

ま え が き

最近のわが国における生産技術の進歩は目をみはるものがあるが、その発展のなかで、情報処理技術の導入による自動化とともに機械製作技術が大きい役割を演じてきたことを見逃してはならない。いうまでもなく、機械製作技術は、要求される機能をもった機械部品を製作するために不可欠の技術であり、すべての産業の基礎をなすものである。機械加工技術は、機械製作技術のうちで、最も古くから広く利用されている技術であり、最近では、高性能工具がつぎつぎに開発されるとともに、工作機械の高速化、高精度化及び自動化がはかられ、さらに情報処理技術の支援による機械加工システム全体の自動化や最適化が進められるなど、ますます高度化されつつある。このような機械加工技術の高度化は、高品質の製品を能率よく、低コストで生産するという機械加工の永遠の目標を達成するためのものであり、それぞれの機械加工法の原理原則と加工現象のしくみを知りつくしてはじめて可能となるものである。機械加工技術がいかに高度化されても、その本質は変わらず、周辺技術が進歩するのみであるからである。機械加工技術は、本来永い経験のうえにうちたてられたものであるが、多くの技術者、研究者によって加工現象の科学的説明が達成され、機械加工技術の学問的裏づけがなされ、機械加工学として加工技術の体系化がはかられている。

本書は、機械加工として位置づけされている切削加工法、研削加工法及び砥粒加工法の加工原理、加工機構及び基礎事項についてできるだけ平易に述べたものである。したがって、大学、高専などの教科書、また機械工場技術者の参考書としても使用していただけるものと思う。とはいえ浅学非才の身であり、本書には不備な点や誤りが多くあろうかと思われるが、大方の御叱正をまっぴり良い本にしていきたいと考えている。

本書の執筆にさいしては、多くの名著、すぐれた論文を参考にさせて頂き、また図表なども引用させて頂いた。それらの著者の方々に心からの敬意と感謝を捧げるとともに、多くの同学の先輩や朋友のご教示に厚くお礼申しあげるしだいである。また、本書の出版にさいしていろいろご尽力いただいた株式会社コロナ社の各位に感謝いたします。

昭和 58 年 8 月

著 者 し る す

目 次

1 機械加工総論

1.1 機械加工の位置付け	1
1.2 機械加工の分類	3
1.3 機械加工における加工原則	4
1.4 機械加工のシステムと評価関数	6
1.5 機械加工の効果	7
演習問題	8

2 切削加工

2.1 序 説	9
2.2 切削機構	10
2.2.1 二次元切削と三次元切削	10
2.2.2 切りくずの形態	12
2.2.3 構成刃先	15
2.2.4 連続型切りくず生成機構	18
2.3 切削抵抗	23
2.3.1 切削の三分力	23
2.3.2 切削抵抗の測定	24
2.3.3 切削条件と切削抵抗の関係	26
2.3.4 切削抵抗と寸法効果	29
2.3.5 工具すくい面上の応力分布	32
2.4 切削温度	32
2.4.1 切削エネルギー	32

2.4.2	切削温度の測定	33
2.4.3	切削温度の理論的解析	38
2.4.4	工具表面の温度分布	42
2.4.5	切削条件と切削温度	43
2.5	切 削 仕 上 面	44
2.5.1	仕上面あらさ	45
2.5.2	加工変質層	48
2.6	工 具 材 料	51
2.6.1	概 論	51
2.6.2	工具材料各論	53
2.6.3	工 具 損 傷	81
2.7	被 削 性	98
2.7.1	概 論	98
2.7.2	工 具 寿 命	99
2.7.3	被削性試験法	102
2.7.4	材料中の介在物と被削性	106
2.8	特 殊 切 削	111
2.8.1	高 温 切 削	111
2.8.2	低 温 切 削	114
2.8.3	振 動 切 削	114
2.8.4	超 高 速 切 削	115
	演 習 問 題	116

