

序

材料の一部を除去して目的とする形状と表面を創成する加工法の代表例に、研磨と切削がある。前者は硬度の高い鉱物質で表面を磨くもの、後者は刃物で材料を削るものである。これらの技術は、人類が営々と受け継いできたもので、その起源は猿人が石器を手にした頃にさかのぼる。つまり、人類は加工技術の進歩とともにその歴史を刻んできたといえる。紀元前 3500 年頃には繊細な研磨作業が必要な銅剣や銅鏡がつくられ、紀元前 1000 年頃には鉄製の剣もつくられている。その後の加工技術の進歩は緩やかであったが、1700 年代後半に蒸気機関が発明されると、加工が人間の手作業から機械を使ったものに移りはじめた。同時に、加工技術は格段の進歩を遂げ、生産性の大幅な向上が図られた。1800 年代に入ると、旋盤の原型が、次いで研削盤の原型がつくられ、工具も急速に発達した。

第 2 次大戦までは、機械加工技術は列強が富国強兵を実現するための中核技術であった。資源のない日本は、加工貿易によって国を支えていたことから、加工技術の重要性がとりわけ大きかった。戦後、加工技術は日本の復興とその後的高度成長を支えたが、バブル景気の到来とともに、若者の理系離れ、製造業離れが進み、情報、金融、サービスに多くの人的・物的資源がつぎ込まれた。バブルの崩壊、円高と産業の空洞化、中進国の急追と日本の工業製品シェア急落を受けて、日本における「ものづくり」の重要性が見直され、ものづくり技術の伝承・革新が急務であるとの共通の認識ができた。このようななか、政府は「ものづくり大学」を 2001 年に設立し、生産技術・技能に関わる中核的人材の育成を始めた。

一方、科学的管理法の父といわれ、また機械加工技術が学問として発達する基礎を築いたテイラー博士 (Frederick W. Taylor, 1856 ~ 1915) の出現を機に、

多くの研究者が加工を科学するに至り、機械加工が技能から工学に姿を変えてきた。しかし、加工現象に関わる因子は非常に多く、その関係も複雑であるため、加工現象が科学的に解明されている部分はいまだ少なく、継続的な研究が不可欠である。しかしながら、大学における機械加工技術の教育・研究は年々低調になっており、ものづくり技術を基盤としているわが国製造業の将来を危うくしている。

本書は、機械加工のなかで最も多用されている切削、研削、研磨をおもに取り扱うが、これらに関わる事項を知識として提供するばかりでなく、加工を学ぶ学生の科学する力の向上を期する立場から、重要な問題については理論的側面の記述を重視した。また、工学的素養を有しながら加工を学んでこなかった諸兄に、機械加工をわかりやすく解説するとともに、加工を科学できる素地を養うことを目指している。すなわち

1章では、機械加工の意義と分類、切削・研削・研磨加工の概要、および工作機械と基本的な加工原理について概説している。

2章では、機械加工を科学するのに最小限必要と考えられる、材料の変形と破壊、固体の接触と摩擦、摩耗、潤滑、および熱伝導と熱伝達について概説している。これらの知識は、3章以下の理解を助けるものであるため、適宜参照願いたい。

3～5章では、それぞれ、切削、研削、研磨の概要と、これらを取り巻く諸問題の理論的解釈、および最新の工具と加工技術などについて述べている。

本書は、現代工学社から出版されていた『理論切削工学』（小野浩二、河村末久、北野昌則、島宗 勉 共著）を基礎にしつつも、内容的には大幅な見直しを行って、コロナ社より出版することになったものである。これによって、前著に多々見られた難解な理論展開を省き、加工を学ぶ学部生に理解できるよう努めた。また、前著でほとんど触れなかった研磨加工の章を新たに設けるとともに、最近の加工技術の発達と、これにまつわる諸問題の記述を追加した。とはいえ、被削材、工具、工作機械、そして加工技術は日進月歩である。諸兄には、これらの動向と最新の情報に絶えず注意を払っていただきたい。

前述のように、加工に関わる諸問題の理解については、いまだ途上のもの、相対する説のあるものも多い。このため、本書には不完全な記述が多々あると思われる。読者諸兄のご叱正をいただき、今後さらに完全なものに近づけてゆきたい。

終わりに、本書の記述にあたっては、規格類、多くの出版物、論文、ホームページなどを参考にさせていただいた。また、図表についても多数引用させていただいた。この場をお借りして、原著者の方々に心からの敬意と感謝の意を表する次第である。

2013年6月

著 者

目 次

1 章 概 論

1.1	加工の分類と機械加工の原理	1
1.2	強制切込み加工における表面の創成	3
1.3	圧力切込み加工における表面の創成	5
1.4	固体表面の幾何学的創成方式	6
1.5	おもな工作機械とその適用例	8

2 章 金属材料の機械的・熱的性質

2.1	材料の変形と破壊	13
2.1.1	金属材料の結晶構造と変形	13
2.1.2	弾 性 理 論	15
2.1.3	塑 性 理 論	17
2.1.4	材料の破壊現象	19
2.2	固体の接触，摩擦，摩耗，および潤滑	20
2.2.1	固体の接触機構	20
2.2.2	金属の摩擦機構と潤滑	22
2.2.3	金属の摩耗現象	26
2.3	固体の熱伝導	27
2.3.1	熱伝導と熱伝達	27
2.3.2	熱量の蓄積と温度上昇	28
2.3.3	固体の摩擦面温度	30

