

1

機械設計の基礎

fundamentals of mechanical engineering design

1・1

機械と機械設計

machine and mechanical engineering design

機械 (machine) とは、“人間にとって有益な目的を達成するために、種々の部品を組み合わせ、外部からエネルギーを与えることによって各部に所定の動きを行わせ、全体として目的にあった仕事を出力するもの” ということができる。機械という言葉には、産業革命以来の歴史上の発展から工業生産的な重機械のイメージが強く残っているが、実際には、自動車をはじめ、コンピュータなどの情報関連機器やマイクロマシンなども含まれる。

機械を使用目的で分類すると、表 1・1 のようになる。

表 1・1 使用目的による機械の分類

分類	例	目的
動力機械 (原動機)	熱機関 (内燃機関など)、水力機械、風力機械、電動機	動力の出力
生産機械 (工作機械、製造機械)	旋盤、マシニング センタ、トランスファ マシン (自動搬送複合工作機械)、半導体製造装置、食品機械、化学機械、建設機械	機械部品、電子部品、化学薬品の製造
輸送・搬送機械	飛行機、自動車、電車、搬送ロボット	移動
情報関連機器	コンピュータ、OA 機器	情報の変換・加工
家庭用電気機械	エアコン、洗濯機、プラズマあるいは液晶ディスプレイ	作業
計測機器	検査装置、三次元測定機	計測情報の出力・変換

これらの機械をつくるには、それぞれの機械に必要なとされる機能や性能を実現するための方策や手段を検討し、まとめる必要がある。**機械設計** (mechanical engineering design) は、このような機械を工学的な考え方にもとづいて実現するための“企て”であり、機械をつくり出すための創造的作業である。

1・2

製品開発の流れ

flowchart of product development

機械製品の開発は、一般には、図 1・1 に示すような設計過程を経て行われる。それらを要約すると、以下のようになる。

① **必要性の認識と課題の設定** ある製品の開発を始めることは、開発をめざす製品が社会的に強く必要とされている (needs)、あるいは今後、必要になるであろう (seeds) という企画設計者の考え (idea) から行われるのが一般的である。必要性の認識が的確に行われた後には、開発に含まれる課題を吟味し、解決すべき問題の設定を行うことが必要になる。この過程は、開発事項が新規であるほど、また機械システムが大規模であるほど困難をとまなうため、通常、必要性の認識と課題設定の間で、繰り返して検討がなされる。

② **計画設計** 必要性の認識と課題の設定が明確に行われると、それらを具象化するのが計画設計である。最近では、手書きの概略図面を用いた検討から、3D-CAD (3 dimensional computer aided design : 三次元コンピュータ支援設計) を用いた検討に移行しつつある。計画設計では、おもに目的とする機械の性能・機能を設定し、それを実現するための手法や方策、機械全体の大きさなどの決定がなされる。また必要であれば、目的とする機能を実現するための手段について、その実行可能性についての計算が行われる。近年、このような計算では、CAD データをもとに有限要素法解析や機構解析などを、いわゆる CAE (computer aided engineering : コンピュータ援用工学解析) を活用して行い、より実際の製品に近い条件のもとで、種々の設計パラメータの決定が行われるようになってきた。ま

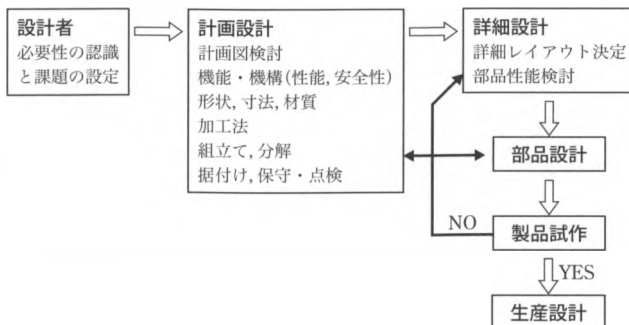


図 1・1 製品開発の流れ

た、ある機能や性能を具体化する手段は、いく通りか存在するのがふつうであるが、手段選択の基準として、通常、それらの性能（信頼性も含めて）に対する**費用対効果**（cost performance）が考慮される。

③ **詳細設計** 詳細設計では、計画設計によってつくられた全体企画をもとに、実際の図面、仕様書をつくり、重要部品の計画図面、構造図面、性能計算書、基本工程、製造仕様書などを作成する。

④ **部品設計** 部品設計では、各部品についての材料選定、形状、寸法、熱処理、加工方法、組立て方法などの検討を行う。

⑤ **試作** これまでの設計にもとづき、製品を試作し、必要とされる機能、性能を十分達成できるかを実測する。試作製品で生じた不具合については、設計を変更し、修正を行う。製品試作および性能試験には、多くの時間とコストがかかるので、設計段階で十分な検討を行い、製品試作の回数を減らす努力が必要である。

⑥ **生産設計** 製品に使用する素材の調達方法、検査方法の検討や個別的な予定原価の試算を行う。そして、最も有利な方法の選択による最終製造図面と、実際の素材、部品の購入仕様書、製造指示書を作成する。

1-3

機械要素設計の意義

meaning of design of machine elements

機械は、一般には、種々の機能を果たす**機構**（mechanism）を組み合わせたものと考えることができる。たとえば自動車は、ボデー、エンジン、パワートレイン、サスペンション、ステアリングなどの機構を組み合わせることにより、物を運ぶという機能を実現している。これらの機構は、さらに、種々の部品に分解することができるが、このような部品を**機械要素**と呼ぶ。機械要素は機械を構成する最小単位であり、それぞれの使用箇所でも共通的な役割を果たしている。表 1-2 に機械要素をその役割によって分類した例を示す。

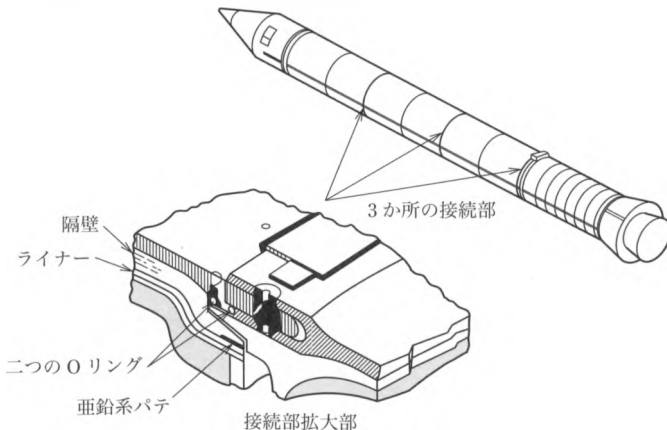
前述のように、機械要素は、それを組み合わせることで機構を形づくり、機構は、その組合せによって機械を形づくる。したがって、機械要素の設計が適正に行われない場合、機構が正常に動作しなくなり、さらには機械全体の動作に悪影響を及ぼすことになる。

