛散が何度も行われ、工作物の不要な部分が除去されて図 104 のように電極の先端部（大径円）に形彫りされた凹形状が工作物に凸部として現れます。この加工は切削が難しい材料でも加工できるという利点があります。

（凹部は凸部となり）電極先端部に型彫りされた形状が現れる。

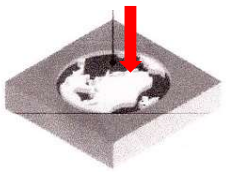


図 104: 形彫り放電加工機とその加工（工作物：（有）太陽放電工業）

② ワイヤ放電加工機

ワイヤ放電加工は銅線など電気を通す材料からできたワイヤを電極として、順次繰出すワイヤを加工液中の工作物に近づけ、放電で材料を切断する加工方法です。

図 105 の加工例では、工作物にあけられた穴にワイヤを通し、工作物は絶縁性が高い灯油系加工油や、イオンを取り除いた脱イオン水の入ったテーブル上の加工液槽内に取付けられます。（旧式の装置では加工液を加工部に吹きかけるタイプもあります。）

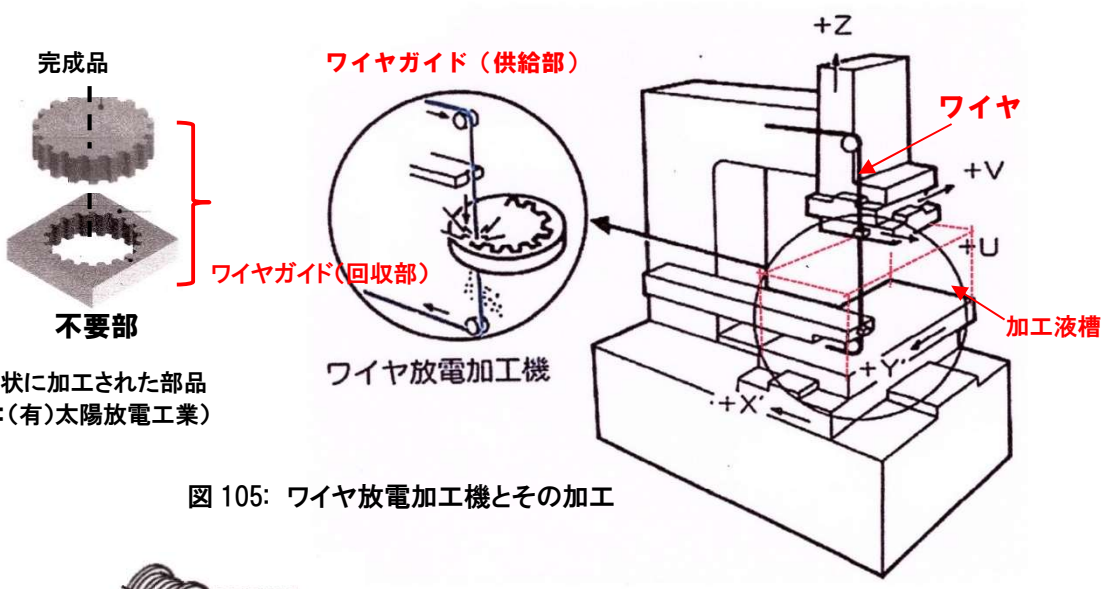


図 105: ワイヤ放電加工機とその加工

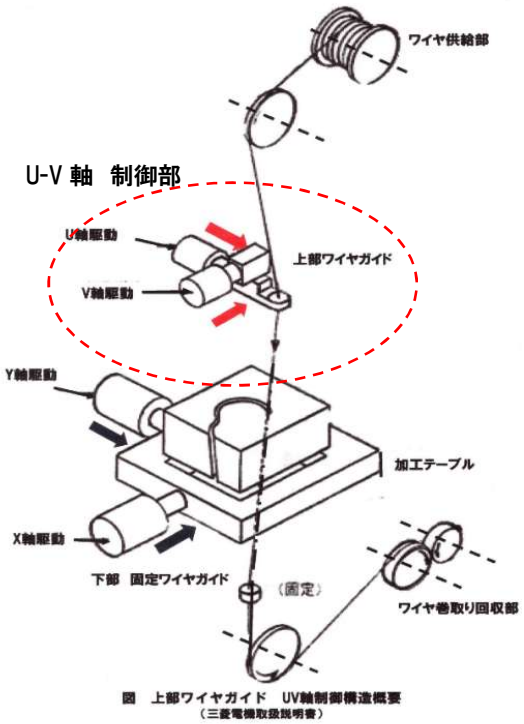


図 106: 上部ワイヤガイド U-V 軸制御

そして、テーブル（加工液槽）を一定速で動かしてワイヤを工作物に近づけ、その間隙が約数十ミクロン以下になると放電が起こります。放電を短時間で繰り返し発生させ、テーブル（加工液槽）をNC制御で前後左右方向に送るとともに、ワイヤを巻きながら、図 105 の輪郭形状を糸鋸盤のように加工します。

ワイヤ放電加工機には上部のワイヤガイド部が X-Y 方向と平行に移動できる「U-V 軸制御」機能を持ちワイヤを傾けて傾斜面（テーパ面）の加工が可能な機種もあります。

(9)レーザ加工機

太陽光(自然光)は大きなエネルギーを出しますが、太陽と地球間の距離が長いため、地球に達するエネルギーが少なくなります。また、 太陽光は、さまざまな色(波長)の光が集まったものなので、虫眼鏡で集光したレンズを通った光は波長ごとに屈折率が異なり、レンズで 1 点に光が集まらず、それぞれ異なった点に到達し集光点を小さくすることができません。従って、大陽光を虫眼鏡で紙に集光しても、紙を焦がすか、燃やす程度になります。

College Physics - OpenStax

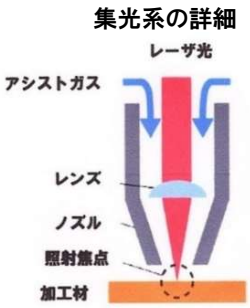
これに対してレーザは、1 つの波からなり、連続したきれいな波であるとともに、鋭い指向性(直進性が強く広がらない性質)があります。この指向性の高いレーザを集光レンズで、集光点の大きさを非常に小さく絞ると、極めて高いエネルギー密度(単位体積当たりの密度)の光源が得られ、穴あけや切断などのレーザ加工が可能になります。

レーザ加工は工作物と接触せずに加工ができるため、接触部分の摩耗や劣化が出ません。基本的には加工機はNC制御されるテーブルや加工ヘッドから構成されます。

現在、炭酸ガスレーザとファイバーレーザが一般的な金属等の切断加工に使用されています。

① 炭酸ガスレーザ加工機

図 107 の炭酸ガスレーザ加工機は、「レーザ発振器、集光系及び X-Y 軸駆動系」の 3 部分から構成されます。また、レーザ光によって融解・蒸発した金属を除去するため「アシストガス」が集光系に含まれます。このガスは光で溶かした金属を酸化(燃焼)させて工作物を早く切断する場合には酸素を、その他の場合には窒素を使い、その圧力で吹き飛ばし切断します。



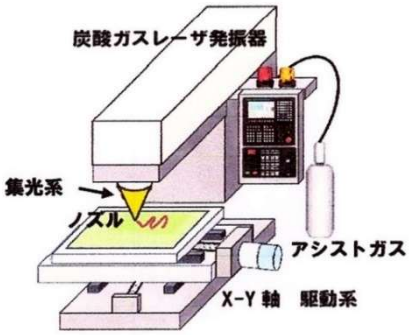


図 107:炭酸ガスレーザ加工機 概要

炭酸ガスレーザー発生の原理

炭酸ガスなどのレーザ媒質には原子や(原子が集まって物質になる)分子がある特定のエネルギを持って自由に運動しています。今図 109 のようなガラス管にレーザ媒質(注)を入れ、放電の強い光で外部エネルギーを原子や分子に与えると、図 108 の