3章 切 削 加 工

3.1 金属材料の切削機構	35
3.1.1 切りくずの形態	36
3.1.2 切りくずの生成機構	37
3.1.3 構成刃先	38
3.1.4 切りくずの湾曲	40
3.2 2次元切削の力学	41
3.2.1 流れ形切削における切りくずの生成と切削力	41
3.2.2 せん断角の理論	45
3.2.3 せん断領域の降伏せん断応力	49
3.2.4 すくい面の摩擦現象	51
3.2.5 切削抵抗と切削条件	53
3.3 3次元切削	55
3.4 切削温度	57
3.4.1 切削温度の定義	57
3.4.2 切削温度の解析	58
3.4.3 切削温度の測定	64
3.5 切削工具の摩耗と寿命	67
3.5.1 工具材料	67
3.5.2 工具の損耗形態	71
3.5.3 工具の摩耗機構	73
3.5.4 工具寿命の判定基準と寿命方程式	74
3.5.5 工具寿命に影響する因子	76
3.5.6 材料の被削性	79
3.5.7 経済的切削速度	80
3.6 切削液	81
3.6.1 切削液の機能	81
3.6.2 添加剤とその機能	82
3.6.3 切削液の種類と用途	84
3.6.4 切削液の供給法	86
3.7 切削仕上面	86
3.7.1 送り方向の仕上面粗さ	87

3.7.2	切削方向の仕上面粗さ	88
3.7.3	加工変質層	89
3.7.4	加工バリ	93
3.8	切削加工における振動	93
3.8.1	びびり振動	93
3.8.2	自励びびり振動	94
3.8.3	びびり振動の防止法	97
3.9	各種切削加工法	98
3.9.1	旋削加工	98
3.9.2	平削り加工	102
3.9.3	フライス加工	102
3.9.4	穴あけ加工	104
3.9.5	その他の切削加工	106
3.10	最近の切削加工技術	107
3.10.1	超精密切削	107
3.10.2	振動切削	109
3.10.3	難削材の切削加工	111
3.10.4	セミドライ加工, ニアドライ加工	113

4章 研削加工

4.1	砥粒および研削砥石	117
4.1.1	砥粒の種類と性質	117
4.1.2	研削砥石の構造と表示	121
4.1.3	砥石のツルイーニングおよびドレッシング	127
4.1.4	砥石のバランスィング	129
4.2	研削液とその供給方法	129
4.2.1	研削液の選定方法	130
4.2.2	研削液の供給方法	131
4.3	研削機構	132
4.3.1	研削の幾何学	132
4.3.2	砥粒切れ刃の形状と分布	138
4.4	研削抵抗	141
4.4.1	研削抵抗の実験式	142

4.4.2	研削抵抗の理論	143
4.4.3	比研削抵抗と比研削エネルギー	145
4.4.4	研削抵抗の時間的变化	148
4.5	研削温度	149
4.5.1	研削温度の意義と分類	150
4.5.2	工作物の平均温度上昇	151
4.5.3	砥石と工作物の接触面温度上昇	154
4.5.4	研削熱による加工表面の損傷	156
4.6	研削仕上面粗さ	158
4.6.1	仕上面粗さの実験式	159
4.6.2	仕上面粗さの理論	159
4.6.3	ドレッシング条件と仕上面粗さ	166
4.7	研削砥石の損耗と寿命	167
4.7.1	砥粒の破碎と脱落	168
4.7.2	砥粒の摩滅	168
4.7.3	研削性能の劣化と研削抵抗の変化	170
4.7.4	砥石寿命の判定方法	170
4.8	研削加工の精度	172
4.8.1	プランジ研削における寸法の創成過程	172
4.8.2	寸法精度の向上	173
4.9	最近の研削加工技術	174
4.9.1	高能率研削	174
4.9.2	スライシングとダイシング	176
4.9.3	ワイヤソー切断	176
4.9.4	ELID研削	177
4.9.5	自由曲面の超精密研削	178
4.9.6	超精密・微細研削加工	179

5章 研 磨 加 工

5.1	研磨加工の分類と特色	181
5.1.1	研磨加工の分類	181
5.1.2	研磨加工の特色	183

5.2 研 磨 機 構	184
5.2.1 切りくずの生成機構	185
5.2.2 形状生成機構	187
5.2.3 研 磨 理 論	188
5.3 研 磨 資 材	190
5.3.1 砥粒の種類と性質	190
5.3.2 研 磨 液	192
5.3.3 研 磨 工 具	194
5.4 研 磨 仕 上 面	199
5.4.1 仕上面性状	199
5.4.2 仕上面粗さ	201
5.5 研 磨 機	203
5.5.1 片面研磨機	204
5.5.2 両面研磨機	205
5.6 各種研磨加工	206
5.6.1 遊離砥粒による研磨加工	206
5.6.2 固定および半固定砥粒による研磨加工	211
5.7 最近の研磨加工技術	215
5.7.1 プナラリゼーション（平たん化）研磨	215
5.7.2 磁 気 研 磨	216
5.7.3 数値制御曲面研磨（非球面研磨）	216
引用・参考文献	218
索 引	223



概 論

1.1 加工の分類と機械加工の原理

加工工程（manufacturing process, 広義の機械工作）には、溶接、接着などの付加工（プラス加工）と、鍛造、板金などの成形加工（ゼロ加工）、および本書の主題である除去加工（マイナス加工）がある。除去加工は、固体状態にある材料の一部を除去して目的の形状、寸法を得る加工法であり、加工のために投入されるエネルギーが機械的である場合を機械加工（machining）といい、その他のエネルギーを用いる場合をまとめて特殊加工（unconventional process）と呼んでいる。加工工程全体から見た機械加工の位置付けは図 1.1 に示すとおりである。図の最下段にある、エネルギーを複合的に利用する加工