機械要素の設計が適正に行われなかったことにより生じた重大な事故として、アメリカのスペースシャトル、チャレンジャー号の爆発事故が報告されている。

表 1-2 機械要素の種類

分類	役割	種類
締結要素および 関連要素	複数の部材を固定し、つなぎ止めるための要素と締結の際に使用される関連要素。	ねじ部品（ボルト、ナット、小ねじ）、座金、溶接継手、リベット、ピン、止め輪
軸 および 軸 関連要素	回転によって、動力を伝達する要素およびそれに関する要素。	軸、軸継手、キー、スプライン、セレーション
軸受・案内要素	軸を支持し、回転運動や直線運動を可能とする要素。	転がり軸受、滑り軸受
動力伝達要素	動力を伝達するために使用される要素。	ベルトとプーリー（Vベルト、歯付きベルト）、チェーンとスプロケット、歯車、ボールねじ、クラッチ、ブレーキ
流体関連要素	流体を導いたり、貯蔵したり、密封したりする場合に使用される要素。	管、管継手、弁、シール（オイルシール、Oリング）、ガスケット、パッキン、圧力容器
検 出 要 素	一般に位置や圧力、変形などを検出し、制御を行うために使用する要素。	変位センサ、圧力センサ、リミットスイッチ、ひずみセンサ
原 動 機（アク チュエータ）	機械に動力を供給するための機構あるいは要素。	電動モータ、空圧、油圧シリンダ、圧電素子、ボイスコイルモータ
そ の 他	—	ばね

この事故は、1986年1月28日のスペースシャトル打上げ後、73秒で液体燃料タンクが破壊し、爆発が起こったというものである。この事故の原因としては、固体ロケットブースタの結合部から固体燃料が漏れ、それに引火したためと報告され

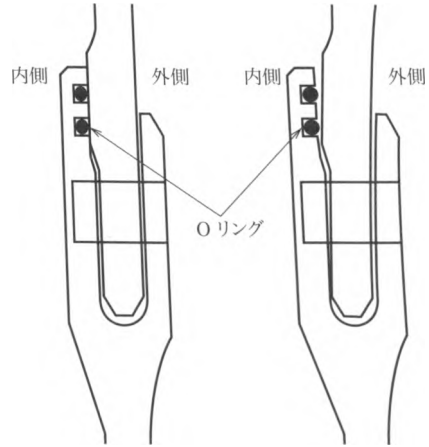
図 1-2 固体ロケットモータの射場結合部¹⁾

ている。

固体ロケットブースタは、図1・2に示すように7個のセグメントに分解されるが、3か所の結合部はあらかじめ結合して打上げ場に運び込まれ、残る3か所の結合部が、打上げ場で連結される。セグメントを連結する際、固体燃料の漏れを防ぐためのおもな要素部品として、図1・3に示すようなゴム製Oリングシールが使用された。固体燃料がブースタ内に注入されると、ブースタ外壁は、図1・3のように圧力により変形する。したがって、Oリングシールはブースタ外径が変

形したとしても、Oリングシールが弾性的に変形し、すきまを塞ぐように設計されている。ところが、打上げ当日、28日の外気温は -2.2°C まで下がったため、ゴム製Oリングシールの弾性的反発力が低下し、十分なシール性能が発揮されず、燃料が漏れ出したと考えられている。

このように、設計者が機械要素の特性を正しく理解していなかったことにより、機械全体の正常な動作を阻害する例は数多くあり、設計者にとって、機械要素の適正な設計法、使用法を十分身につけることが重要である。



ロケット内圧上昇前
の結合状態

固体燃料燃焼による内圧
上昇後の結合部変形状態

図1・3 内圧変化にともなう結合部の変形状態¹⁾

1・4

機械安全(機械類の安全性)

safety of machinery

機械は、人間に役立つように生み出されるものであるので、直接、人間とのかかわりをもつことが必然的に多くなる。したがって、その安全性については十分な注意を払う必要がある。わが国でも、これまでに種々の法規や規格をつくり、機械類の安全性をいかに高めるかという取組みがなされてきた。しかし最近、ヨーロッパを中心に長い間議論されてきた内容をもとに、国際標準化機構(ISO:次節参照)と国際電気標準会議(IEC:International Electrotechnical Commission)によって、表1・3に示すようなISO/IECガイド51(安全規格作成のためのガイドライン)

表 1-3 国際安全規格の階層化構成

ISO/IEC ガイド 51 (安全規格作成のためのガイドライン)		
国際標準化機構 (ISO) (機械系)	規格分類 (機械類の安全性)	国際電気標準会議 (IEC) (電気系)
機械類の安全性：基本概念，設計の一般原則規格 (ISO 12100) * リスクアセスメント規格 (ISO 14121) *	← 基本安全規格 (A 規格) ：すべての規格類で共通に適用できる基本概念，設計原則を扱う規格。	
インタロック規格 (ISO 14119) ガードシステム規格 (ISO 14120) システム安全規格 (ISO 13849-1) * 安全関連部品規格 (ISO 13849-2) 安全距離規格 (ISO 13852) * 非常停止規格 (ISO 13850) * 再起動防止規格 (ISO 14118) 両手操作装置規格 (ISO 13851) マットセンサ規格 (ISO 13856) 高所／階段類の規格 (ISO 14122) * など	← グループ安全規格 (B 規格) ：広範囲の機械類で利用できるように安全，または安全装置を扱う規格。	→ 電気設備安全規格 (IEC 60204) * センサー一般安全規格 (IEC 61496) * センサ応用規格 (IEC 62046) * 表示・マーキング (IEC 61310) * 機能安全規格 (IEC 61508) * 機械類機能安全規格 (IEC 62061) スイッチ類規格 (IEC 60947) * EMC 規格 (IEC 61000) * 防爆安全規格 (IEC 60079) * など
<p>個別の製品規格 (C 規格)：特定の機械に対する詳細な安全要件を規定する規格。 (個別の製品は基本安全規格とグループ安全規格を利用して作成すること。ただし，不足する場合には規格が要求を満たさない場合は新しく規定してよい。) 製品例：工作機械，産業用ロボット，鍛圧機械，無人搬送車，化学プラント，輸送機械など。</p>		

(注) * 上表において，機械系は JIS B 9700 シリーズとして，また電気系はそれぞれに JIS 化されている。

がまとめられた。この指針では，安全に関する規格を以下のような3通りに分類して作成するように規定している。

- ① 基本安全規格 (A 規格) … すべての規格に共通して適用できる基本概念。
- ② グループ安全規格 (B 規格) … 多くの機械類に共通して利用できる安全関連規格。
- ③ 特定の機械に対する詳細な安全要件を規定した製品およびサービスなどに対する規格 (C 規格)。

基本安全規格である ISO 12100 “機械類の安全性 — 基本概念，設計の一般原則 —” で定義している**機械の安全 (safety)** とは，“受入れ不可能なリスクがないこと (freedom from unacceptable risk)” とされている。つまり，機械類において絶対的な安全は存在せず，いくらかのリスクは常に残っている。そして安全は，リスクを許容可能な (tolerable) レベルに低減することによって達成される。ここでいうリスク (risk：危害) とは，“人の受ける物理的障害あるいは健康障害，財産，

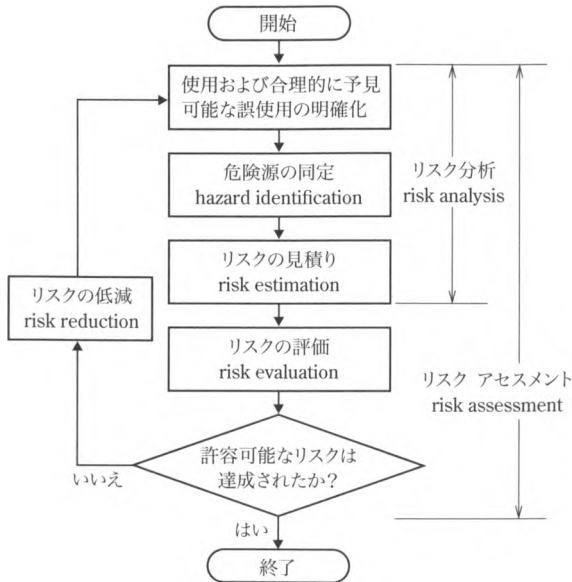


図 1・4 リスク アセスメントとリスク低減の繰返しプロセスの手 (ISO/IEC ガイド 51)