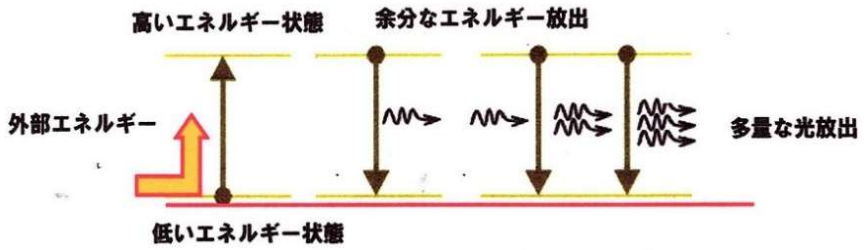


図 108:レーザ媒質中の原子・分子のエネルギー状態

ように、さらに高いエネルギの不安定な状態で運動します。これを「励起」と呼びます。そして、しばらくすると余分なエネルギーを光として放出して元の低いエネルギー状態に戻ります。

放出された光の中で、ガラス管軸に平行なある特定の波長の光は図 109 の 2 枚の向き合ったミラーで反射、増幅され、他の低いエネルギ状態にある原子や分子に衝突すると、それらも同じように光を放出します。同様なことを繰り返し、やがて単一波長の強力な光、レーザになります。発生したレーザ光は、ガラス管から出ると、反射ミラーによって曲げられ、レンズによって集光されて、ノズルから工作物に照射されます。

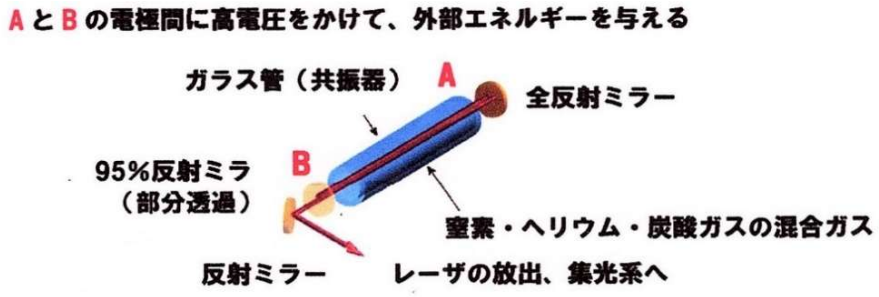


図 109:炭酸ガスレーザ発生のメカニズム
(株)レーザーワークス

(注)レーザ媒質には炭酸ガスの効果を高めるため、高電圧をかけると炭酸ガス同様エネルギーの高い不安定な状態になる窒素、および冷却効果のためのヘリウムを混合します。

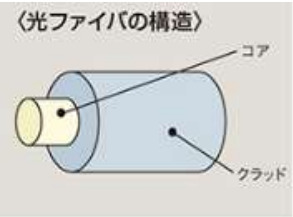
② ファイバーレーザ加工機

加工機の構成は炭酸ガスレーザ加工機と変わりありません。ここでいうファイバーは通信用として良く知られる光ファイバーでレーザ光を発振装置から集光系(図 107　72 頁)に伝送します。

発振器にはレーザーガスは不要ですが、アシストガス(酸素、窒素等)は必要です。ただし、加工速度が速くなるため、消費量は 20%程度少ないと言われています。

ファイバーレーザ発生の原理

光ファイバーの構造は、図のように中心部のコアと、その周囲を覆うクラッドの二構造になっています。ファイバーレーザでは、コアの中心部に希土類(レアアース)を添加したコア(Active doped fiber core)を持つファイバーを使用します。



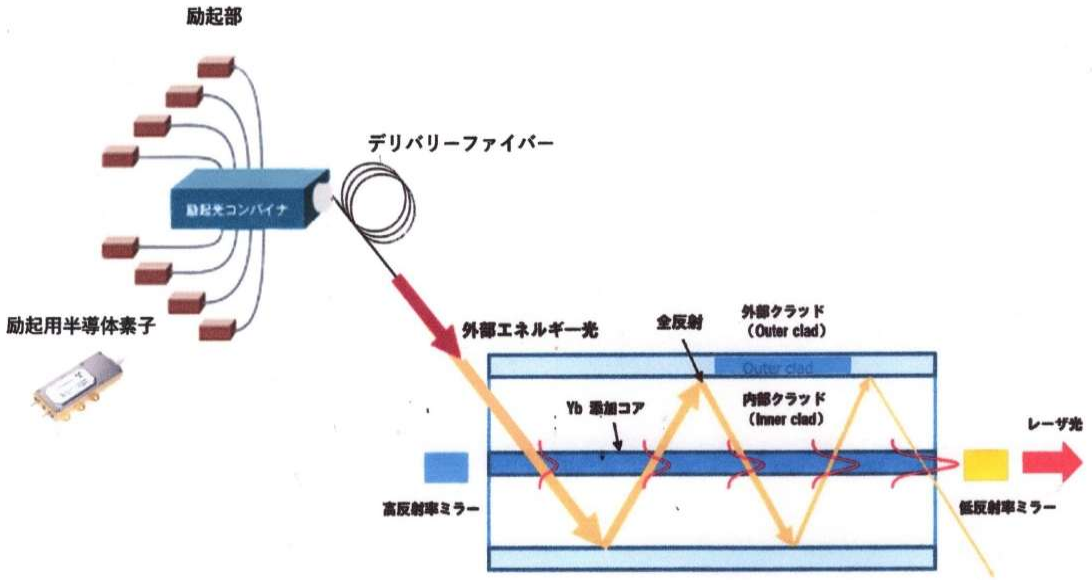


図 110：ファイバーレーザ発生のメカニズム

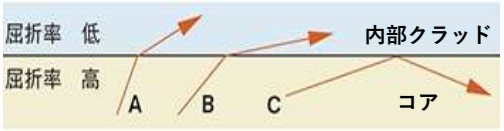
炭酸ガスレーザ発生の原理にも述べましたが、原子・分子などに、外から熱・光などのエネルギーを与え、もとのエネルギーの低い状態からエネルギーの高い状態に移す(励起)のため、ここでは複数の励起用半導体レーザ(LD)から出たレーザ光を、光ファイバで励起光コンバイナに伝搬し励起光を一本の光ファイバに結合します。この励起光を発生・集光する部分を「励起部」と呼びます。

外部エネルギーとしての半導体レーザ光が内部クラッドに入ると、光は屈折率の低い外部クラッド(Outer clad) と屈折率が高い内部クラッド(Inner Clad)の境界で全反射(注)しながら進んでいきます。そして、その過程で中央のコアに添加された

希土類（一般的にはイッテルビウムYb）に吸収されると、Yb元素は高いエネルギー状態になり、そのままの状態をある一定時間維持したのちに、余分なエネルギーを光として放出して低いエネルギー状態に戻ります。この時の光のなかで、ある特定の波長の光を反射させるファイバー内に設けられた高反射ミラーと低反射ミラーで反射を繰り返し光を増強し、他の Yb 元素にもエネルギーとして与え、同様なことを繰り返してレーザ光となります。なお、外部光はコアに添加された希土類 Yb を通過することで減衰しますが、コアは、内部クラッドと比較して屈折率が高く設計されているのでレーザ光は図 110 のようにコアの中を全反射（注）して閉じ込められて伝播します。

ファイバーレーザの特徴の1つは発振装置から集光による加工部まで数mから200mm程度まで送ることができます。

（注）全反射：入射光が境界面を透過せず、境界面ですべて反射する現象



下図の A のように、光が屈折率の高い「物質 1」から屈折率の低い「物質 2」に到達すると、その角度を変えて進入していきます。光の進入角度が B のように浅くなると、透過する角度も小さくなり、境界面に対して平行に近くなります。そこでさらに進入角度を小さくすると、C のように光は「物質 2」に透過することができなくなり、すべての光が境界面で反射されることになります。このようにすべての光が反射されることを全反射と呼びます。