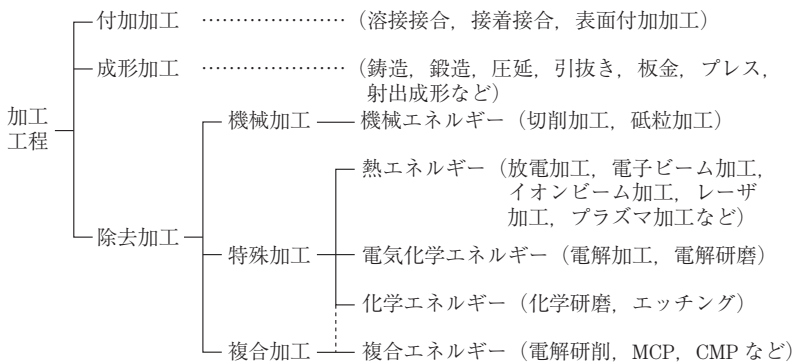


図 1.1 機械加工の位置付け

法は**複合加工** (combined process) と呼ばれており、特殊加工に含める場合もあるが、本書では除去加工の一つのカテゴリーとして扱うことにする。

機械加工では、**工作物** (work, workpiece) の不要部分を機械的に**切りくず** (chip) として除去するために各種の**工具** (tool) が用いられる。**工具材料** (tool materials) は、**被削材** (work materials) よりも十分に硬く、損耗しにくいことが必要である。工具としては、硬質材料を刃物状に成形、加工した**切削工具** (cutting tool) と、不定形の鋳物質である**砥粒** (abrasive grain, abrasives) を用いる場合があり、前者を**切削加工** (cutting)、後者を**砥粒加工** (abrasive process, abrasive machining) と呼んでいる。また後者は、工具の形態によって**固定砥粒加工**、**半固定砥粒加工**、**遊離砥粒加工**に分けられる。図 1.2 に機械加工の分類と具体例を示す。

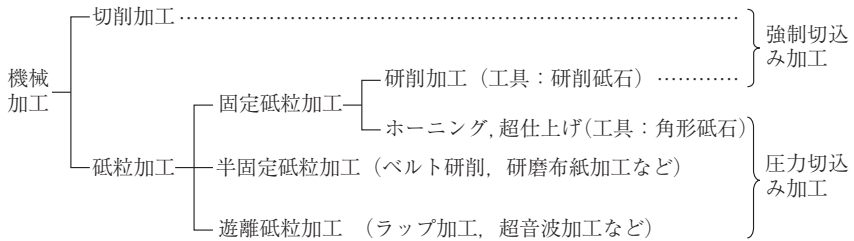


図 1.2 機械加工の分類と具体例

一方、工具と工作物を幾何学的に干渉させながら、両者を相対運動させて切りくずを排出するのが機械加工であり、この相対運動を行わせる装置が**工作機械** (machine tool) である。機械加工は、工具と工作物との干渉の与え方によって、**強制切込み加工** (controlled depth machining) と**圧力切込み加工** (controlled force machining) に分けられる。前者には、各種形状の切削工具を用いて比較的大きな切りくずを排出しながら加工する**切削加工**と、高硬度の鋳物質を固めて軸対称形状に成形した**研削砥石** (grinding wheel) を用い、小さな切りくずを排出しながら加工する**研削加工** (grinding) がある。図 1.2 の右側に、強制切込み加工と圧力切込み加工の区分を付記している。また、砥石

または遊離砥粒を用いた場合における強制切込み加工，および圧力切込み加工の概念図を図 1.3 に示す^{1)†}。

強制切込み加工では，加工形状を制御しやすく加工能率も高いが，加工表面の損傷が大きくなりやすいことから，加工能率を重視する場合に適用される傾向がある。

圧力切込み加工では，個々の砥粒切れ刃の切込みが小さく，微細な加工の集積によって材料の除去が行われることから，おもに仕上面の精度や品質を重視する場合に適用される。

しかし，いずれの加工法においても，切りくずを出すにあたって表面組織の塑性流動や破壊を伴う。このため，結晶組織に乱れない高品質な表面の創成を行うには，工作物よりも軟らかい材料を工具に選ぶ必要がある。例えば，ガラスの研磨にはこれよりも硬度の低い酸化セリウム (CeO_2) が用いられており，能率的に高品質な仕上面が創成できる。これは，ガラスと酸化セリウム粒子間に発生する化学的作用が表面の除去に寄与するためとされている。このような加工法は，メカノケミカルポリッシング (mechanochemical polishing, MCP) と呼ばれている。一方，化学的な研磨作用を主としたケミカルメカニカルポリッシング (chemical mechanical polishing, CMP) があり，電子デバイス基板などの超精密加工に適用されている。