3 研 削 加 工

3.1	序 説	117
3.2	研削加工の分類	118
3.2.1	円筒研削	119
3.2.2	内面研削	120
3.2.3	平面研削	120
3.2.4	心無研削	121
3.2.5	工具研削	122
3.2.6	特殊研削	122
3.3	研削砥石	123

3.3.1	研削砥石の構成要素	123
3.3.2	研削砥石の形状および寸法	132
3.3.3	研削砥石の試験	132
3.3.4	研削砥石の表示	135
3.3.5	研削砥石の作用面性状	136
3.4	研削加工における切りくず形状	141
3.4.1	1個の砥粒切れ刃の軌跡	142
3.4.2	切りくず形状とその分類	144
3.4.3	切りくず厚さ	145
3.4.4	切りくず長さ	147
3.4.5	切込み角	147
3.5	研削抵抗	149
3.5.1	研削抵抗とその重要性	149
3.5.2	研削抵抗に及ぼす加工条件の影響	150
3.5.3	研削抵抗の理論	154
3.6	研削温度	156
3.6.1	研削熱と研削温度	156
3.6.2	移動熱源の理論	158
3.6.3	砥粒研削点温度	159
3.6.4	砥石研削点温度	161
3.6.5	工作物平均温度	164
3.6.6	工作物表面の温度分布	164
3.7	研削加工面の特性	165
3.7.1	研削加工面の評価	165
3.7.2	加工面あらさ	165
3.7.3	研削焼け	168
3.7.4	研削加工表面部の硬さ分布	169
3.7.5	研削残留応力	171
3.8	研削砥石の寿命	174
3.8.1	研削砥石の損耗と寿命	174
3.8.2	砥石寿命の判定基準	175
3.8.3	寿命理論	176
3.8.4	研削条件と砥石寿命	179
3.9	研削液	181
3.9.1	研削液の作用	181
3.9.2	研削液の種類	182

3.9.3	不水性切削油剤	183
3.9.4	水性切削油剤	185
	演習問題	186

4 砥粒加工

4.1	序 説	187
4.1.1	砥粒加工の特徴	187
4.1.2	砥粒加工の分類	189
4.2	固定砥粒による加工	190
4.2.1	ホーニング	190
4.2.2	超仕上	195
4.3	半固定砥粒による加工	203
4.3.1	バフ仕上	203
4.3.2	ベルト研削	206
4.4	遊離砥粒による加工	209
4.4.1	ラップ仕上	209
4.4.2	超音波加工	215
4.4.3	バレル仕上	217
4.4.4	噴射加工	221
	演習問題	224

演習問題解答

参 考 文 献

索 引

I

機械加工総論

1.1 機械加工の位置付け

機械製作 (manufacturing technology) とは、所望の材料を所望の形状および寸法に工業的方法で加工することである。ここで工業的方法というのは、芸術的方法と対比されるが、能率 (efficiency)、コスト (cost) および品質 (quality) が優先され、それらによって機械製作が評価されることを意味する。

機械製作法は、材料に形状および寸法を与えるに際して、材料の不要部分を除去するか否かによって、除去加工 (removal process) と非除去加工 (non-removal process) とに大別される。非除去加工は、必要とする寸法と形状を得るにあたって、材料を熔融する熔融加工と塑性変形を利用する成形加工とに分類され、前者には鋳造 (casting)、溶接 (welding) などが、後者には押し出し (extrusion)、引抜き (drawing)、圧延 (rolling)、プレス加工 (press working)、鍛造 (forging) などがある。除去加工は、必要とする寸法および形状を得るために材料の不必要部分を除去するにあたって、機械的エネルギーを利用する機械加工 (machining) と、熱的、電気化学的あるいは化学的エネルギーを利用する特殊加工 (unconventional process) に分類される。特殊

加工には、熱エネルギーを利用するものとして放電加工 (electrical discharge machining), 電子ビーム加工 (electron beam machining), イオンビーム加工 (ion beam machining), レーザ加工 (laser machining), プラズマ加工 (plasma machining) が, 電気化学エネルギーを利用するものとして電解加工 (electrochemical machining), 電解研摩 (electrolytic polishing) が, 化学エネルギーを利用するものとして化学加工 (chemical machining), 化学研摩 (chemical polishing) がある. これらの分類を示せば図 1.1 のようである.