炭酸ガスレーザとファイバーレーザはどのような加工を行うかによって選択されます。
ファイバーレーザは一般に加工速度が速いので、薄い金属シート（炭素鋼。銅、ステンレス鋼）が向きます。
一方、炭酸ガスレーザは出力により異なりますが、広い範囲の金属・非金属の厚い工作物が向きます。しかし、近年ファイバーレーザ加工機の性能が伸び加工方法の調整で板厚の厚い材料も加工ができるようになってきました。
JIMTOF 2018 では大手数社が性能の向上したファイバーレーザ加工機を展示したことが報道されています。
スイスの調査会社 Optech Consulting 社報告書によると、世界市場で加工用発振器の市場は 2023 年 54 億ドル。またレーザ加工機市場は 2023 年約 235 億ドルで前年比 4%増。市場の伸びは南北アメリカでこれに続いて欧州と中国の成長による。
2021 年の資料ではあるが、加工用発振器の市場は気体レーザ（炭酸ガスレーザ・エキシマレーザ）は約 24%、ファイバレーザが約 52%、個体レーザが約 24% との報告があります。

(10) ウォータージェット加工

ウォータージェット加工は、音速を超える超高圧水を生成・噴射して材料を切削する加工方法です。

水の勢いを利用した鉱石採掘は古くからおこなわれており、1852 年に米国カリフォルニアで水噴流により鉱石を破砕して砂利を採取した記録があります。また、1939 年には石炭採掘のための「水力採炭法」が実用化されています。その後、高圧発生装置や耐圧ホースの開発が進み、1960 年代高速水噴流を個体材料に利用する試みが活発になり、米国や英国を中心にウォータージェット加工機の開発がすすめられました。そして 1970 年代初期、米国ボ―イング社から技術部門が独立(現在 Flow 社)して研磨剤の混入による加工、アブレシブジェットシステムの開発に成功しました。

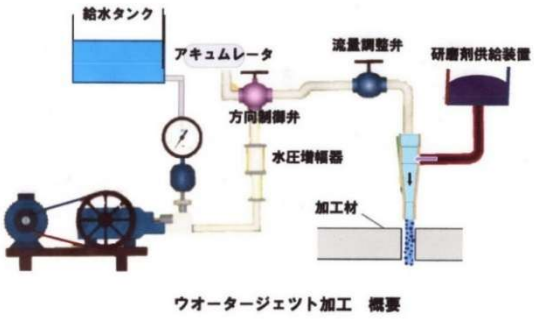
ウォータージェット加工には水流のみで加工を行う「アクアジェット加工」(ピュアジェット加工)と高圧水ノズルの出口付近に粒子状の「ガーネット」(ざくろ石からなる研磨剤でサンドブラストガーネット)を混入させて切断効果を高める「アブレッシブジェット加工があります。

① アクアジェット加工(ピュアジェット加工)

水の高圧噴射のみの材料切断で、木材、樹脂など、いわゆる柔らかい材料の切断に適しています。

② アブレッシブジェット加工

研磨剤は高圧水の負の圧力に吸引されて、高圧水とともにノズルから噴射されます。切断能力が高いため、金属、チタン、セラミックなどの難削材の切断に適しており、自動車部品や航空機の新素材加工にも使用されます。



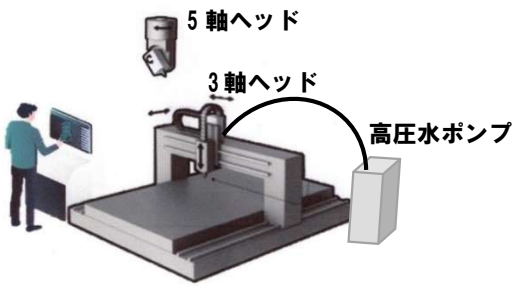


図 111:ウォータージェット加工+

専用の超高圧ポンプは最大 94,000Psi(648MPa)の高圧水を生成し、加圧された水流は 0.1～0.3 ㎜前後のウォータノズル穴からマッハ 2～3 倍程度の速さで噴出されます。一般的にウオータージェットの加工性は噴射圧力できまり、圧力が高くなればなる

ほど研磨剤の速度が増大して運動エネルギーも高くなります。
通常 NC 制御の機械に構成されるため、ノズルは 2 軸のみでなく複数軸の制御もできます。熱を加工で発生せず多くの切りくずが出ないのでクリーンな加工方法です。

チタニウム加工例
Shape Technologies Gruop

5 軸制御加工
Intelligent Cutting Solutions

写真 8：ウォータージェット加工例

(11) 積層造形

金属の積層造形方法には主に金属粉末を用いた「粉末床溶融結合（Powder Bed fusion: PBF）法と指向性エネルギー堆積（Directed Energy Deposition: DED）法があります。
「粉末床溶融結合（Powder Bed Fusion: PBF）法は主として 3 次元複雑形状品の造形のために利用されます。
これに対して、指向性エネルギー堆積（Directed Energy Deposition: DED）法は工作物の表面に異種材料を肉盛りすることで、部品の機械特性の向上や、摩耗した部分に異種あるいは同種材料を肉盛りして部品の補修を行います。

近年、工作機械と結びついたこれらの造形方法は複合加工機の加工機能の一つに加えられ造形終了後に切削仕上げされます。

積層造形データ作成の仕組み

製品の 3 次元 CAD データを図 112 のように輪切りにして、薄板を重ね合わせたような製品の元データである「スライスデータ」とします。このスライスデータに基づいて金属粉体などを材料として 1 層ごとにモデル造形を行います。

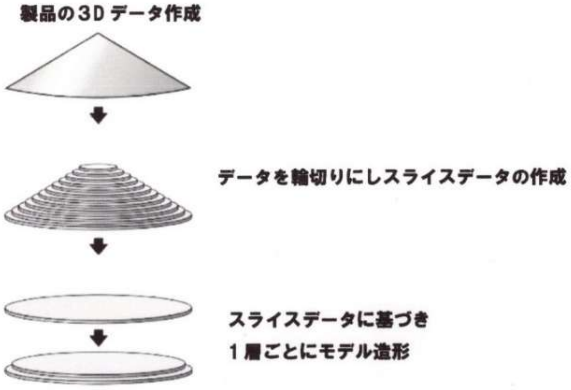


図 112: CAD による形状データの積層化

粉末床溶融結合(Powder Bed fusion: PBF)法

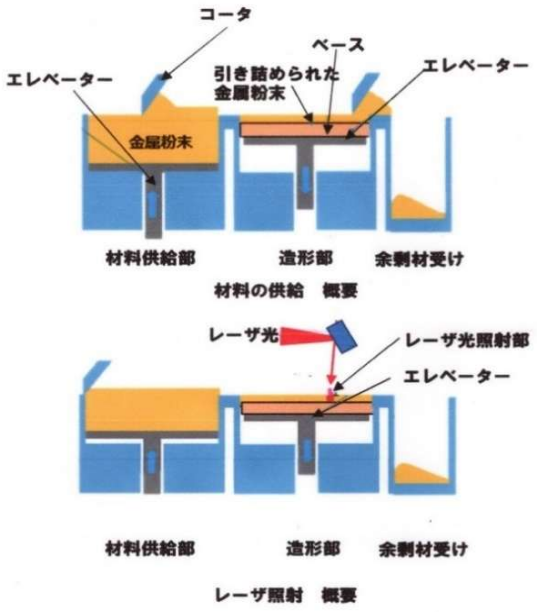


図 113 ：粉末床溶融結合(Powder Bed fusion: PBF)

積層装置は図 113 のように材料供給部、造形部、余剰材受けから構成され、以下のように造形が行われます。

① 造形部の上下に移動するエレベーターが 1 回の造形厚さ分下降

② 材料供給部のエレベーター上に金属粉末を蓄える

③ エレベーターが 1 サイクルごとに約 10 ミクロン(0.01mm)上昇

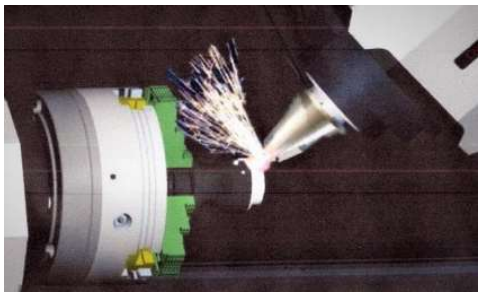
④ 供給部のコータがもち上がった金属粉を造形部に右方向へ掃き出し供給

⑤ 造形部に供給された金属粉を造形部のコータで敷き詰め、余った金属粉は余剰材受けに落とす

⑥ CAD で作成された「スライスデータ」を用い、熱源としてのレーザ光が金属粉表面上に 2 次元位置決めされ、金属粉の表面を照射・溶融・硬化。この作業をスライス層の回数繰り返し造形を行います。