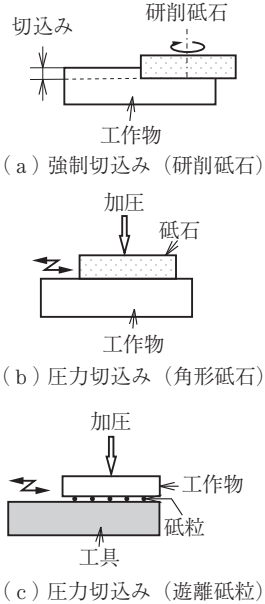


図 1.3 砥石または遊離砥粒を用いた場合における強制切込み加工，および圧力切込み加工の概念図¹⁾

1.2 強制切込み加工における表面の創成

強制切込み加工では，工作機械によって工具と工作物を相対運動させ，工具

† 肩付き数字は，巻末の引用・参考文献の番号を表す。

の運動軌跡を加工面に転写することで、目的とする形状を創成する。この場合、加工精度は工作機械の運動精度に依存する。このように、加工において相對運動が工作物に写し取られることを**母性原理** (copying principle) という。工作機械は各種の機械部品を生み出すことから**マザーマシン** (mother machine) と呼ばれるが、狭義には工作機械をつくる工作機械がマザーマシンである。加工精度は母性原理に従うので、生産された工作機械は基本的にマザーマシンの精度を上回ることはできない。母性原理を克服してさらに精度を高めるには、高度な技能をもつ職人の手作業や圧力切込み加工などの力を借りる必要がある。

切削加工における工具は、高速度鋼や超合金などの高硬度材料でつくられ、その刃先を希望する形状に成形して使用する。切削工具は、切れ刃の数によって**単一刃工具** (single-point tool) と**多刃工具** (multi-point tool, multi-edged tool) に分けられる。

単一刃工具とは、旋削用バイトのようにその先端に1個だけ主切れ刃を備えているもので、多刃工具はドリルやフライスのように2個以上の切れ刃を有するものである。切削加工法の種類と、それらに使用される工具、工作機械、ならびにおもな加工面形状をまとめて**表 1.1** に示す。なお、表に掲げた工作機械のうち主要なものの概要と適用例は、後述の1.5節にまとめて示す。

一方、研削加工においては、砥粒を結合剤で固めて軸対称形状に成形した研削砥石を工具として用いる。砥粒は非常に硬いが、その反面もろいので、不規則に劈開^{へき}あるいは破碎して切れ刃が形成される。砥石の作業面には多数の切れ刃が存在するため、切れ刃当りの切込みは非常に小さく、面粗さも良好で、おもに仕上加工に用いられる。

研削加工は強制切込み方式の加工法であるため、形状の創成能力が高く（前加工面形状の影響を受けにくく）、高い寸法・形状精度を必要とする場合に適している。**表 1.2** に加工面の形状による研削加工法の分類と工作機械の例を示す。なお、表に掲げた工作機械の概要と適用例は、1.5節に示す。

表 1.1 切削加工法の種類と、それらに使用される工具、工作機械、ならびにおもな加工面形状

分類	切削法	工具	工作機械	おもな加工面形状
単一刃工具によるもの	旋削	旋削バイト	旋盤	円筒外面, 円すい面
	中ぐり	中ぐりバイト	中ぐり盤	円筒内面
	平削り	平削りバイト	平削り盤	平面
	形削り	形削りバイト	形削り盤	平面
	立削り	立削りバイト	立削り盤	平面, 円筒面
多刃工具によるもの	フライス加工	フライス	フライス盤	平面, 溝
	穴あけ	ドリル	ボール盤	丸穴
	リーマ加工	リーマ	中ぐり盤など	丸穴
	ブローチ加工	ブローチ	ブローチ盤	異形穴
	ホブ切り	ホブ	ホブ盤	歯車歯面
	ヤスリ仕上げ	ヤスリ	手動	曲面, 平面
	形彫り	形彫り工具	形彫り盤	金型の曲面など

表 1.2 研削加工法の分類と工作機械の例

加工面形状	加工法	工作機械
平面	平面研削	横軸形平面研削盤
		立軸形平面研削盤
円筒面	円筒内面研削	内面研削盤
	円筒外面研削	外面研削盤
自由曲面	自由曲面研削	例えば, 多軸 CNC 研削盤
その他特殊形状	歯車研削など	歯車研削盤など

1.3 圧力切込み加工における表面の創成

圧力切込み加工は、角形の砥石、遊離砥粒などに圧力をかけて工作物に押し付け、工作物の表面を微量ずつ除去するものである。加工速度は、工作物と砥石（あるいは、砥粒の付着したポリシャなど）との相対移動距離と圧力によって支配される。このとき、圧力の高いところは優先的に除去される（選択原則

が働く)が、後述の半固定砥粒加工の場合には、形状の創成能力が低く、前加工面形状の影響を受けやすい。一方、圧力を小さくすれば切れ刃当りの切込みはきわめて小さくなり、滑らかな光沢のある表面を容易に得ることができる。

圧力切込み加工には、砥粒を結合材で固めた状態で使用する超仕上げ、ホーニング、固定砥粒ラッピングなどと、砥粒をばらばらな状態で用いるラッピング、超音波加工などがある。また両者の中間に、半固定砥粒を工具として用いるベルト研削、研磨フィルム加工、バフ仕上げなどがある。圧力切込み加工の分類と加工機械の例を表 1.3 に示す(研削加工は、強制切込み加工であるのでこの表からは除いている。一方、バレル加工や噴射加工では加工圧力のコントロールは難しいが、強制切込み加工ではないのでこの表に含めている)。なお表中には、砥粒加工を固定砥粒加工と遊離砥粒加工の二つに区分する場合についても示している。

表 1.3 圧力切込み加工の分類と加工機械の例

加工方式		加工法	加工機械の例
固定砥粒加工	固定砥粒加工	ホーニング	ホーニング盤
		超仕上げ	超仕上げ装置(旋盤などに装着)
半固定砥粒加工		ベルト研削	ベルト研削盤
		フィルム研磨	フィルム研磨機
遊離砥粒加工	遊離砥粒加工	バフ仕上げ	バフ研磨機
		ラッピング, ポリシング	ラップ盤, ポリシング盤
		超音波加工	超音波加工機
		バレル加工	バレル研磨機
		噴射加工	噴射加工機, ウォータージェット切断機