環境の受ける害 (harm) の発生確率と危害のひどさ (severity) の組合せ”をいう。

許容されるリスクとは、与えられた条件下で、現在の価値観にもとづいて受入れ可能と判断できるリスクをいう。リスクの程度を判断、審査する作業をリスク アセスメントといい、安全性はリスク アセスメントの結果として定められることになる。

図 1・4 にリスク アセスメントとリスク低減の繰返しプロセスの手順を示す。図に示すようにリスクの分析では、“合理的に予見可能な誤使用”を行うことになっており、PL（製造物責任：production liability）対策が含まれている。

表 1・4 基本的安全原則

- | | |
|---|------------------------------|
| ① | 適切な材質の使用
(例：温度、摩擦との関連) |
| ② | 正しい寸法設定、構成
(例：応力、疲労、表面粗さ) |
| ③ | 構成要素、システムの適切な選択、組合せ |
| ④ | 適切な留め金具
(例：適切なねじ締めを選択) |
| ⑤ | 過荷重の制限 (例：ブレークピンなど) |
| ⑥ | 速度の制限、速度の低減 |
| ⑦ | 力の制限、力の低減 |
| ⑧ | 動作温度の制限範囲 |
| ⑨ | 切換え時間の制限範囲 |
| ⑩ | ヒステリシスの適切な制限 (例：すきま、摩擦などによる) |

表 1・5 十分に吟味された安全原則

“用途に関係なし”の原則	“用途によって”の原則
① 適切な材質	① ONの力に対する過大なOFFの力
② 過大寸法設定, 安全係数	② 能動的機械動作
③ 十分に吟味された構成要素, システム	③ 例: ばねやねじ増による傷害の影響緩和
④ 十分に吟味された留め金具	④ “安全な”ばね(安全係数, 設計構成)
⑤ 蓄積されたエネルギーの放散	⑤ 十分に吟味された過荷重制限
⑥ 双安定運転	⑥ 十分に吟味された速度制限, 減速
	⑦ 十分に吟味された力の制限, 力の低減
	⑧ 十分に吟味された動作温度の制限範囲

図 1・4 に示される危険源のリスクを低減するための安全設計として、表 1・4、表 1・5 に示すように、基本的安全原則と十分に吟味された安全原則の 2 原則が ISO 12100 に示されている。

1・5

標準化と設計

standardization and engineering design

1・5・1

日本産業規格

Japanese Industrial Standard

日本産業規格 (JIS) は、機械要素、機械材料、各種工業製品の寸法や性能、試験方法などについての標準を定めている。ねじや転がり軸受のような機械要素は、この標準に従って形状や寸法、材料などを規格化しているので、一般にはどのような機械にも共通に用いることができる。これにより、機械全体の設計・製作は容易となり、互換性が増し、生産性ととも信頼性、経済性も向上する。

JIS は、近年の工業製品の輸出入の活発化にともない、できる限り国際規格である ISO (国際標準化機構: International Organization for Standardization) に整合するような形で規定し、グローバル化に対応できるようになっている。

1・5・2

標準数

preferred numbers

設計図面や規格などに現れる数値は、それぞれ技術的な根拠にもとづいて決めら

れている。しかし、生産を単純化し合理化するためには、部品加工や検査に使われる器具の種類を減らすことが必要であり、採用する数値を技術的理由の許しうる範囲で標準化することが望ましい。したがって、わが国ではISO R 3を基として、JIS Z 8601により1954年に標準数が制定され、工業上の諸数値を標準化するために広く用いられている(表1・6)。現在、新しく制定される規格は、国内的にも国際的にもそのほとんどが標準数を基準として制定されている。

標準数の各数列の数値は、表1・6に示すように、公比がそれぞれ $\sqrt[5]{10}$ 、 $\sqrt[10]{10}$ 、 $\sqrt[20]{10}$ 、 $\sqrt[40]{10}$ および $\sqrt[80]{10}$ である等比数列の各項の値を実用上便利な値に近似整理したものである。これらの各数列をそれぞれR 5、R 10、R 20、R 40およびR 80の記号で表し、このうちR 5、…、R 40を基本数列、R 80を特別数列とし、できる限り、R 40以内の数列を用いるようにする。

表1・6 標準数 (JIS Z 8601)

基本数列の標準数				基本数列の標準数						
R 5	R 10	R 20	R 40	R 5	R 10	R 20	R 40			
1.00 ($10^{\frac{0}{5}}$)	1.00 ($10^{\frac{0}{10}}$)	1.00	1.00	2.50 ($10^{\frac{2}{5}}$)	3.15 ($10^{\frac{5}{10}}$)	3.15	3.15			
			1.06				3.35			
			1.12				3.55			
			1.18			3.75				
		1.25 ($10^{\frac{1}{10}}$)	1.25			1.25	4.00 ($10^{\frac{3}{5}}$)	4.00 ($10^{\frac{6}{10}}$)	4.00	4.00
						1.32				4.25
	1.40			4.50						
		1.50	4.75							
	1.60 ($10^{\frac{1}{5}}$)	1.60 ($10^{\frac{2}{10}}$)	1.60	1.60	5.00 ($10^{\frac{7}{10}}$)	5.00			5.00	5.00
				1.70						5.30
				1.80			5.60			
				1.90			6.00			
2.00 ($10^{\frac{3}{10}}$)			2.00	2.00			6.30 ($10^{\frac{4}{5}}$)	6.30 ($10^{\frac{8}{10}}$)	6.30	6.30
				2.12						6.70
		2.24		7.10						
		2.36	7.50							
2.50 ($10^{\frac{2}{5}}$)		2.50 ($10^{\frac{4}{10}}$)	2.50	2.50	8.00 ($10^{\frac{9}{10}}$)	8.00			8.00	8.00
				2.65						8.50
				2.80			9.00			
				3.00			9.50			

標準数の特徴としては、① 簡単で覚えやすい、② 数値の段階が等比的になっている、③ 数値の優先順位が決まっている、④ 標準数どうしの積、商がまた標準数である、などがあげられる。

標準数利用の効果を高めるためには、どの標準数数列をどこに適用するかの指針を立てる必要がある。一般に用いられている数列適用のおおまかな基準を以下に示す。

- ① まとまった製品の主要な仕様：R 5～R 10
- ② 専用工具を必要とする部分の大きさ：R 10
- ③ その他の一般機械加工部品の大きさ：R 20
- ④ どうしても増加率の小さい数列にしたいとき：R 40

なお、標準数を適用することが必ずしも経済的でないこともある。たとえば、転がり軸受、ねじ径などは現在、標準数を用いていない。このような場合は、さしつかえない限り、標準数の基本数列の粗いものの中で近似している寸法のことを優先して使用することが行われている。

1・5・3

機械製図の意義と規格

meaning and standard of technical drawings for mechanical engineering

設計者は、製作する機械各部の形状や構造を図形として描き、材料、寸法、公差、表面粗さ、加工指定などを、文字や記号を用いて図形に付記し、図面を完成させる。これにより設計者は、その意図を第三者（製造者、使用者など）に明確に伝達することができる。このような機械図面を作成することを**機械製図**という。機械図面は、単に機械部品の外形を表示するだけでなく、設計者の設計思想が、正確にしかも簡潔にあまところなく盛られているところに価値がある。したがって、機械技術者だけでなく、工業に関係する人々は、機械図面の見方、読み方がわからなければ、図面のもつ設計的価値や工業的価値を把握することはできない。