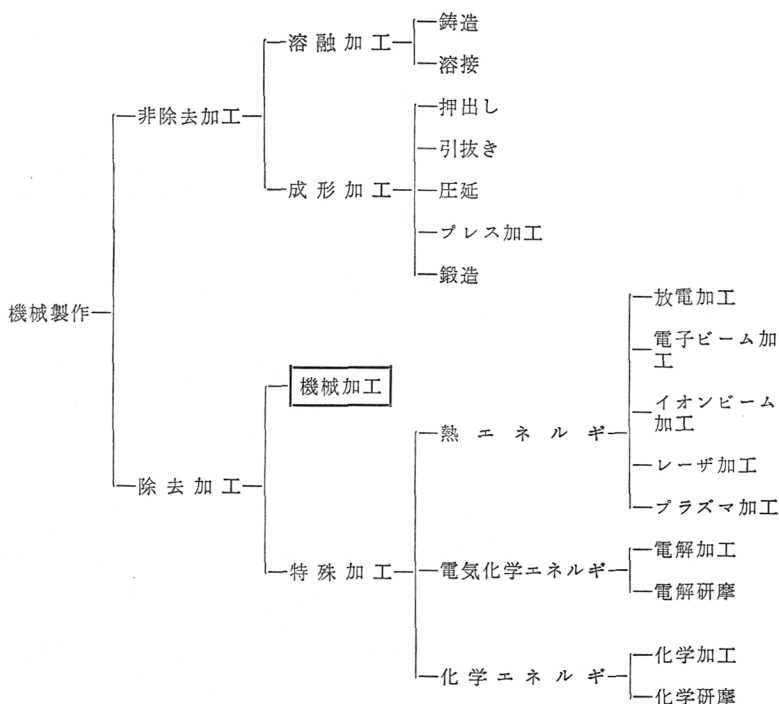


図 1.1 機械加工の位置付け

除去加工は, 非除去加工に比べて, 一般に能率の点ではやや劣るが寸法および形状精度に優れ, なかでも機械加工は, 機械製作の最終工程に不可欠な高能率・高精度加工として広く用いられている.

上に述べたことより, 本書で取り扱う機械加工とは, 機械的エネルギーによ

て材料の不必要な部分を除去し、所望の寸法、形状および品質を有する製品を、能率良く安価に加工する機械製作法の一つであるということができる。

1.2 機械加工の分類

機械加工において、必要とする寸法および形状を得るにあたっては、工作機械 (machine tool) と工具 (tool) とを用い、材料、すなわち被削材 (work material) の不必要部分を、工具を介して機械的エネルギーを与えることによって破壊し、切りくず (chip) として除去する。工具によって被削材の不必要部分を切りくずとして除去するためには、工具と被削材 (工作物) との間に、一定の幾何学的干渉を起こさせると同時に相対運動を与えることが不可欠である。工具と被削材との間に干渉を起こさせる方法には、強制切込みと圧力切込みの二つの方法があり、従って機械加工は、強制切込加工 (controlled depth machining) と圧力切込加工 (controlled force machining) とに大別される。強制切込加工は、バイト、ドリルなどの単刃工具やフライス、ブローチなどの多刃工具を用いて 1 mm オーダの比較的大きな切りくずをつくる切削加工 (cutting) と、砥石を工具として用い 1 μm オーダの小さな切りくずをつくる研削加工 (grinding) とに分類される。圧力切込加工には、現在では砥粒