1.4 固体表面の幾何学的創成方式

切削加工では、工作物上を工具が掃走運動(スウィープ)することによって表面が創成される。いま切削工具の先端を一つの点要素と考えると、点要素が

運動することによって線要素ができ、この線要素の向きと直行する方向に移動する（送る）ことによって面が出来上がる。線要素の運動形態と創成される面の形状、および該当する切削法を示したのが表1.4である。なお、創成面の図中の矢印は線要素が移動する方向を示している。

表1.4 線要素の運動形態と創成される面の形状、および該当する切削法

分類	線要素	送り運動	創成面		切削法
a	直線	平面	平面		平削り、形削り
b	直線	回転	円筒面		立削り
			円すい面		
c	円または円弧	直線	円筒面		旋削、中ぐり
			円すい面		旋削（テーパ削り）
			平面		正面フライス加工、正面旋削
d	円または円弧	回転	球面		球、ドーナツ面の一部は総形加工で可、全面は不可
			ドーナツ面		
e	曲線	直線	2次曲面		総形加工
f	曲線	回転	回転体曲面		総形加工
g	円	曲線	回転体曲面		ならい加工
h	直線	曲線	2次曲面		ならい加工

基本的な線要素に直線と円弧がある。工作機械の運動のなかで直線運動と回転運動は単純な機構で実現できるので、精度上もコスト面でも有利である。しかも、機械部品の形状は平面や円筒面を基本にしたものが多い。したがって、切削加工において広く利用されている面形成の様式は、表1.4のa, b, cである。このうちcの場合には、線要素をつくるための点要素の円弧運動、および

面を形成する送り運動は同時に与えられることが多い。この場合、線要素は断絶することなく長く続いた、らせんあるいはアルキメデスらせんとなる。

工具が切れ刃として初めから直線以外の線要素を有しているものを**総形工具** (formed tool, forming tool) といい、曲面などの形状を能率的に創成するために使用される。

切削加工においては、線要素を間欠的に送ることによって面を創成することから、全表面をすきまなく掃送運動させることはできない。このため、理想的な面に近づけるには、送りピッチを小さくする必要があるが、反面、加工時間は増大する。

1.5 おもな工作機械とその適用例

前節までに掲げた工作機械のなかで、主要なものの概要 (JIS B 0105 参照) を簡単に述べる。

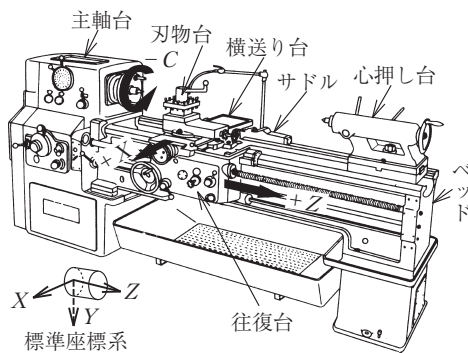


図 1.4 普通旋盤²⁾

図 1.4 に示す**旋盤** (lathe turning machine, lathe) は、円筒状工作物の内・外面および端面の旋削が可能で、溝やねじを創成することもできる。また刃物台を傾斜させれば、円すい面の加工も可能であるなど、万能的な工作機械である。類似した構造の工作機械に、主軸を垂直に配置した**立旋盤** (vertical lathe)

があり、大形円形部材の旋削に用いられる。

図 1.5 に示す**ラジアルボール盤** (radial drilling machine) は、おもに**ねじれドリル** (twist drill) を用いた穴あけに使用されるもので、アームの振り回しによる加工位置の設定が可能である。類似した工作機械に**直立ボール盤** (upright

索 引

【あ】	遠心力バランス法	129	加工硬化	15, 22	
	延性材料	37	加工能率	174	
圧縮残留応力	210	延性破壊	19	下降伏点	15
圧力切込み加工	2, 6	円柱状スライダ	30	化合物層	89
穴あけ加工	104	円筒外面研削	134	加工変質層	
アプレシブ摩耗	26, 73	円筒研削盤	11		81, 87, 89, 92, 186
アモルファス	69	円筒内面研削	134	加工焼け	89
粗 さ	86	エンドミル	103	加工量	188
荒ずり	195			加振周波数	97
アルキメデスらせん	8	【お】		加水分解	121
アルコール類	25, 83	凹凸説	23	形削り	102
アルミナ	117, 119	大越式結合度試験	123	形削り盤	10
泡消し剤	83	オスカー式レンズ研磨機		形直し	117, 127
			204	片面研磨機	204
【い】	オプトエレクトロニクス			カップ形砥石	11
硫黄快削鋼	79, 111	デバイス	108	ガーネット	117
一次びりり振動	97	オレイン酸	26	カルボキシ基	26, 83
一般研磨用微粉	121	温度伝導率	32, 60	乾式メカノケミカル	
一般砥粒砥石	125	温度-ひずみ速度効果	59	ポリシング	202
移動熱源	30, 32, 34, 58			乾式ラッピング	199
異方性	88	【か】		環状化合物	83
インコネル	82, 111	解砕形アルミナ砥粒	119	完全塑性体	59
		快削黄銅	79	乾燥摩擦	24
【う】		快削鋼	79	ガンドリル	105
ウイスカー	70	快削添加物	79		
上すべり	173	回転軸偏心	104	【き】	
ウェブ	105	回転バランス	125	機械加工	1
ウォーム研削盤	10	界面活性剤	84, 193	機械要素	13
ウレタン樹脂	196	外面長手切削	99	規格番号	126
		改良ピット法	123	キー溝	10
【え】		化学吸着	25, 83	気 孔	121, 197
エアベアリング	109	化学研磨	182	機上測定	109
永久ひずみ	15	化学蒸着	69	機上バランス法	129
液体ホーニング	210	角形砥石	11	ギヤマーク	94
エッチング	202	拡 散	20	キャリア	205
エメリー	117	拡散摩耗	73	吸着膜	25
エリッド研削法	176	角フライス	103	境界潤滑	25, 83
遠心破壊強度	125	過減衰	95	境界膜モデル	25