これらの機械図面は、第三者が正確に理解できるようにするために、一定の約束に従って描かれる。JISでは、一般の製図通則（JIS Z 8302）および機械製図（JIS B 0001）などにこれを正確に規定している。

1・6

機械部品の精度

accuracy of machine parts

1・6・1

部品の寸法精度

dimensional accuracy of machine parts

多数の部品を一定の管理技術のもとで製作した場合に、実際に加工された寸法は、目標とする寸法に対してばらつきを示し、一般に図 1・5 に示すような正規分布曲線を示す。この分布曲線において、分布中心を平均値 \bar{x} 、各データと平均との差の 2 乗の平均の平方根で表される標準偏差を σ と呼び、 σ^2 を分散と呼ぶ。また、この分布曲線を $f(x)$ で示すと、分布曲線の $\pm 3\sigma$ の範囲が占める面積は、全体個数の 99.7% となり、一般品質管理の基準となっている。したがって、一般の生産において実際寸法の測定値が $\pm 3\sigma$ の限界外に出れば、これは偶然の結果でなく、技術的に追求すべき異常原因があると考えられる。

また、目標寸法からのずれを偏り（正確度：accuracy）といい、標準偏差 σ をばらつき（精密度：precision）と呼ぶ。

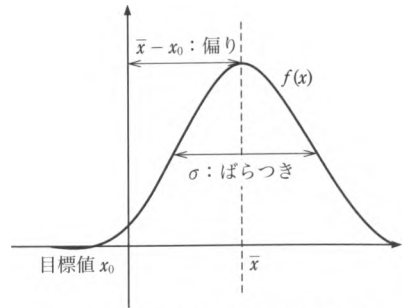


図 1・5 精度における偏りとばらつき

1・6・2

サイズ公差とはめあい

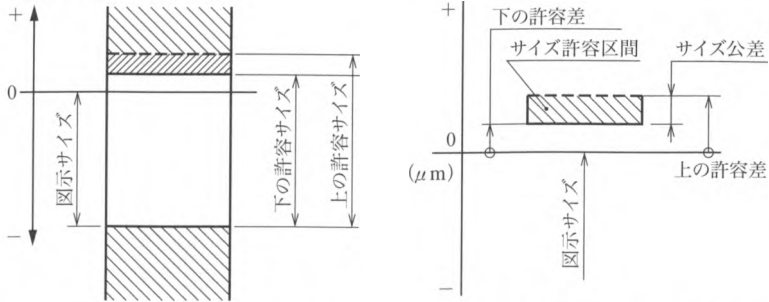
tolerance deviations and fits

(1) 基本サイズ公差 (standard tolerance) (JIS B 0401)*

前述のように、部品の実際の形状は、製図上で示した寸法や幾何形状とは異なり、加工誤差を生じる。したがって部品を組み合わせる製品を作るためには、寸法や幾何形状を許しうる範囲内に制限する必要がある。そのための許容できる範囲を許容限界サイズ（旧：許容限界寸法）といい、大きい値を上許容サイズ、小さい値を下許容サイズという（図 1・6 参照）。またそれらの差をサイズ公差（旧：寸

* JIS B 0401 は、2016 年に多くの用語が改正されている。

サイズ差の符号



(a) 図示サイズ, 上, 下の許容サイズ (b) サイズ許容空間と上, 下の許容差

図 1-6 穴を例として用いた用語と定義

法公差)と呼び、これが当てはめサイズ(旧:実寸法)の許容差の範囲を示すことになる。製作する部品のサイズ公差は、一般にはつぎの2点を考慮して決められる。

- ① 部品に必要とされる機能的な設計上の要求
- ② 製造工程で可能な加工精度の実現性と製造コスト

JIS B 0401では、共通識別記号によって特徴付けたサイズ公差の集まりとして、ISO規格に準拠した基本サイズ公差、IT (international tolerance) が規定されて

表 1-7 基本サイズ公差等級の数値例 (0 ~ 500 mm)

図示サイズ (mm)	基本サイズ公差等級 (IT)																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
数値の算出	-	-	-	-	7_i	10_i	16_i	25_i	40_i	64_i	100_i	160_i	250_i	400_i	640_i	1000_i	1600_i	2500_i	
を超え	基本サイズ公差の数値 (μm)											基本サイズ公差の数値 (mm)							
以下	3	0.8	1.2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0.10	0.14	0.25	0.40	0.60	1.00	1.40
-	6	1	1.5	2.5	4	5	8	12	18	30	48	75	0.12	0.18	0.30	0.48	0.75	1.20	1.80
3	10	1	1.5	2.5	4	6	9	15	22	36	58	90	0.15	0.22	0.36	0.58	0.90	1.50	2.20
6	18	1.2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0.18	0.27	0.43	0.70	1.10	1.80	2.70
10	30	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0.21	0.33	0.52	0.84	1.30	2.10	3.30
18	50	1.5	2.5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0.25	0.39	0.62	1.00	1.60	2.50	3.90
30	80	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0.30	0.46	0.74	1.20	1.90	3.00	4.60
50	120	2.5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0.35	0.54	0.87	1.40	2.20	3.50	5.40
80	超精密部品		精密・一般加工部品					主としてはめあいをしていない、非機能面公差											
適用部品	基準ゲージ項		一般常用はめあい公差																
精度レベル																			

(注) $i = 0.45\sqrt[3]{D} + 0.001D$ (D : mm 単位の基準寸法区分の幾何平均値)

いる。図示サイズ（旧：基準寸法）の区分は最大 3150 mm までの範囲定められており、等級は IT 01, IT 0（ともに 500 mm 以下の図示サイズに対応）、IT 1 より IT 18 まで 20 等級が決められている。

表 1・7 に図示サイズ 500mm 以下の製品に適用される JIS の基本サイズ公差 IT 1 ～ IT 18 とその適用部品の範囲を示す。ここで各等級の数値の算出には、IT 1 ～ IT 4 を除いて、各等級の数値の算出欄の基準単位 i の倍数の値（IT 6 : $10i$, IT 7 : $16i$ など）を用いている。 $i = 0.45^3 \sqrt{D} + 0.001D$ であり、 D は単位の図示サイズ区分の幾何平均値 [mm] である。1 ～ 4 級は基準ゲージ類や超精密部品に適用し、5 ～ 10 級は精密・一般加工部品、一般常用はめあい公差に適用し、11 級以降は主としてはめあいをしない非機能面用の公差に使用する。