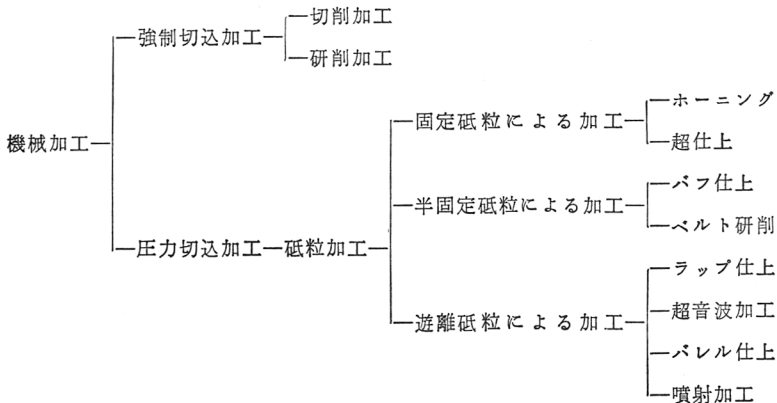


図 1.2 機械加工の分類

を工具として用いる砥粒加工のみしかなく、工具としての砥粒を固定状態で用いる固定砥粒による加工（ホーニング、超仕上）、半固定状態で用いる半固定砥粒による加工（バブ仕上、ペルト研削）、粒のままの遊離状態で用いる遊離砥粒による加工（ラップ仕上、超音波加工、パレル仕上、噴射加工）に分類される（図 1.2）。

機械加工は、工具を工作物に干渉させることによって切りくずを生成し、必要とする寸法および形状を得るものであり、工具と工作物との干渉のさせ方と生成される切りくずの大きさまたは切れ刃の状態とによって能率と品質は影響されるから、上に述べたように分類すれば、機械加工は本質的観点より比較検討され得る。従って以下に述べられる機械加工の各論は、この分類に従って解説される。

1.3 機械加工における加工原則

機械加工を行うためには、工具と工作物との間に干渉を起こさせることが不可欠であり、干渉を与える方法としては強制切込みと圧力切込みの二つがあるから、すでに述べたように、機械加工は本質的観点より、強制切込加工と圧力切込加工とに大別される。強制切込加工は、図 1.3 に示すように、工作機械の切込み機構によって工具を一定深さ d だけ強制的に切り込み、工作機械の運

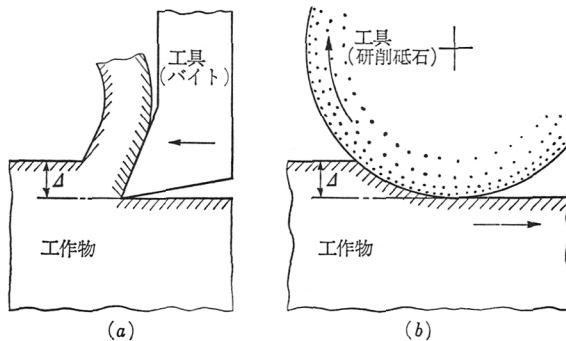


図 1.3 強制切込加工

動機構によって工具と工作物との間に相対運動を与えて加工を行うものである。従って強制切込加工においては、加工量は切込み量によって定まり、加工能率は一般に高いが、工具または工作物の運動は工作機械によって完全に拘束されるから、強制切込加工における加工精度は工作機械の静的または動的精度によって支配され、工作物の精度は工作機械の精度を上回ることにはあり得ない。このように、強制切込加工において工作機械の精度が工作物に移されることを**母性原則 (copying principle)**という。工作機械によって工作機械をつくる場合、母性原則に従う強制切込加工のみによれば、新しく製作された工作機械の精度は、使用した工作機械の精度よりも悪くなり、精度の高い工作機械の出現はあり得ない。しかし実際には、次々に高精度の工作機械が出現しており、これは次に述べる圧力切込加工による

ところが大きい。圧力切込加工においては、**図 1.4 (a)** に示すように、加工現象を生じさせるために必要な工具と工作物との間の干渉量は、工具をある大きさの加圧力 P で工作物に押し付けることによって与える。この場合、工具は現在加工を行っている面に浮んだような状態、すなわち浮動状態で加工面自体によって案内され、加工精度は相対運動を与える工作機械の運動精度ではなく、加工されている面自体の精度によって決定される。これを**浮動原理 (floating principle)**という。従って、