境界摩擦	73		工具-切りくず接触面温度	
共振周波数	97	【け】		60, 63
強制切込み加工	2, 3	経済的切削速度	80	工具糸角
強制びびり振動	93	傾斜切削	40, 56	工具材質
凝着	20	形状番号	126	工具材料
凝着温度	74	結合剤	124, 126	工具寿命
凝着説	23	結合度	122	工具走査速度
凝着摩擦	26, 27, 74	結晶粒界	88	工具損耗
鏡面	184, 200	ケミカルポリッシング	182	工具-被削材熱電対法
鏡面仕上げ	158	ケミカルメカニカル		工作機械
極圧添加剤	83	ポリッシング	3, 182	工作物
極限粗さ	165	研削液	129	——の平均温度上昇
極性基	25	研削温度	130, 149	工作物温度
局部弾性変形	173	研削加工	2, 4, 116	工作物材質
局部的熱変形	150, 173	研削仕上面粗さ	158	交さ条痕
切欠き	19	研削条痕	138	211, 212
切りくず	2, 35	研削抵抗	141, 143, 145	格子間原子
——の生成	185	研削砥石	4, 116	格子欠陥
——の湾曲	40	研削焼け	156	格子面
切りくず厚さ	41	研削割れ	158	硬脆材料
切りくず温度	150	原子間隔	14	合成切削力
切りくず流出角	56	原子配列	14	構成刃先
切りくず流出速度	42, 56	原子密度	13	38, 39, 53, 87
切込み深さ	36, 41, 54	減衰係数	94	後続切れ刃
切り残し	173	減衰自由振動	95	163
亀裂形切りくず	37	研磨	181, 195	高速度工具鋼
切れ刃稜丸み	49	研磨液	183, 192	66
切れ刃の先端角	138, 163	研磨工具	194	光電検知器
切れ刃の立体的平均間隔	164	研磨剤	117, 183	66
		研磨資材	190	光導電効果
金属	13	研磨パッド	194	66
金属石蝕	26	研磨布	196	降伏圧力
		研磨フィルム加工	6	15, 22, 52
【く】		研磨ベルト	213	降伏せん断応力
グラスファイバ	125			49
クラック	19, 91	【こ】		15
グリッド	210	高圧注水システム	132	降伏点
グリッドブラスト	210	光学顕微鏡	138	18
クリーブ破壊	19	光輝帯	74	降伏理論
クリーブフィード研削	175	鋼玉	117	18
クレータ摩擦	40, 72, 75	合金工具鋼	68	26
クロム酸塩	84	工 具	2, 184	鉍油
クーロン力	13			固相反応
				186, 208
				固体摩擦
				24
				固定砥粒
				181
				固定砥粒加工
				2
				固定砥粒ラッピング
				6
				コーテッド工具
				69
				コーナ半径
				77
				コーナ摩擦
				72
				ゴムボンド
				125
				コランダム
				117
				転がり式バランス法
				129
				コンスタンタン線
				155

コンセントレーション	126	四塩化炭素	83	親油端	84
コンタクトホイール	213	磁気研磨	216		
コンタリング研削	174	システム剛性	173	【す】	
コンディショナ	199	自生作用	116, 122	水酸基	25
【さ】		磁性砥粒	216	垂直応力	43
再結晶温度	39	自生発刃作用	116	垂直研削抵抗	141
最高使用周速度	126	磁性流体	216	垂直すくい角	56
最終仕上げ	196	湿式ラッピング	199	垂直力	43
再生びり振動	94	脂肪酸	25, 83	水溶性切削油剤	85
最大切込み深さ	104	斜軸マイクロ非球面研削法		数値制御曲面研磨	217
最大クレタ深さ	72, 77	射出成形	179	数値制御工作機械	12
最大主応力説	18	修正温度	51	数値制御旋盤	12
最大せん断応力説	18, 47	修正リング	188, 198	スエード	197
最大高さ粗さ	87, 160	修正リング形研磨機	205	すきま理論	189
最大谷底高さ	164	集中度	126	すくい角	38, 41, 77
最大砥粒切込み深さ		自由電子	13	すくい面	37
	133, 176	主応力	16, 17	ステアリン酸	25, 83
最大逃げ面摩耗幅	77	主応力面	16	ステップ応答	29
再焼入れ層	90	主ひずみ	17	砂かけ	195
作業性	82	寿命の判定基準	74	スパークアウト研削	173
ざくろ石	117	寿命方程式	75	スピードストローク研削	
最小仕事の原理	45	潤滑剤	24		174
擦過痕面	200	潤滑作用	81	すべり線	48
サドルタイプ	11	潤滑性	81	すべり線場の理論	47
錆止め剤	82	潤滑油	26	すべり面	13
サーメット	69	焼結	68	スライシング	176
作用系角	99	焼散性有機物	125	スラリ	193
酸化クロム	119, 191, 204	正面フライス	9, 102	すり減り摩耗	150
酸化ケイ素	192	シリカ系スラリ	192	寸法効果	49
酸化セリウム		シリケートボンド	125	寸法の創成過程	172
	3, 190, 192, 208	ジルコニア	119, 192	【せ】	
酸化被膜	24	ジルコニア系スラリ	192	静圧軸受け	108
酸化防止剤	83	自励振動	96	静止熱源	34
サンドブラスト	210	自励びり振動	94	静水圧成分	18
残留ひずみ	15	磁歪振動子	109	脆性材料	19, 37
【し】		真実接触	20	脆性破壊	19, 37
仕上寸法精度	141	真実接触点温度	33	静電気力	83
仕上研削	119	親水端	84	精密研磨用微粉	121
仕上面	184	振動切削	109	赤外線サーモグラフィ	67
仕上面粗さ	38, 87, 158	シンニング	105	赤外線センサ	67
シェーピングカッタ	10	振幅拡大ホーン	109, 208	赤外線ファイバ温度計	66
		振幅拡大ホーン	208	赤外線フィルム	67