表 1・8 には、1 級～18 級までの各級に対応する適用部品と適用加工法の例を示す。図面に記入する図示サイズに対しては、サイズ公差をつけるのが原則であるが、

表 1・8 基本公差等級と適用部品、加工法

基準ゲージ類 超精密部品	1 級	高級標準ゲージ類
	2 級	高級標準ゲージ類, 高級端度器, 標準ゲージ類, 端度器
	3 級	高級ゲージ類, プラグゲージ類, 良質ゲージ類, スナップゲージ類
	4 級	ゲージ一般, ラップ, 超仕上げの高級仕上げ部品, 球軸受高級品
精密部品 一般加工部品 一般常用はめ あい公差	5 級	玉軸受加工, ラップ仕上げ, 精密旋削, 精密中ぐり, ホーニング, 精密研削
	6 級	研削, 精密旋削, 精密中ぐり, 手作業リーマ仕上げ
	7 級	高級旋削, プローチ仕上げ, ホーニング, 研削一般, 高級機械リーマ仕上げ
	8 級	旋盤 (センタ作業), 中ぐり作業, タレット・自動盤, 一般リーマ仕上げ
	9 級	タレット・自動盤, 高級フライス仕上げ, 一般中ぐり, 立て旋盤作業
	10 級	一般フライス削り, 形削り, 立て削り, 手削り, ドリル穴, 金属ロール, 圧延押し
主としてはめ あいをしない 非機能面公差	11 級	ドリル加工, 荒旋削, 荒中ぐり, その他荒削り作業 (精密引抜管, ポンチ穴, プレス)
	12 級	(引抜管, 軽プレス)
	13 級	(プレス製品, ロール管など)
	14 級	(金型 casting, ダイカスト, ゴム型プレス, シェルモールドなど) 小形部品
	15 級	(型 casting, シェルモールドなど) 中形部品
	16 級	(火炎切断, 砂型 casting など) 大形部品
	17 級	
18 級		

この作業は、たいへんはん雑である。しかしサイズの偏差がある範囲を超えると、部品の機能を損なうので、その偏差を制限する必要がある。また工場や検査部門において合否判定を行う場合にも、一定の基準が必要となる。このためにサイズ公差を記入していないサイズに対する規格が制定されており、普通公差 (general tolerances) と呼ばれる。表 1・9 に JIS B 0405 に規定されている長さ寸法に対する許容差を示す。普通公差は、角度寸法 (JIS B 0405) や幾何公差 (JIS B 0419) についても規格化されている。

表 1・9 面取り部分を除く長さ寸法に対する許容差 (単位 mm)

公差等級		基準寸法の区分							
記号	説明	0.5*	3	6	30	120	400	1000	2000
		以上 3以下	を超え 6以下	を超え 30以下	を超え 120以下	を超え 400以下	を超え 1000以下	を超え 2000以下	を超え 4000以下
許 容 差									
f	精級	±0.05	±0.05	±0.1	±0.15	±0.2	±0.3	±0.5	—
m	中級	±0.1	±0.1	±0.2	±0.3	±0.5	±0.8	±1.2	±2
c	粗級	±0.2	±0.3	±0.5	±0.8	±1.2	±2	±3	±4
v	極粗級	—	±0.5	±1	±1.5	±2.5	±4	±6	±8

(注) * 0.5 mm 未満の基準寸法に対しては、その基準寸法に続けて許容差を個々に指示する。

(2) はめあい

はめあいとは、軸を穴に差し込む場合の軸と穴とがはまり合う状態をいう。はめあいには3つの状態があり、穴に差し込んだ軸が回るようにするためには、軸と穴の間にすきまがなくてはならず、このようなはめあいをすきまばめという。また軸を穴に固定するためには、穴の径のほうを小さくし、締めしろを設ける。これをしまりばめという。これら二つのはめあいの中間で、穴と軸の径がほとんど等しいようなはめあいを中間ばめという。中間ばめは、取り外しが必要な箇所や軸の運動に精度が要求される箇所のはめあいを使う。

軸と穴のはめあいの状態を表示するために、図示サイズに対するサイズ許容区間 (旧:公差域) の位置と寸法許容差が、図 1・7 に示すような形で規定されている (JIS B 0401-1)。軸と穴のサイズ許容区間の位置はアルファベットを用いて表され、軸に対してはアルファベットの小文字を、穴に対しては大文字を用いる。サイズ許容区間とは、基準線に対して定まる上と下の許容差の間の領域をいう。

軸の場合、サイズ許容区間の位置 a ~ g は基準寸法より軸径が小さい軸 (すきま

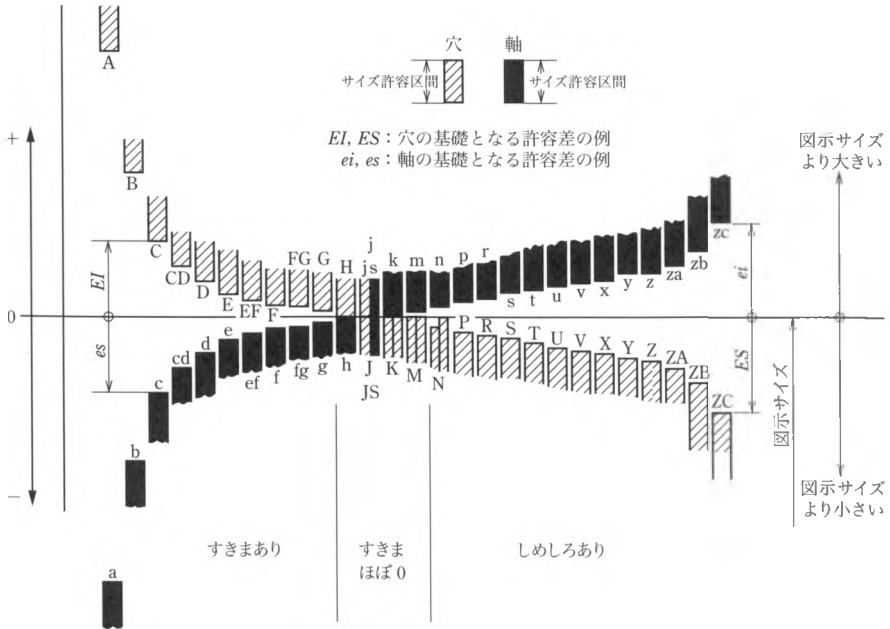
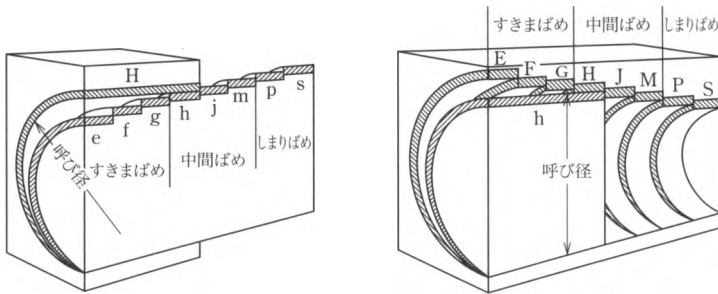


図 1-7 図示サイズに関するサイズ許容区間の配置 (基礎となる許容差) の概要図 (JIS B 0401-1)

ばめ)を示し、 $n \sim zc$ は基準寸法より大きい軸(しまりばめ)を示す。 h, j, k, m は、図示サイズとほぼ同様の軸径を持つ軸(中間ばめ)を示す。穴の場合は、軸の場合とは反対に、 $A \sim G$ の文字は、実際の穴寸法が図示サイズより大きい穴(すぎまばめ)を示し、 $N \sim ZC$ の文字は図示サイズより小さい穴(しめりばめ)を示す。



(a) 穴基準

(穴の寸法は一定で、軸側のはめあい寸法を変化させる)

(b) 軸基準

(軸の寸法は一定で、穴側のはめあい寸法を変化させる)

図 1-8 穴基準、軸基準のはめあい

軸と穴を組み合わせる方法として、穴基準はめあいと軸基準はめあいの2つのはめあい方式がある。穴基準はめあいは、図1・8に示すように、一つのサイズ許容区間の穴と種々のサイズ許容区間の軸を組み合わせる方式であり、軸基準はめあいは、一つのサイズ許容区間の軸と種々のサイズ許容区間の穴を組み合わせる方式である。JIS規格上は、どちらの方式をとってもよいが、検査測定用ゲージの種類や加工精度上の問題を考慮して、穴基準はめあいが一般に広く採用されている。