加工面の精度は加工の進行と共に良くなる

から、工具の案内精度は良くなり、さらに加工面の精度が上がるといったように、圧力切込加工における精度は、工具の切削性能を適当に選んで加工現象を制御すれば、どこまでも良くなり、使用した工作機械の精度を超えることができる。圧力切込加工においては、**図 1.4 (b)** に示すように、工具に加える加

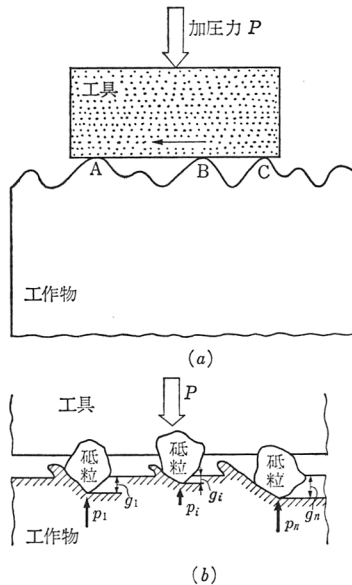


図 1.4 圧力切込加工

圧力 P によって、個々の切れ刃には力 pc が作用し、個々の切れ刃はその力に相当する量 g_c だけ工作物に切れ込むが、この値を予測することは困難であり、従って圧力切込加工における加工量は一般に小さく、また予測され得ない。

このような観点から、強制切込加工は能率を重視する場合に用いられ、圧力切込加工は品質を重視する場合に用いられるのが原則であるが、工作機械の静的、動的精度を上げたり切りくずを小さくすることによって強制切込加工も十分な品質が得られる加工法として確立されているし、また圧力切込加工においても運動速度を高くすることによって十分に高能率な加工が行われている。

1.4 機械加工のシステムと評価関数

機械加工は、工作機械に工具と被削材とを取り付け、両者の間に干渉と相対運動を与えて、空気や加工液などが存在するある雰囲気の下で、被削材の不必要部分を切りくずとして除去し、必要とする形状と寸法とを得る加工方法である。従って、機械加工現象は切りくずの生成現象であり、見方を変えれば、新しい表面を生成することによって寸法および形状をつくり出していく現象である。この機械加工現象に影響を及ぼす入力条件としては、**工具条件**、**被削材条件**、**相対運動条件**、**干渉条件**、**工作機械条件**、**雰囲気条件**の六つがある。これら六つの入力条件下において加工現象が起こり、必要とする寸法および形状が生成されていくが、これに伴って**工具摩耗**、**加工抵抗**、**加工熱**、**びびり振動**、**加工音**などの直接出力が発生し、それらによって機械加工の最終出力である**加工能率**、**加工精度**、**加工表面特性**および**作業環境**が決定されることになる。これらの関係、すなわち**機械加工システム**(machining system)を示すと図 1.5 のようである。工具条件としては、まず工具材質が重要であり、硬度、耐摩耗性、強度、じん性などが問題となり、さらに切れ刃の形状および多刃加工の場合には切れ刃の数も重要である。被削材条件としては、被削材の材質、すなわち機械的、物理的性質が重要であり、被削材の大きさ、形状、被削材の有する加工しるとそのばらつき、初期形状誤差なども問題となる。相対運動条件としては、