積層欠陥	15	総形工具	8	弾性接触	20
切削液	81	総形切削	99	弾性理論	15
切削液供給	113	総形フライス	103	単石ダイヤモンドドレッサ	128
切削エネルギー	44	相当応力	18	炭素工具鋼	68
切削温度	57	粗研削	122	炭素繊維強化プラスチック	112
切削温度測定	64	組織	123	タンブリング	209
切削加工	2, 4, 35	塑性変形	22		
切削機構	35, 55	塑性理論	17		
切削工具	2, 35				
切削主分力	43	【た】		【ち】	
切削断面積	44	ダイオード	66	チゼル	105
切削抵抗	44, 53	耐凝着作用	81	チタニウム	111
切削熱	57	耐凝着性	82	窒化ケイ素	201
——の流入割合	62	耐衝撃性	125	チップング	72, 73, 77
切削背分力	43	ダイシング	176	チップブレーカ	40, 101
切削比	42	体心立法格子	13	チップポケット	127
切削油剤	81	対数ひずみ	17	チャック	97
接触機構	20	耐摩耗性	210	鑄鉄ラップ	194, 206
接触弧長さ	135, 137	ダイヤモンド	71, 119, 191	稠密六角格子	13
接線研削抵抗	141	滞留時間	217	超 LSI	215
セミドライ加工	113	対流熱伝達	28	超音波加工	6, 208
セラミック	70, 124	楕円振動切削	110	超音波振動	110, 208
セリア系スラリ	192	多気孔砥石	125	超硬合金	68
繊維強化セラミック	70	琢磨機	204	超高速研削	175
旋削	98	多結晶	15	長鎖状脂肪酸	26
セントレス研削	125	多結晶ダイヤモンド	71, 112	超仕上げ	6, 212
せん断エネルギー	44	多刃工具	4, 116	超精密研削	122
せん断応力	14, 16, 43	多層配線化	215	超精密工作機械	108
せん断角	38, 41, 45	脱落	167	超精密切削	107
せん断形切りくず	36	立削り盤	10	超耐熱合金	70, 176
せん断仕事	57	立軸回転テーブル形		超砥粒	119
せん断速度	42	平面研削盤	11	超砥粒ホイール	126
せん断強さ	14	立旋盤	8	直立ボール盤	8
せん断ひずみ	16, 42	縦弾性係数	16, 20	直角ノズル	131
せん断ひずみエネルギー説	18	縦ひずみ	16	チルド鑄鉄	70
せん断面	38	ターニングセンタ	12	沈降試験法	122
——の平均温度	58	タービンプレード	176		
せん断面温度	63	単一刃工具	4	【つ】	
旋盤	8	炭化ケイ素	117, 201	ツルーイング	28, 117
		炭化ケイ素質砥粒	117	連れ回り空気流	131
【そ】		弾性回復	15		
層間絶縁膜	192	弾性限度	15	【て】	
				出口バリ	93

テーバ削り	99	流れ形切りくず	36, 100	パニシ作用	91
テーブル形横中ぐり盤	9	流れ形切削	41	羽根車	210
転位	14	斜め刃工具	98	パフ仕上げ	6, 214
転位密度	90	鉛快削鋼	79	破面	20
電解インプロセス ドレッシング	177	難削材	112	パーライト	78
添加剤	82			パラフィン	25
電気抵抗試験法	122	【に】		バランスィング	129
点欠陥	15	ニアドライ加工	114	バリ	93, 210
電着砥石	125	膠付け	214	負の——	93
転動	185	乳化	84	貼付け皿	204
転動砥粒	200	乳化形	85	バリ取り	216
天然砥粒	117			バレル研磨	6, 181, 209
テンパーカラー	156	【ね】		半固定砥粒	6, 181
天びん式バランス法	129	ねじれドリル	8, 105	半固定砥粒加工	2
		ねじれ刃	103		
【と】		ねずみ鑄鉄	194	【ひ】	
砥石構成の3要素	121	熱拡散率	32	ピエゾ振動素子	110
砥石寿命	137	熱間静圧プレス	68	比加工量・圧力比	188
砥石寿命時間	170	熱起電力	64	光透過沈降法	122
砥石の5因子	121	熱検知器	66	光ファイバ	66
同時研削切れ刃数	143, 144	熱硬化性樹脂	125	非球面	178
投射加工	210	熱伝達	27, 28	非球面形状	109
特殊加工	1	熱電対挿入法	65	非球面研磨機	217
独立発泡系	196	熱伝導	27	比研削エネルギー	147
ドライ加工	114	熱の流入割合	33	比研削抵抗	144, 146
トラバース研削	141	熱変態	90	比工具摩耗量・圧力比	188
砥粒	2, 117			ひざ形立フライス盤	9
人造の——	117	【の】		ひざ形横フライス盤	9
——の種類	121	ノーズ摩耗	72	被削材	2
砥粒加工	2			被削性	79
砥粒切込み深さ	133	【は】		ひずみ増分説	17
砥粒切れ刃	116, 138	廃液処理	86	ひずみ速度	51
砥粒切削断面積	135	ハイスビード		ひずみ速度効果	47
砥粒切削点温度	150	ストローク研削	176	比切削抵抗	44
砥粒率	123	バイト	98	比せん断エネルギー	147
ドレッシング		破壊強度	19	ビッカース硬さ	111
	117, 127, 197	破壊現象	19	ピッチ	195
ドレッシング条件	158	歯車研削盤	10	引張残留応力	91, 158
		歯車シェーピング盤	10	引張強さ	111
【な】		破砕	167	ビトリファイドボンド	124
内面研削盤	11	刃先形状表示法	99	ピーニング効果	91
中ぐり	99, 106	刃状転位	14	びびり振動	88, 93
		バックラッシュ	104	びびりマーク	88