はめあいの記号は、サイズ許容区間クラス（サイズ許容区間の位置 + 基本サイズ公差等級）を用いて、30H6/m6（図示サイズ + 穴のサイズ許容区間クラス / 軸のサイズ許容区間クラス）のように表す。これは図示サイズが30 mmで、穴のサイズ許容区間位置がH、軸のサイズ許容区間位置がm、基本サイズ公差等級がIT6であることを示している。明確な許容差を用いる場合には、片側公差（unilateral tolerance, one-direction tolerance）を用いて、30H6/m6では、穴に対しては $30_{-0}^{+0.013}$ 、軸に対しては $30_{+0.008}^{+0.021}$ のように示す。

図1・9には、30mmの寸寸法を基準とした場合のはめあいの種類に対応した軸のサイズ公差記号とサイズ公差の一例を示す。

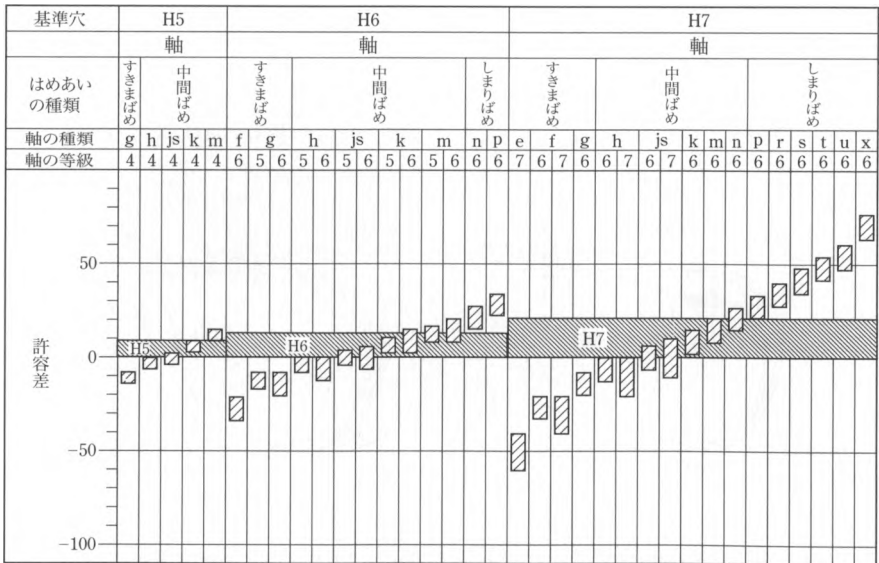


図1・9 直径30mmの穴を基準とした場合の軸のサイズ公差記号とサイズ公差（単位μm）

1・6・3

幾何公差

geometrical tolerance

機械部品は、点や線、軸線、面、中心面などから構成されており、これらを形体というが、形体には、一般に、理論的に正確に決められた幾何学的基準（データム：点、直線、軸直線、平面、中心平面など）からの偏差が存在する。このような偏差には、形状偏差、姿勢偏差、位置偏差、振れなどがあり、これらを総称して幾何偏差という（JIS B 0621）。幾何偏差の値を決めるために、データムに関連なく決められる形体を単独形体といい、データムに関連して幾何偏差が決められる形体を関連形体という。

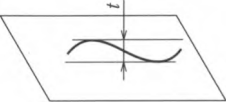
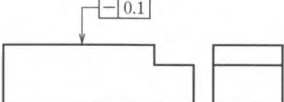
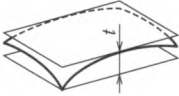
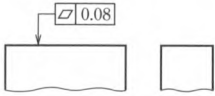
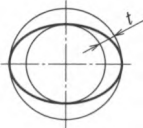
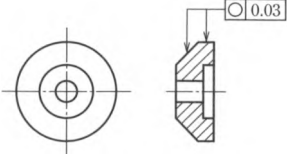
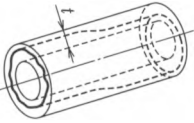
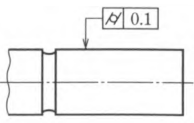
幾何公差は、このような定義による幾何偏差の許容値を表し、その表示方式は JIS B 0021 に規定されている。表 1・10 に幾何公差の種類と幾何公差記号を、表 1・11 に幾何公差域の定義と指示方法の参考例を示す。

なお、一般に、幾何公差と寸法公差は、互いに関係ないものとして指示する。しかし、用いる寸法公差に対してどの程度の幾何公差を設定するかの一応の目安として、つぎのような関係が一例として経験的に与えられている²⁾。

表 1・10 幾何公差の種類と記号

公差の種類	特性	記号	データム指示	適用する形体
形状公差	真直度	—	否	単独形体
	平面度	▭	否	
	真円度	○	否	
	円筒度	⊘	否	
	線の輪郭度	∩	否	単独形体 または 関連形体
	面の輪郭度	∪	否	
姿勢公差	平行度	//	要	関連形体
	直角度	⊥	要	
	傾斜度	∠	要	
	線の輪郭度	∩	要	
	面の輪郭度	∪	要	
位置公差	位置度	⊕	要・否	関連形体
	同心度(中心点に対して)	◎	要	
	同軸度(軸線に対して)	◎	要	
	対称度	≡	要	
	線の輪郭度	∩	要	
振れ公差	面の輪郭度	∪	要	要
	円周振れ	↗	要	
	全振れ	↗↘	要	

表 1-11 幾何公差域の定義と指示方法 (単位 mm)

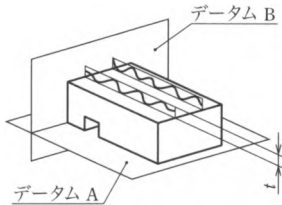
公差域の定義	指示方法および説明
<p>真直度公差</p> <p>対象とする平面内で、公差域は t だけ離れ、指定した方向に、平行二直線によって規制される。</p> 	<p>上側表面上で、指示された方向における投影面に平行な任意の実際の(再現した)線は、0.1 だけ離れた平行二直線の間になければならない。</p> 
<p>平面度公差</p> <p>公差域は、距離 t だけ離れた平行二平面によって規制される。</p> 	<p>実際の(再現した)表面は、0.08 だけ離れた平行二平面の間になければならない。</p> 
<p>真円度公差</p> <p>対象とする横断面において、公差域は同軸の二つの円によって規制される。</p> 	<p>円筒および円すい表面の任意の横断面において、実際の(再現した)半径方向の線は半径距離で 0.03 だけ離れた共通平面上の同軸の二つの円の間になければならない。</p> 
<p>円筒度公差</p> <p>公差域は、距離 t だけ離れた同軸の二つの円筒によって規制される。</p> 	<p>実際の(再現した)円筒表面は、半径距離で 0.1 だけ離れた同軸の二つの円筒の間になければならない。</p> 