索引

【A】

アンギュラ研削 119
アトマイジング 79
アトリション 83
圧電素子 25
圧壊力 30
圧力切込加工 3

【B】

ばらバフ 204
バレル 217
belag 108
belt 装置 78
ビールビー層 49
ビトリファイド結合剤 127
母性原則 5
防錆剤 185

【C】

card model 11
CBN 75
CBN 工具 76
コーナ半径 29
CVD 法 75

【D】

ダイヤモンド 125
ダイヤモンド工具 76
脱酸調整快削鋼 108

電気化学的反応 82
ドレッサ 137
ドリルせん孔性試験 105
同時作用切れ刃数 139

【E】

液体ホーニング 221
液体バフ研磨材 204
ESR 法 59
 η 相 86

【F】

複合快削鋼 108
ふく射温度計 34
複炭化物 86
フランク摩耗 83
フリーベルト方式 207

【G】

グレナイト 109
ゴム結合剤 128
Gottwein の方法 36
合金工具鋼 56
5 要因 123
グリットブラスト 222

【H】

ハイス 56
白輝鈍化 85
半導体ゲージ 25
反転仕上法 49

平均切りくず厚さ 146
偏析 59
HIP 69
光高温計 34
比研削エネルギー 156
非金属ラップ 212
被削性 98
被削性指数 103
比切削抵抗 28, 155
非鉄鑄造合金 60
ひずみ速度 19
非除去加工 1
ホイートストンブリッジ 26

ホーン 191
ホーニング速度 194
掘起し摩耗 82
ホットプレス法 69
浮動原理 5
吹付け加工 221
複炭化物 62
粉末ハイス (P/Mハイス) 79
不水溶性切削油剤 182
評価関数 7
表面の品位 45
表面処理 60

【I】

移動熱源の理論 158
硫黄快削鋼 108
1本バイト法 36

【 K 】

かえり (盛り上り) 46
 化学反応 82
 快削鋼 106
 快削性添加物 106
 回転バレル仕上 217
 加工変質層 48, 165
 加工硬化 15
 加工硬化現象 169
 加工面あらさ 165
 拡散 83
 拡散摩耗 86
 カロリメータ 38
 カルシウム脱酸鋼 108
 過切削 16
 形直し 136
 硬さ 52, 165
 過渡研削状態 151
 傾斜切削 12
 形状比 42
 形状係数 42
 研摩布 206
 研摩石 219
 研摩紙 206
 研削比 175
 研削熱 156
 研削温度 157
 研削抵抗 149
 研削抵抗比 149
 研削砥石の標準縁形 132
 研削割れ 165
 研削焼け 165, 168
 結合度 128
 機械加工システム 6
 機械的摩耗 86
 金属結合剤 127
 金属ラップ 212
 切れ刃丸味 30

切れ刃密度 133
 亀裂型切りくず 14
 切込み 18
 切込み角 147
 切りくず厚さ 18
 切りくず形状 141
 切りくず長さ 147
 切りくずの色 33
 切りくずの面積 27
 切りくず処理性 106
 切残し量 151
 固形バフ研摩材 204
 コーナ半径 88
 コーナ角 88
 コンパウンド 219
 コンタクトホイール方式
 207
 コールドプレス法 69
 コーテッド工具 74
 固溶度 62
 工具動力計 24
 工具表面の温度分布 42
 工具角度 27
 工具の形状 24
 工具寿命試験 102
 高温硬度 57
 高温切削 111
 高温焼入法 56
 交差角 194
 工作物平均温度 157
 構成刃先 15
 抗折力 68, 70
 格子欠陥 30
 硬質炭化物 62
 高速度鋼 56
 クレータ摩耗 83
 クロスハッチパターン
 194
 極圧添加剤 185
 鏡面限界線 201

強制切込加工 3
 強制切込み研削 118

【 M 】

前切刃角 24
 前逃げ角 24
 摩減 82
 摩擦角 19
 摩擦係数 19
 メディア 217
 目こぼれ 141
 目直し 136
 Merchant の説 21
 目つぶれ 141
 目詰まり 141
 溝切り試験法 105
 むしり型切りくず 14

【 N 】

流れ型切りくず 12
 内部摩擦説 21
 鉛快削鋼 108
 軟化現象 169
 熱伝導率 71
 熱電対 34
 熱拡散率 72
 熱間静水圧焼結法 69
 熱起電力 36
 熱亀裂 83
 熱的摩耗 86
 2 段工程超仕上法 197
 逃げ面摩耗面積率 140
 2 本バイト法 37
 2 回 1 本バイト法 38
 二次元切削 10
 二次硬化 57
 鋸歯状切りくず 14
 ノーズ半径 24
 ぬれ角 62