指向性エネルギー堆積(Directed Energy Deposition: DED)法

金属材料の下地にレーザ(熱源)を照射して溶融池を作り、そこに写真 9 のように不活性ガスとともに金属粉末を吹き付けて溶融・凝固させ肉盛をします。これを繰り返して積層することで三次元造形します。この方法は下地になる材料の姿勢と位置を変えることで、自由な位置に新たな材料を加えることができます。複合加工機に搭載されている場合には造形後、切削工具で最終形状に仕上げられます。



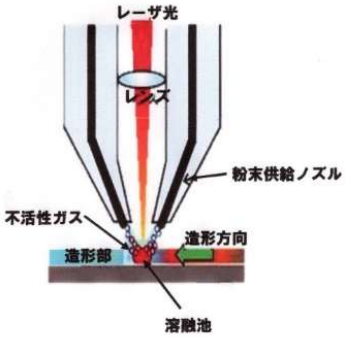
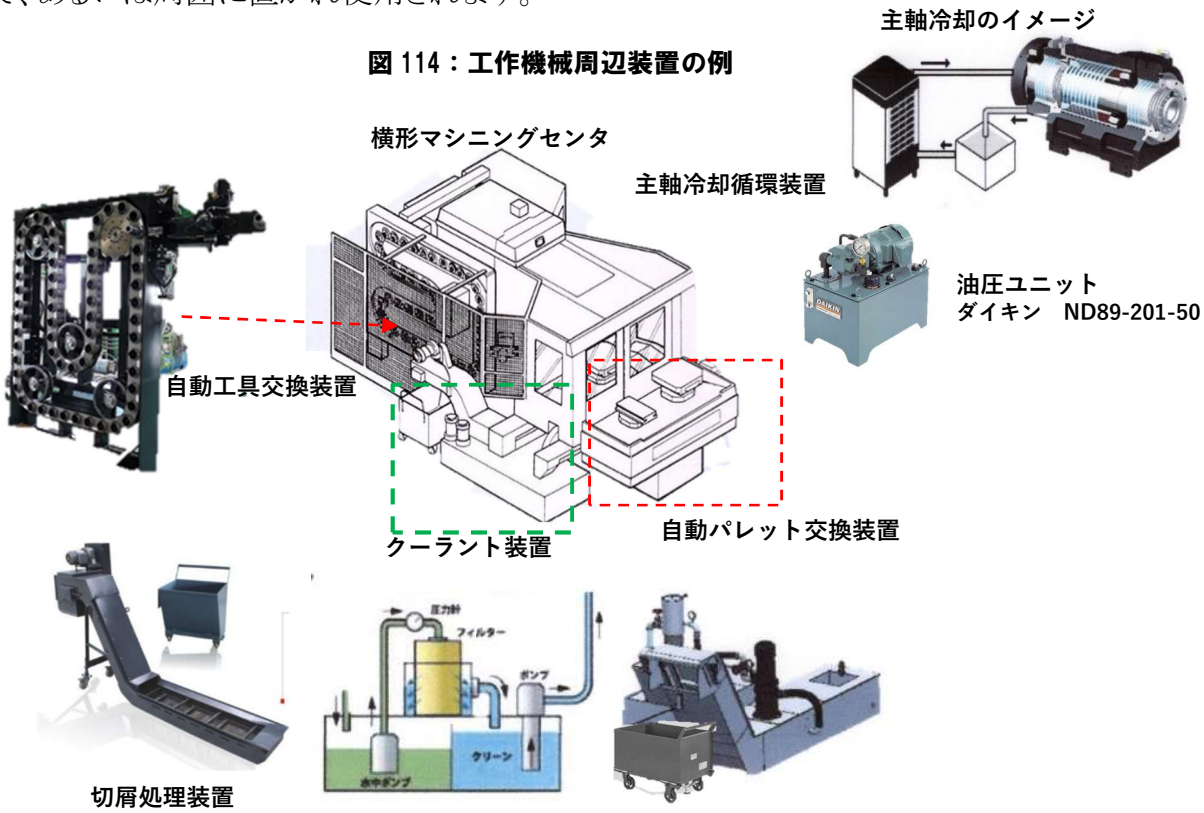


写真 9: 指向性エネルギー堆積(Directed Energy Deposition: DED)法

(12)工作機械周辺装置

NC工作機械では基本機械構成と NC 装置を含む制御装置、そして、周辺装置がつき機能します。例えば、長時間無人運転が可能な横型マシニングセンタでは周辺装置として機械の作動に必要な油圧を供給する油圧タンク、切削工具を収容するマガジンとマガジンから切削工具を取り出し、工具を交換する交換アームから構成される自動工具交換装置、切削切屑を機外にベルトコンベアに似た装置で排出して切屑箱(チップバケット)に集める切屑処理装置、切削時の熱を抑えるため工具と工作物に冷却液を掛けるクーラント装置(注1)、高速回転する主軸の熱上昇による熱変位を防ぐ主軸冷却装置(注2)、また自動で工作物を載せたパレットを交換できる自動パレット交換装置などがあります。このように、色々な工作機械の周辺装置は工作機械に連結して、あるいは周囲に置かれ使用されます。

図 114：工作機械周辺装置の例



★注記

(注 1)切屑処理装置は切屑を回収する装置で、クーラント装置と共に多く使用されています。クーラント装置は加工熱による工作物の熱膨張や工具摩耗を防ぐため、また切屑を流すため大量の切削油(クーラント)を工作物と工具間に供給します。流された切削水と切屑はまず分離され、切屑は切屑処理装置で機外に排出されます。一方切削油は図のようにフィルターで分離されて機械に再度送られます。

(注 2)長時間の主軸回転により主軸頭は熱変形し、それが加工誤差を起こします。そこで、前後主軸ベアリング周りや主軸周りに冷却油を循環させることで、主軸や主軸頭を冷却するための装置です。

(13)生産システム

①トランスファーマシン

特殊な工作物の加工を行うために設計・製作された専用の工作機械のことを専用機と言います。専用機は「トランスファーマシン」と呼ばれる生産システムのラインに組みこまれてきました。ここで、トランスファーマシンの形態には、以下のストレート形とロータリーインデッス形があります

ストレート形は図 115 のように各加工位置(ステーション)が直列に並び、工作物はそれぞれのステーションにコンベアーなどで移動され、必要な加工が行われます。

一方、ロータリインデックス形は図 116 のように各ステーションがインデックステーブルの周囲に並んでいます。

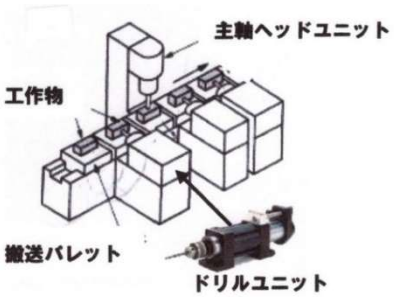


図 115：ストレート形

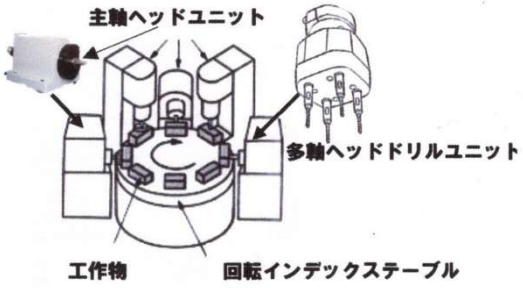


図 116：ロータリインデックス形

どちらの形態のトランスファーマシンも、共に工作物が最初のステーションに送り込まれると自動で最後のステーションまで進み、完成品として送りだされます。また、加工時間を短縮するために、1 つのステーションの加工で穴を一度に数個あける専用機や、異なる加工を同時に行なう専用機が使われます。