公差域の定義

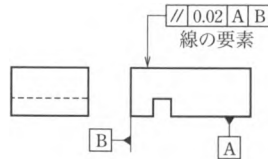
指示方法および説明

データム平面に関連した線要素の平行度公差

公差域は、距離 t だけ離れ、データム平面 A に平行で、データム平面 B に直角な平行二直線によって制限される。

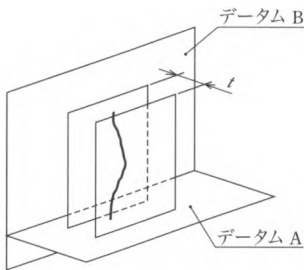


実際の（再現した）表面は、0.02 だけ離れ、データム平面 A に平行で、データム平面 B に直角な平行二直線の間になければならない。

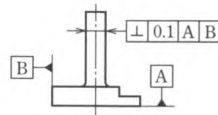


データム平面に関連した線の直角度公差

公差域は、距離 t だけ離れ、平行二平面によって規制される。この平面は、データムに直角である。



円筒の実際の（再現した）軸線は、0.1 だけ離れ、データム平面 A に直角な平行二平面の間になければならない。

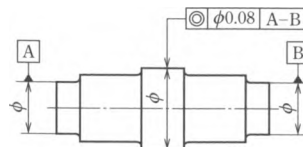


軸線の同軸度公差

公差値に記号 ϕ が付けられた場合には、公差域は直径 t の円筒によって規制される。円筒公差域の軸線は、データムに一致する。



内側の円筒の実際の（再現した）軸線は、共通データム軸直線 A-B に同軸の直径 0.08 の円筒公差域の中になければならない。



$$\left. \begin{aligned} \text{真円度} &= (0.2 \sim 0.5) \times (\text{IT 公差}) \\ \text{円筒度} &= (0.3 \sim 0.7) \times (\text{IT 公差}) \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

1.6.4

最大実体公差

maximum material principle

2個の部品を単に組み合わせるだけでよい場合には、寸法公差と幾何公差を互いに融通し合って幾何公差域を大きくとることができる。このような公差方式を最大実体公差方式という。ただし、最大実体公差方式の適用は、幾何公差のうち位置公差と姿勢公差に限られている。

最大実体公差方式は、最大実体状態を基にして公差を与える方式である。最大実体状態 (maximum material condition : MMC) とは、部品の実体 (形体) が最大となるような許容限界寸法をもつ状態をいう。形体の最大実体状態を定める寸法を最大実体寸法 (maximum material symbol : MMS) といい、最大実体寸法は、軸では最大許容寸法であり、穴では最小許容寸法となる。逆に、形体の実体が最小となるような許容寸法 (たとえば、最小の軸径、最大の穴径) をもつ状態を最小実体状態 (least material condition : LMC) といい、その状態を決める寸法を最小実体寸法 (least material symbol : LMS) という。また、最大実体寸法と幾何公差との総合効果によって生じる形体に許容される完全形状の限界を実効状態 (virtual condition) といい、実効状態を決める寸法を実効寸法 (virtual symbol : VS) という。ちなみに、

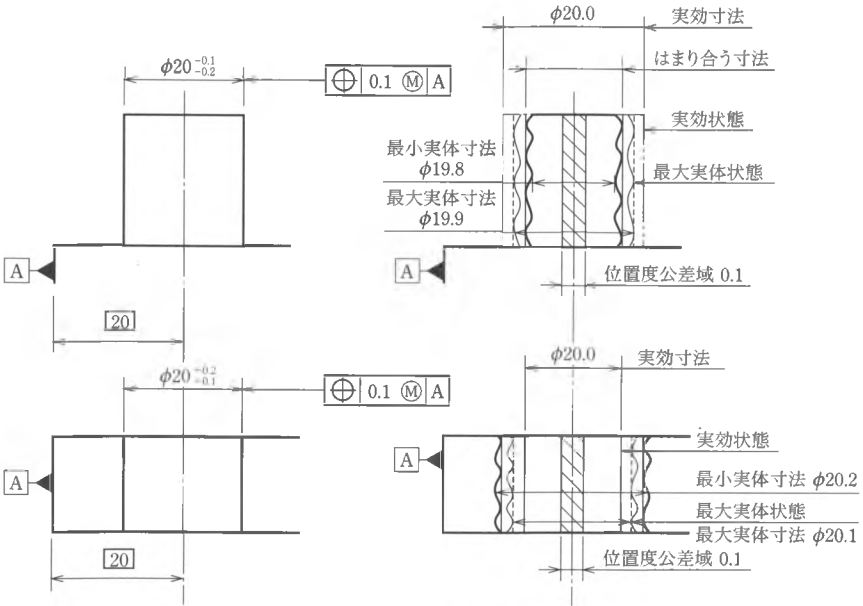
$$\text{軸の実効寸法} = (\text{最大実効寸法}) + (\text{幾何公差})$$

$$\text{穴の実効寸法} = (\text{最大実効寸法}) - (\text{幾何公差})$$

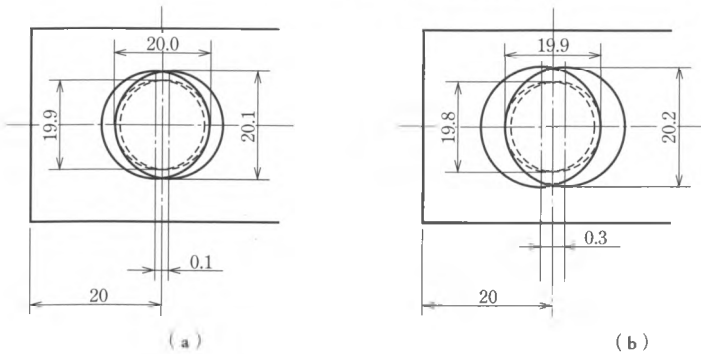
で与えられる。

図 1.10(1) に、円形ピンおよび穴の寸法公差と位置度公差とに最大実体公差方式を適用する場合の図面指示法とその説明を示す。ピンの最大寸法は $\phi 19.9$ 、穴の最小寸法は $\phi 20.1$ であり、ともに最大実効寸法である。したがって、穴とピンが組立つようにするには、穴とピンに対する位置度公差の合計が、この差 (0.2) を超えてはならないことになる。図 1.10(1) では、この公差は穴とピンに等しく配分されている。記号 \oplus は、穴およびピンの中心位置の公差 (位置度公差) を示す。最大実体公差方式を適用する場合には、 \textcircled{M} と指示する。

図 1.10(2) の (a) に示すように、穴およびピンの寸法が最大実体寸法であっても、位置度公差域内に穴およびピンが加工されていれば、両者を組み立てることは



(1) 図面指示法と説明



(2) 最大実体公差方式における幾何公差

図 1・10 最大実体公差方式

可能である。しかし、図 1・10(2)の(b)に示すように、穴の直径が +0.2 の最大直径 (最小実体寸法) であり、ピン直径が最小実体寸法 ($\phi 19.8$) である場合には、寸法公差を位置度公差に割り振って位置度公差を 0.1 よりも大きくすることができる。図 1・10(2)の(b)の穴部品は、0.1 の位置度公差では不合格となるが、最大実体公差方式を採用し、ピンの位置度公差を 0.1 とした場合、穴の位置度公差

は0.3まで大きくとることができ、組立て可能ということになる。このように、最大公差方式を採用すると、精度をゆるめることができ、加工が容易になるという利点がある。

1・6・5

表面性状

surface texture

表面性状は、加工品の仕上り表面精度を表す一因子となるものであり、寸法、はめあい、疲労強度、表面硬度などの機械的性質と密接な関係があり、また摩擦、摩耗、潤滑、腐蝕などの材料表面の物理・化学的性質にも大きい影響をもっている。機械部品が精密加工されるほど、滑らかな仕上げ面が要求されるが、仕上げ加工の費用は、表面の粗さパラメータの大小に3乗で逆比例するといわれる。したがって、いたずらに高精度な仕上り面粗さを要求すべきでなく、必要にして十分な適正面粗さを指定する必要がある。