ラップ液	206	リニアスケール	108	冷風研削	132
ラップ材料	194	リーマ	106	レーザセンサ	108
ラップ仕上げ	194	硫化マンガン	53	レジノイドボンド	125
ラップ定盤	188	粒 径	121, 184	レビンダ効果	82
ラップ盤	12	流体潤滑	24	レンズ研磨	195
ラバー砥石	125	粒 度	121	レンズ研磨機	204
		両面研磨機	205	連続切れ刃間隔	134, 160
		臨界減衰	95	連続発泡系	196
【り】		【れ】		【わ】	
立体ひずみ	55				
立方晶窒化ホウ素		冷却作用	81	ワイヤソー	177
	70, 119, 191				

【数字】		【E】		【N】	
1 次遅れ系	29, 153	electrolytic in-process		Newton の法則	28
20 min 寿命切削速度		dressing	177	Ni 基超合金	111
	79, 111	ELID 研削法	177	【P】	
2 次元切削	16, 35, 37,	EP 剤	83	PbS セル	66
3 次元切削	55	extreme pressure additives		Preston の式	27
3 面摺り合わせ法	187		83	PVD	70
60 min 寿命切削速度	79	【F】		【T】	
【A】		Fourier の法則	28	Ti 6Al 4V	111
Archard の式	27	【G】		Tresca	21
A 系砥粒	117, 191	GC 砥粒	118	— の条件	18
【B】		【H】		T 溝フライス	103
Beilby 層	90	HIP	68	【V】	
【C】		【I】		van der Waals 力	25, 83
cBN	70, 119, 191	InAs 素子	67	【W】	
CFRP	112	InSb 素子	67	WA 砥粒	117
CMP	3, 182, 215	【M】		【X】	
Coulomb force	13	MCP	3, 182, 207	X 線応力測定法	92
Coulomb の法則	23, 51	Merchant	45		
CVD	70	— の第 1 方程式	46		
CVD ダイヤモンド工具	71	— の第 2 方程式	46		
C 系砥粒	117, 191	Mises の降伏条件	18		
C 砥粒	118	Mises の相当応力	18		
【D】		MQL	113, 130		
DLC	69				

— 著者略歴 —

奥山 繁樹 (おくやま しげき)

1970年 防衛大学校(機械工学専門)卒業
1975年 防衛大学校理工学研究科(造兵機械工学専門)卒業
1979年 大阪大学研究生(1982年3月まで)
1981年 工学博士(大阪大学)
1984年 陸上自衛隊幹部学校技術高級課程修了
1986年 防衛大学校助教授
1994年 防衛大学校教授
2013年 防衛大学校名誉教授

宇根 篤暢 (うね あつのぶ)

1969年 大阪大学工学部精密工学科卒業
1971年 大阪大学大学院工学研究科修士課程修了(精密工学専攻)
1971年 日本電信電話公社入社
1985年 工学博士(大阪大学)
1985年 NTT LSI研究所 主幹研究員・グループリーダー
1993年 NTT アドバンステクノロジー出向
1996年 防衛大学校教授
2012年 防衛大学校名誉教授
2012年 株式会社岡本工作機械製作所 監査役
現在に至る

由井 明紀 (ゆい あきのり)

1978年 山梨大学工学部機械工学科卒業
1978年 株式会社岡本工作機械製作所入社
1989年 千葉大学大学院自然科学研究科博士課程修了
工学博士
2000年 防衛大学校助教授
2011年 防衛大学校教授
現在に至る

鈴木 浩文 (すずき ひろふみ)

1983年 大阪市立大学工学部機械工学科卒業
1985年 大阪市立大学大学院工学研究科修士課程修了(機械工学専攻)
1985年 三菱電機株式会社生産技術研究所入社
1996年 東北大学助手
1997年 博士(工学)(東北大学)
1998年 防衛大学校講師
2000年 豊橋技術科学大学助教授
2003年 神戸大学助教授
2008年 中部大学教授
現在に至る

機械加工学の基礎

Fundamentals of Machining Technology

© Okuyama, Une, Yui, Suzuki 2013

2013年8月8日 初版第1刷発行



検印省略

著者 奥山 繁樹
宇根 篤暢
由井 明紀
鈴木 浩文
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 萩原印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04632-8

(柏原) (製本: 愛千製本所)

Printed in Japan



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

落丁・乱丁本はお取替えいたします