近年、加工対象部品の種類は限定されますが、大量生産並みの変種変量生産が可能な「フレキシブル・トランスファー・ライン(FTL: Flexible Transfer Line)が増加しています。この方式は、複数台の汎用性が高い「ライン対応形マシニングセンタ(図 90・62 頁)」や汎用 NC 工作機械を組み合わせ、加工プログラム等の最小の変更により柔軟な生産対応ができることが特徴です。

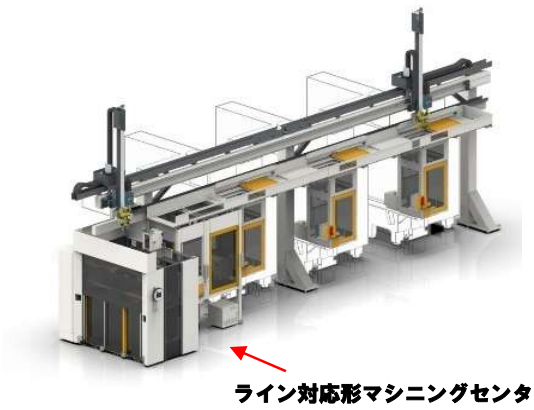


図 117：マシニングセンタのライン例
Promot Automation HP より

②フレキシブル生産システム(FMS: Flexible Manufacturing System)

フレキシブル生産システム(FMS)も、多品種少量生産に対応した生産システムです。生産現場へコンピューターや通信システムの導入が始まった 1980 年代頃から普及が本格化、発展してきた生産方式で、一般的には大規模なものが多いようです。

この生産システムの各工程には自動制御される搬送機(車)や NC 工作機械、産業用ロボットなどが導入され、それぞれの機械をリンクさせ、相互にデータを共有できるため、工作物の取り付けや加工、取り外し、搬送を一元管理することができます。

全体を統合的に制御する情報システムは、各機器への指示や生産状況の把握をリアルタイムに行ない、商品需要の変動に応じて迅速に生産量の増減や生産品目の切り替えを行い、効率よく生産を行うことができます。

この方式では、人の行う業務は計画や指示、監視などが中心で、作業に伴う人為的なミスも減らすことができると言われています。

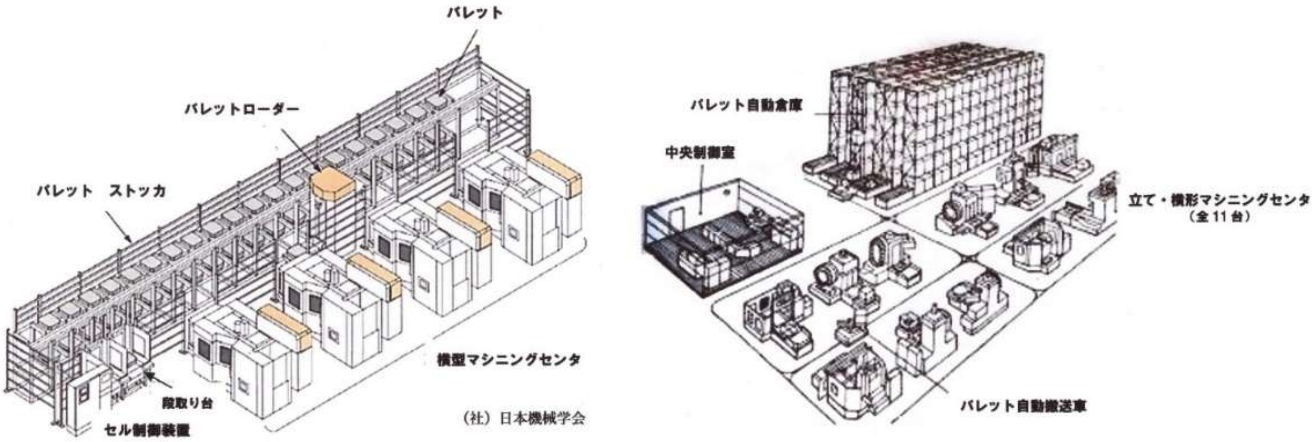


図 118：フレキシブル生産システム（FMS）例

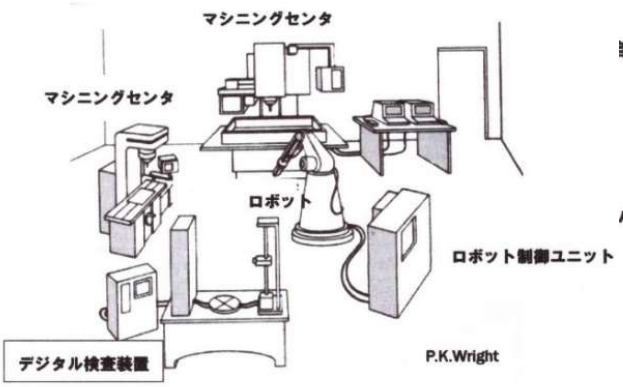
③フレキシブル生産セル(FMC: Flexible Manufacturing Cell)

フレキシブル生産セル(FMC)は多品種少量生産の自動化を中小規模の企業にも導入可能な小規模加工システムとして開発されました。

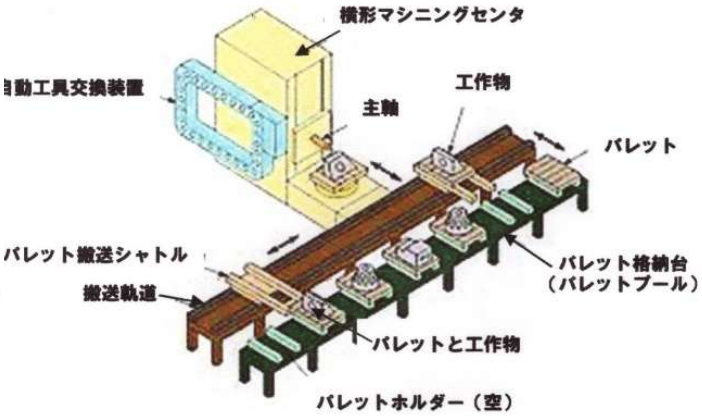
FMC の中核加工機能として用いられる NC 工作機械は、マシニングセンタと NC 旋盤のいずれか，あるいはそれらの組合せです。いずれの機械も切屑や切削水の処理性が良いこと，多様な切削工具や取付具を使用できること，などが求められます。

マシニングセンタの場合，工作物をパレットに取付けることが多いため、図 119 のように機外にパレットを蓄える機能と搬送機能を兼ねたパレットプール化するのが一般的です．また、切削工具については，より柔軟性を高めるため工具マガジンの収納本数を増やすとか，共通の切削工具庫から必要な工具を自動的に供給することも行われます。

一台の工作機械に，簡単な搬送機能を追加した FMC では，工作機械の制御機能がシステム全体を制御することが可能です。しかし、工作機械が複数台あり，周辺機器が複雑になると，全体を制御するためのセルコントローラが使用されます。



P.K.Wright
Manufacturing Engineering and Technology
Third Edition S.Kalpakjian



Narayana Rao K.V.S.S..
National Institute of Industrial Engineering.