乳化剤 185

入力条件 6

【 O 】

オキシクロライド結合剤

127

大越式結合度試験法 128

応力分布 32

【 P 】

プラテン方式 207

プランジ研削 119

プリホーニング 88

PVD 法 75

【 R 】

ラップ 209

ラップ圧力 214

ラップ液 210

ラップ速度 214

ラップ剤 209

連続切れ刃間隔 139

レジノイド結合剤 127

臨界圧力 202

立方晶窒化ホウ素 125

理論あらさ 45

粒度 126

【 S 】

最大切りくず厚さ 146

再結晶温度 96

最高温度 42

最終出力 6

サーメット工具 71

サーモカラー 34

サンドブラスト 221

酸化アルミニウム系 124

酸化摩耗 86

酸化ジルコニウム系 125

3要素 123

三次元切削 12

赤外線写真 34

せん断型切りくず 14

せん断角 18

せん断応力 20

セラミック 66

切削エネルギー 33

切削限界線 201

切削比 18

切削方向角 199

切削角 28

切削の三分力 23

切削温度の校正 37

切削力 23

切削抵抗 23

切削定数 22

仕上面あらさ 45

振動バレル仕上 217

振動切削 114

振動的相対運動 195

親和性 17

シリケート結合剤 127

下向き研削 118

塑性変形 82

組織変化 82

総形研削 119

ステライト 60

垂直応力 20

水溶性切削油剤 182

すくい角 18

寸法効果 29, 155

スピネル 90

SWC 切削法 17

初期破損 81

焼結ダイヤモンド工具 77

ショットブラスト 221

ショットピーニング 222

終期破損 81

【 T 】

多刃切削 117

炭化ケイ素系 125

端面切削法 103

炭素工具鋼 53

Taylor の寿命方程式 101

定圧研削 118

抵抗線ひずみゲージ 25

低温切削 114

定常研削状態 151

チップング 82

チップブレーカ 89

とじバフ 204

砥石圧力 193

砥石研削点温度 157

砥石の標準形状 132

砥石の組織 129

砥石寿命 174

——の判定基準 175

突発的破損 81

トラバース研削 119

取付角 28

砥粒研削点温度 157

砥粒切れ刃の支持剛性

139

砥粒率 129

砥粒率試験 133

通電加熱法 113

チャンファ 89

直接出力 6

超硬合金 62

超高速切削 115

超仕上ユニット 203

【 U 】

上向き研削 118

上すべり 156

【V】

 V_B の基準値 99 $V-T$ 線図 100

【W】

white layer 85

【Y】

焼入ひずみ 59

焼入れ硬化現象 169

焼割れ 59

横切刃角 24

横逃げ角 24

容積係数 106

溶着 (凝着) 82

油性剤 183

【Z】

材料の理想強度 31

残留応力 50, 165

残留応力の分布形態 171

じん性 52

人造砥粒 124

自生発刃作用 140, 174

除去加工 1

— 著者略歴 —

中島 利勝(なかじま としかつ)

1961年 京都大学工学部鉱山学科卒業
1969年 工学博士(京都大学)
1973年 岡山大学助教授
1974年 岡山大学教授
1994年
～98年 岡山大学工学部長
2002年 岡山大学名誉教授
2005年 岡山大学理事, 現在に至る

鳴瀧 則彦(なるたき のりひこ)

1963年 京都大学工学部機械工学科卒業
1969年 工学博士(京都大学)
1970年 広島大学助教授
1980年 広島大学教授(工学部第一類)
2003年 広島大学名誉教授

機械加工学

Machining Technology

© Toshikatsu Nakajima, Norihiko Narutaki 1983

1983年10月30日 初版第1刷発行
2010年1月10日 初版第25刷発行

著者承認
検印省略

著者 中島利勝
鳴瀧則彦
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也

発行所 株式会社 **コ ロ ナ 社**

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

振替 00140-8-14844 電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04059-3

(壮光舎印刷, 愛千製本所)

Printed in Japan



無断複写・転載を禁ずる

落丁・乱丁本はお取替えいたします