図 119：フレキシブル生産セル（FMC）例

８．NC工作機械のプログラム概要

8－1. 座標とNCプログラム

(1)　座標

NCプログラムには「座標」が使用されます。「座標」とは、ある点の位置のことで、例えば、図 120 のように特定のA点が 3 次元座標においてX軸・Y軸・Z軸　3軸が交わる原点(0,0,0)からX軸方向に 15㎜　Y軸方向に 20㎜　Z軸方向に 30㎜のところにあるとします。そこで各軸からA点までの距離の組合わせを「座標」としてA(15,20,30)と表します。

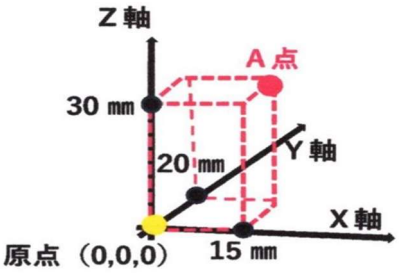


図 120：3 次元座標の基本例

次に図 122 のような立て形手動フライス盤と立て形NCフライス盤を例に挙げ以下にNCプログラムによる動作を説明します。
ここで、立形フライス盤の座標は図 121 のように機械左右方向がX軸、前後方向がY軸、そして上下方向がZ軸になります。図123には立て形フライス盤の手動操作とNC

駆動の比較をまとめます。

図 122 の立て形手動フライス盤の場合、主軸に取付けられる切削工具を図 120 の原点からA点まで動かすには、工作物を左右に動かすX軸ハンドル、前後に動かすY軸ハンドルと上下に動かすZ軸ハンドルを 3 方向にそれぞれ X=15mm, Y=20mm, Z=30mm 動かせばよいことになります。

図 121：立て形フライス盤の座標

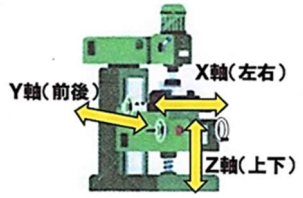
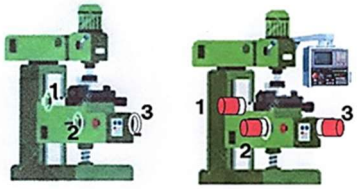


図 122：立て形手動フライス盤と立て形ＮＣフライス



機械部番号	軸名	立て形手動フライス盤	立て形ＮＣフライス盤
1	Ｘ軸	テーブル左右送りハンドル	テーブル左右送りモーター
2	Ｙ軸	テーブル前後送りハンドル	テーブル前後送りモーター
3	Ｚ軸	ニー昇降ハンドル	ニー昇降用モーター

図 123：立て形手動フライス盤と立て形ＮＣフライス盤の駆動軸比較

これに対して、図122　図 123 からもわかるように立て形NCフライス盤は立形手動フライス盤の3つのハンドルが送りモーターに置き換えられているだけなので　X軸　Y軸　Z軸に搭載されている送りモーターを原点から X 軸・Y軸・Z軸方向にそれぞれの座標値だけ動かせばよいことになります。

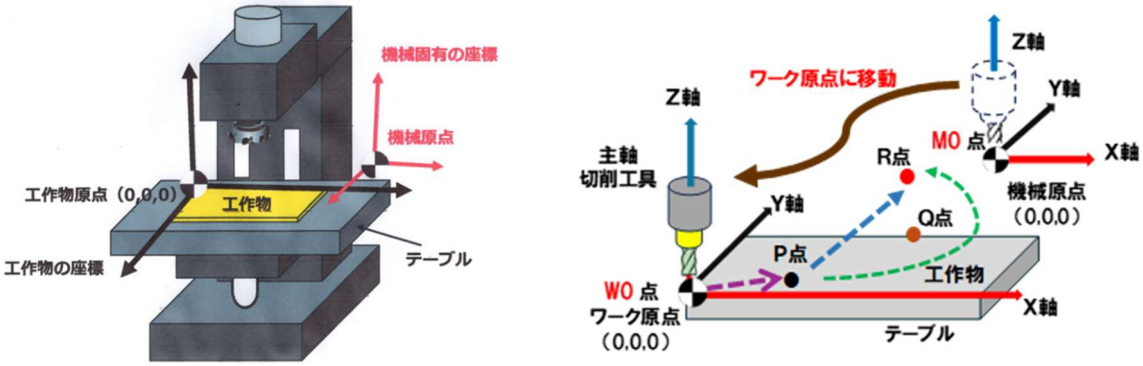


図 124：　機械の固有座標と工作物（ワーク）座標

(2) 機械座標とワーク座標

ある点に主軸に取り付けられた切削工具を移動させて停止させる動作を「位置決め」と言います。NC工作機械の位置決めプログラムでは、図 124 のような機械固有の座標である「機械座標」に加え、テーブル上の工作物に「ワーク座標」と呼ばれる「工作

物座標」を置きます。
　ここで機械座標は機械原点を常に「0」とした座標系で、変更することはできません。機械原点の位置は機械の機種等により異なりますが、ここで例に挙げている立て形NCフライス盤では機械に向かい右奥（作業者が工具の交換を行うと考えられる位置）を機械原点にしているものが多いようです。
　一方、工作物の座標系であるワーク座標は、原点を変更できる座標系です。NC プログラムによる加工を行う場合、このワーク座標を用いて加工します。
　ワーク座標を使用する場合、NC装置にワーク座標原点の座標値を機械座標系における座標値（機械原点からの座標値）を用いてNC操作パネルから手動入力します。一般にワーク座標は 5 種類設定することができます。つまり異なる複数の工作物を加工できるように 5 種類までのワーク座標が登録できるわけです。
そして、自動運転の場合にはプログラムの最初に 5 種類のワーク座標のうちどのワーク座標を使用するかを指令すると、NC装置は入力した機械座標をこの自動運転のワーク座標系原点と理解して、そこから加工プログラムが始められます。

今、図 124のワーク原点W0を工作物左下に置き、この点を加工開始の原点とします。機械原点 M0 にある切削工具（主軸）はまず、工作物の加工原点にW0に移動します。そして、ワーク座標系のP点の座標値だけ動かすことで切削工具（主軸）をP点に動かすことができます。

8－2. NCプログラム

　NCプログラムは NC 装置にコードと呼ばれるデータの入力が必要です。コードは機械の動作（位置決め、直線移動、円弧移動）、工作物の切削条件（送り速度、工具回転数等）、そして自動工具交換、切削水や油圧装置等周辺機器の起動・停止を指令するテキストデータ（文字列や単語、記号などから成り立つデジタル情報）で構成され、これを読み込むことによって機械の自動運転が可能になります。
さて、プログラムを作る方法には以下の「マニュアル（手動）プログラム」と「自動プログラム」の 2 種類があります。

8－2－1　マニュアルプログラム

　図面から加工工程や使用工具などを決定し、さらに工具の回転数や送り速度などの切削条件、工具経路に必要な座標や移動量を手計算して NC プログラムを作成します。プログラム作成では、数値情報と共に、機械の動きを指令する「NC コード」の入力も必要です。

ここで、「NC コード」にはさまざまな種類がありますが、参考までに下の表に重要なコードのみをまとめます。

参考：重要なコード一覧

コード名	機能	内容
G コード	準備機能	NC工作機械の動作を制御する指令コードの一種であるGコードは、主に工作機械の軸の動きや加工条件などを設定するために使用されます。アルファベットの「G」に続けて2桁の数字を組み合わせた形式で表され、座標系、工具補正、移動方法（早送り、切削送り、直線運動、回転運動）などを指定するために使用されます。G00からG99までで100種類の指令を与えることができるようになっていますが、主要なGコードを別途次頁「参考表」にまとめました。
M コード	補助機能	Mコードは補助機能と呼ばれ、アドレスMに続く数値により、主に機械を動作させる指令に使用されます。 例えば"主軸を正転で回転"という命令は"M03"になり、"切削油を吐出"という指令は"M08"になります。Mコードは機械を動作させる指令なので、機械メーカーによって作られ、指令する動作の番号は、機械メーカーによって異なります。
S コード	主軸速度機能	Sコードは主軸の回転数を指定する機能です Sに続き数値を入れ、速度を指令します。この時の単位はRPM(またはmin-1)となり、1分間の回転数を指定できます。
F コード	送り速度機能	Fコードは送り速度を指定する機能です。 単位はmm/minで指定し、１分間に切削工具（主軸）が動く距離を指令します 例えばF300と指令すると、300mm/minの速さで切削工具（主軸）が直線補間または円弧補間で移動するという意味です。
T コード	工具機能	Tコードは自動工具交換装置やターレットにある工具を移動させて交換位置に移動する指令です。 例えば、T02を指定すると自動工具交換装置やターレットの２番目の位置にいる工具が工具待機位置に移動します。このTコードの後、工具交換指令のM06コードが実行されます。

具体例として以下に主要Gコード一覧とそれを使用したプログラム例を挙げます。

前節の座標加工例　図 124 のP点の座標を P(10,5,0)としてワーク原点 W0 から P 点へ切削工具（主軸）を移動させる場合、「早送り位置決め」を指令するコード「G00」と P 点座標の値を使い「G00X10,Y5」とプログラムすると、切削工具（主軸）は早送り速度でX軸とY軸が同時に動きP点へ移動します。

次に、切削送り 150 ㎜/min で工具が 2000 回転/分で切削をしながら P 点へ向かう場合は、「切削送り」の指令であるコード「G01」を主軸（切削工具）の送り速度と主軸の回転数とともに、「G01X10,Y5F150S2000」とプログラムすればワーク原点 W0 から P 点まで指令条件で加工します。（S コード・Fコードについては前頁表を参照）

図 124（再）：　機械の固有座標と工作物（ワーク）

またP点から X・Y・Z 軸上のR点に位置決めする場合はZ軸座標値を加えれば同時に 3 軸が動きます。ただしこの時、図のような円弧（緑色）を描き輪郭制御で進むので円弧の中心 R 点の座標指定が必要です。

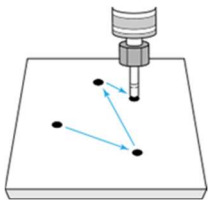
参考：主要Gコード一覧

Gコードの種類	機能	動作
G00	位置決め補間	工具を指定の位置まで早送りで移動させる
G01	直線補間	工具を直線移動させる
G02	円弧補間	工具を時計回りに移動させる
G03		工具を反時計回りに移動させる
G54～G59	ワーク座標系選択	事前に登録した、6つまでのワーク座標のうちいずれかを選択する
G90	アブソリュート指令（絶対座標）	工具の現在の位置を問わず、原点を基準にして指定した座標まで移動する
G91	インクリメンタル指令（相対座標）	工具の現在の位置から、指定した座標まで移動する

(1)　プログラムの指令方法

NCプログラムの作り方には、上記 G コード一覧表にもあるように①インクレメンタル指令方法と②アブソリュート指令方法があります。

図 125：インクリメンタル指令



① インクレメンタル指令

現在位置の座標値から次の移動先の座標値までの移動量を指令する方法です。移動量をプラス値で指令した場合プラス方向へ、マイナス値で指令すればマイナス方向へ動きます。インクレメンタル指令は「増分値指令」ともいわれています。

② アブソリュート指令

ワーク座標（プログラム原点）をゼロ点として移動先の座標値を指令する方法です。アブソリュート指令は「絶対値指令」とも言われます。

つまり、目的地までの地図上で道程を説明するのがインクレメンタル指令、目的地の位置を経度と緯度で示すのがアブソリュート指令です。

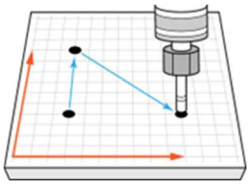


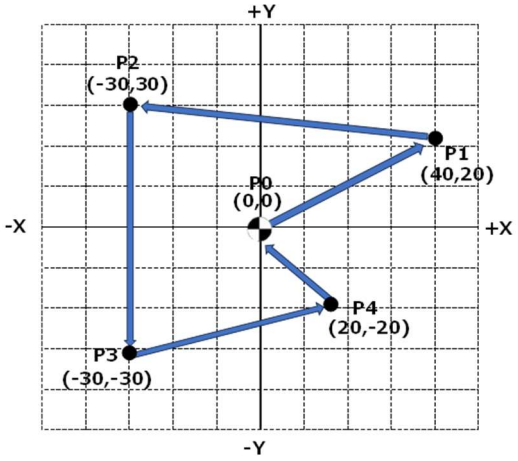
図 126：アブソリュート指令

(2)プログラムの例

例として、切削工具（主軸）が「X 軸 100、Y 軸 100」の座標に位置する場合、インクレメンタル指令で X200、Y200 と入力すると、指令された数値は増分値を示すので切削工具（主軸）は X 軸 300（100+200）、Y 軸 300（100÷200）の座標に移動します。

一方、アブソリュート指令では X200、Y200 と入力すると、指令された数値は絶対値を示すため主軸は X 軸にあと 100（200−100）,Y軸にあと100(200−100)進み X 軸 200、Y 軸 200 の座標に移動します。

図 127 のプログラム例として XY 平面上で、P0 からスタートして P1、P2・・と切削工具（主軸）を移動させ、最後に P0 まで戻るプログラムをアブソリュート方式とインクレメンタル方式を図 127 に示します。P0 がワーク座標の原点で 1 マスは 10mm です。



プログラム

移動先	アブソリュート方式		インクリメンタル方式	
P0 → P2	X40.	Y20.0	X40.0	Y20.0
P1 → P2	X-30	Y30.	X-70.0	Y10.0
P2 → P3		Y-30.0		Y-60.0
P3 → P4	X20.0	Y-20.0	X50.0	Y10.0
P4 → P0	X0	Y0	X-20.0	Y20.0

図 127：プログラム具体例

<u>プログラム内容説明</u>：P2 から P3 への移動では、X 軸は動いていないため両方式ともに指令を省略することができます。
インクレメンタル方式では、今回の例のように工具が始点 P0 から動き始めて P0 へ戻る場合、座標軸ごとに指令値を全て足すとゼロになるため、プログラム指令値に誤りがないかチェックできます。

8-2-2 自動プログラム

自動プログラムは、プログラム作業を人間が行うのではなく、コンピュータが自動的に行う技術のことです。

前節で説明したマニュアルプログラムでは図 128 のような複雑形状部品では、手による計算が大変困難になります。
そこで、パソコン上でNCプログラムを作り、工作機械に転送して加工するためのツール（ソフトウェア）としてCAMが誕生しました。これを CAM（Computer-Aided Manufacturing：コンピューター支援製造）と呼びます。

図 128：同時 5 軸加工部品
技研精機（株）

CAM は CAD（Computer-Aided Design：コンピュータ支援設計）と呼ばれるツール（ソフトウェア）で作成した部品図面を基に、機械加工に必要な NC プログラムを作成することができます。

CAD と CAM の工程をまとめたツール（ソフトウェア）も多く、「CADCAM（キャドキャム）」とも呼ばれます。このように CAD と CAM は、部品設計から製造までのプロセスを効率化するために連携する重要な技術で、CAM の概要を理解するには、まず CAD はどのようなものかその概要を知らなくてはなりません。
以下は CAD についての概要説明です。

(1) CADの概要

CAD には大きく分けて、以下のように 2 次元の平面図を作成する 2D CAD と、3 次元の複雑形状も可視化できる 3D CAD があります。

① 2次元 CAD

2 次元 CAD は X·Y 平面上の製図を行います。昔使用されていた ドラフター（製図作業を効率的に行うための製図台の一種で、T 定規や勾配定規などの製図用具の機能をアームに集約し製図板と一体化した製図台）による製図作業が PC 上で行われるものです。2 次元 CAD による図 129 のような図面には側面、正面、上面から見たそれぞれ形状に寸法や注記を追加することで、図面の情報を伝えることできます。

2 次元 CAD で書かれた形状を加工する場合には、図面を見て頭の中で形状を立体的にイメージしなければならないため、経験とノウハウがきわめて重視されます。

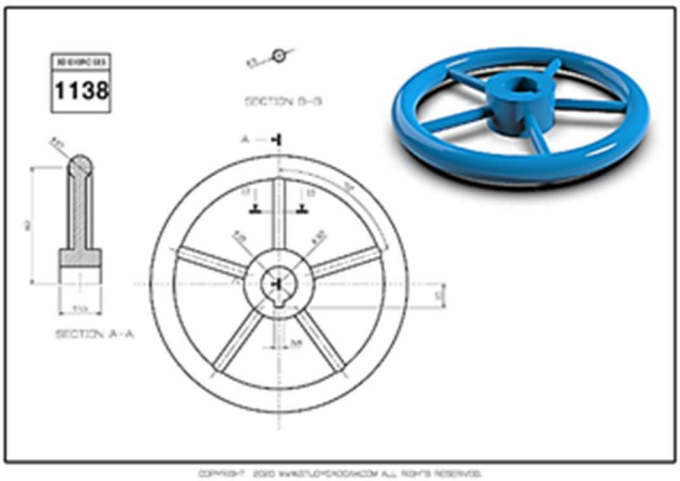


図 129
2 次元 CAD 図面と実際の加工部品

③ 3 次元 CAD

3 次元 CAD は立体空間上で製図を行います。デザイン機能に特化したもの、設計や形状をコンピューター上で表現するモデリング機能を重視したものなど、システムごとに色々な特徴がありますが、2 次元 CAD では表現が大変難しい複雑な曲面や曲線などが視覚的に表現可能とな

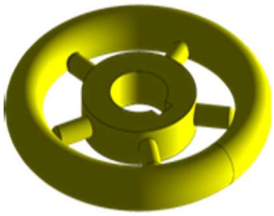


図 130
3 次元 CAD 図面データ

り、その利用が今日主流になっています。

　さて、3 次元CAD には設計やモデリングの際、図 131のように 3 種類の形状表現方法があります。

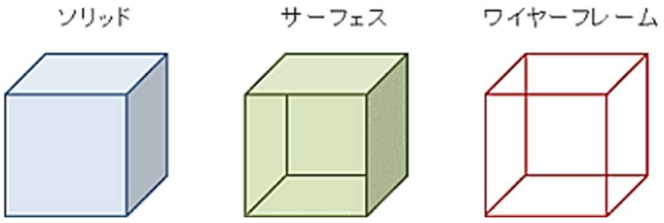


図 131：３次元表現方法

それぞれの表現方法を簡単に立方体で考えると、まず中身までぎっしり詰まっている状態を認識するのがソリッド呼ばれる表現方法です。ソリッドは中身が詰まっていて羊羹のイメージです。
次に、中身が空で、表面だけが認識できる空箱のようなサーフェス、そして中身もなく面もない、枠だけで形状を表現するワイヤーフレームです。

次に上記 3 種類形状表現方法の特徴をそれぞれ述べます。

・ワイヤーフレーム
　ワイヤーフレームは、立体を無数の点でとらえ、それぞれの点を線で結んで表現したものです。

頂点と稜線（りょうせん）の情報によるデータから表現され、データ量は 3 つの表現方法のうちで最も少なく、演算・処理・表示が軽いのが特徴です。
しかし、曲線は直線の集合体としてしか表現できないので、立体感を掴みづらく表面積や質量の計算もできません。
このため、ワイヤーフレームは次に述べるように、サーフェスやソリッドのモデルを作る際に、その過程として使われることが多くあります。つまり、最初にワイヤーフレームを作り、それに沿って面を作ることでサーフェスに変換したり、そこからさらにソリッドへ変換したりという手法がとられます。

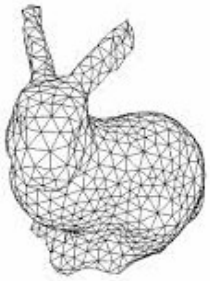


図　132
ワイヤーフレーム例

・サーフェス

サーフェスは、ワイヤーフレームの点と線の表現に面の表現が加わったものです。はじめにワイヤーフレームの線で形状の骨組みを作成します。次にワイヤーフレームで囲まれた部分に対して面（サーフェス)を張っていく手法を「サーフェスモデリング」と呼び、ワイヤーフレームでは不可能な面表示やソリッドでは処理できない複雑な形状のモデルを作る際役立ちます。なおサーフェスには、平面のみで表す平面モデルと曲面での表現が可能な曲面モデルがあり、自動車のボディや家電製品など曲面を多く使うデザイン性が高い形状を表現する際に使用されます。

図　133
サーフェイス例

・ソリッド

ソリッドは、サーフェスの中身まで表現した立体モデルです。

実際にある物体のように切ったり、つなげたりする処理ができ体積・質量の計算も可能です。

現在、販売されている機械用 CAD の多くが、直方体や円柱などの単純な形状を作るのに適している「ソリッドモデル」のタイプです。操作はサーフェスと比較して容易であると言われています。

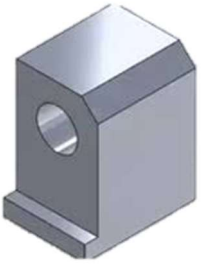


図 134
ソリッド例

複数の平面や曲面の集合体であるデザインやタービンなど曲面が多い設計ではサーフェスでモデルが使用されますが、部品図面や加工プログラムが必要な場合にはそれを最終的にソリッドに変換しなくてはなりません。

CADにより多少の違いはありますが、ソリッドへの変換には以下の3つの方法があります。以下の表に簡単に要点をまとめます。

1. サーフェスに厚みを持たせる
2. サーフェスでソリッドを削る
3. サーフェスを閉じた空間にする。（「閉じた空間」とは、塗りつぶしや面積などを計算できるように線や面で完全に囲まれた領域のことを指します。）

形状作成方法	具体例
サーフェスに厚みを加える方法	サーフェスに厚みを持たせる サーフェスを作り厚みを設定して加えることで、ソリッドに変更します。
ソリッドをサーフェイスで切取る方法	ソリッド　ソリッドをサーフェスでカットする　サーフェス 直方体などの単純なソリッド形状を作り、サーフェスで不要なソリッド部分を削って目的のソリッド形状に変更します。
サーフェスで閉じた空間を作成する方法	面のサーフェスを複数重ねて内部に体積を持たせ（閉じたサーフェイスを作る。）、これをソリッド化します。

図 135
形状作成の例

（2）　CAM の概要

CAM は設計者がCADを使って作成した図面や立体モデルのモデルデータをもとに加工プログラムを自動生成し、NC工作機械に用いることで正確かつ効率的に部品を製作できます。
CAM において、CAD により作成されたモデルデータに、「使用する切削工具」「切削工具の動かし方」「加工速度」などの情報を設定することで、「ツールパス」と呼ばれる図 136 のような切削工具の加工する材料に対する最適な切削経路 （軌跡情報）を自動作成します。

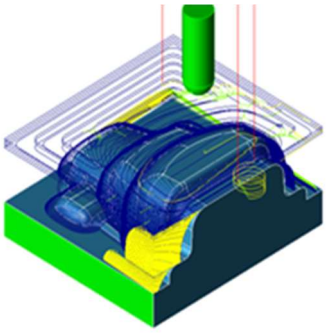


図 136
ツールパス例

ツールパスは「CL（カッターロケーション）データ」とも呼ばれ、それぞれの CAM 独自のデータ形式で出力されます。このため、CL データをNC工作機械に適した、「マニュアルプログラム言語」（G コードなど）に変換する必要があります。そこで、『ポストプロセッサ』と呼ばれる、「CAM データを工作機械言語に変える変換機能」を使うことで、CL データを使用可能な「NC データ」へと変換し、加工プログラムの作成を行います。

ここで、2D CAD により作成された図面を CAM で加工プログラムを自動生成する場合、平面的な情報しか持っていない2D CADデータでは 3D モデル用 CAM が使用でき

ません。そこで 2D の CAD データを 3D CAD で 3D モデルに変換して、立体的な形状を生成して CAM で加工プログラムを作ります。
あるいは、2D CAD 専用の CAM を使用してプログラムを作ることができます。
（逆に 3DCAD データから 2D 図面を自動的に生成することは可能です。）

3D CAM のソフトウェアには、図 137 のような加工プロセスをシミュレーションする機能が備わっています。これによって実際の加工前に工具の動きや材料の削り方を視覚的に確認でき、衝突やエラーを事前に回避することができます。

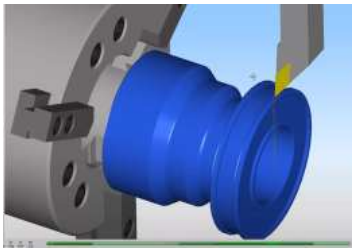


図 137
旋盤加工シュミレーシヨン例

以上