(1) 粗さパラメータ

表面粗さ測定機を用いて部材表面を測定すると、図1・11に示すように、部材表面を加工面に対して垂直な平面で切ったときの断面曲線が得られる。この断面曲線データを、図1・12に示すようなカットオフ値を λ_s 、 λ_c 、 λ_f とした輪郭曲線フィルタに通し、得られた曲線が粗さ曲線とうねり曲線となる。粗さ曲線から得られる粗さパラメータは、JIS B 0601に規定されているが、一例を以下に示す。

① 最大高さ粗さ (R_z) 図1・13に示すように、基準長さ l における粗さ曲線の山高さ Z_p の最大値と谷深さ Z_v の最大値との和で表される。図1・13の曲線とし

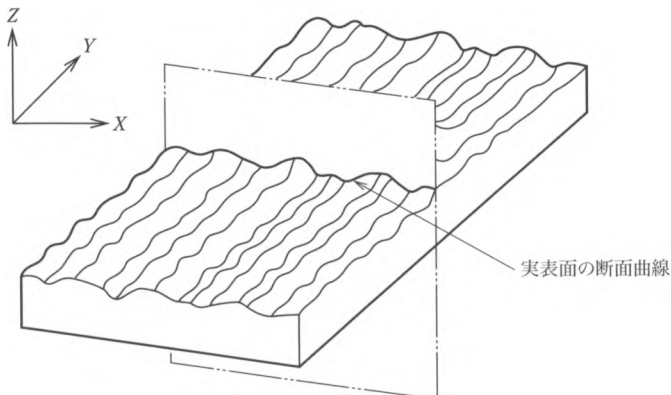


図1・11 実表面の断面曲線

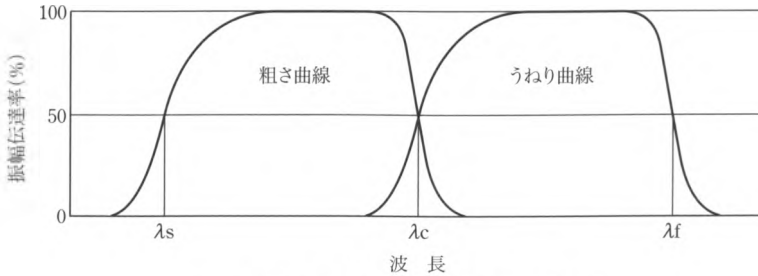


図 1-12 粗さ曲線およびうねり曲線の伝達特性

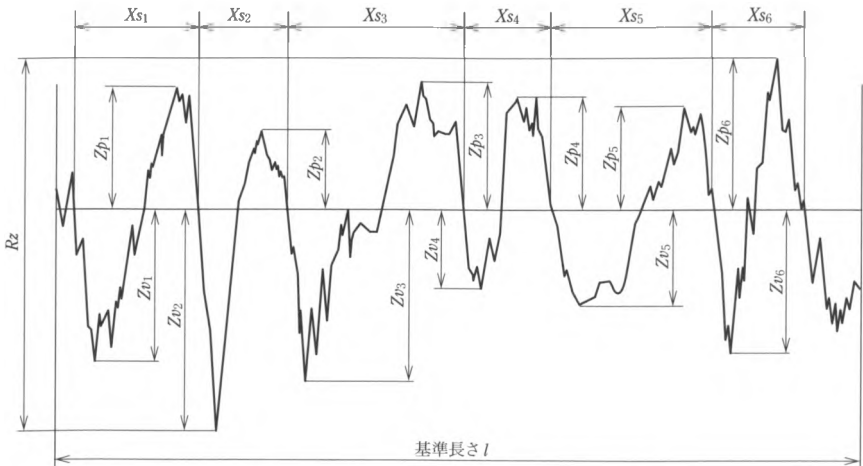


図 1-13 輪郭曲線と各種粗さパラメータ（粗さ曲線の例）

た場合は、最大高さという。

② 算術平均粗さ (Ra) 粗さ曲線に対して、基準長さ l における $Z(x)$ の絶対値の平均値で与えられる。したがって、式としては、

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (1.2)$$

③ 十点平均粗さ (Rz_{JIS}) 基準曲線 l において、最も高い山高さから 5 番目までの山高さと、最も深い谷深さから 5 番目までの谷深さの絶対値の和をとり、平均した値である。

$$Rz_{JIS} = \frac{1}{5} \sum_{n=1}^5 (z_{pn} + z_{vn}) \quad (1.3)$$

日本では、広く使用されていた粗さパラメータであったが、2001年の改正で JIS

からは削除された。しかし、付属書に参考として残されている。

④ **粗さ曲線要素の平均長さ**（横方向パラメータ） 基準長さにおける粗さ曲線要素の長さ X_S の平均値であり、次式で与えられる。

$$RSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{Si} \quad (1\cdot4)$$

これらの粗さパラメータを求めるための基準長さとしては、表 1・12 のような値が用いられる。

表 1・12 粗さパラメータと基準長さ

Ra (μm)	Rz (μm)	RSm (mm)	粗さ曲線の基準長さ l_r (mm)
$(0.006) < Ra \leq 0.02$	$(0.025) < Rz \leq 0.1$	$0.013 < RSm \leq 0.04$	0.08
$0.02 < Ra \leq 0.1$	$0.1 < Rz \leq 0.5$	$0.04 < RSm \leq 0.13$	0.25
$0.1 < Ra \leq 2$	$0.5 < Rz \leq 10$	$0.13 < RSm \leq 0.4$	0.8
$2 < Ra \leq 10$	$10 < Rz \leq 50$	$0.4 < RSm \leq 1.3$	2.5
$10 < Ra \leq 80$	$50 < Rz \leq 200$	$1.3 < RSm \leq 4$	8

(2) 粗さパラメータの基本表示と指

定の目安

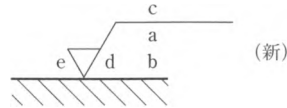
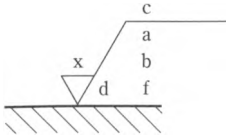
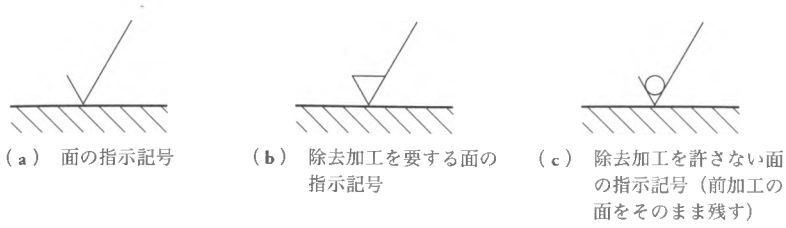
製図において、表面性状を図示する際に粗さパラメータが用いられ、JIS B 0031 “製品の幾何特性仕様－表面性状の図示方法”に規定されている。

表面性状は、図 1・14 に示すように表現される。図面上に記入する Ra などの値については、標準数列が用いられることが多く、表 1・13 に参考値を示す。

図 1・15 には、加工法とその仕上り表面粗さの関係を示した。

表 1・13 各種粗さパラメータの標準数列の例

Ra (μm)	Rz (μm)	RSm (mm)
		0.006
0.012		0.0125
0.025	0.025	0.025
0.050	0.050	0.050
0.100	0.100	0.100
0.20	0.20	0.20
0.40	0.40	0.40
0.80	0.80	0.80
1.60	1.60	1.60
3.2	3.2	3.2
6.3	6.3	6.3
12.5	12.5	12.5
25	25	
50	50	
100	100	
200	200	
400	400	
	800	
	1600	



x : R_a の値 a : R_a 以外の粗さ値
 b : カットオフ値および基準長さ
 c : 加工方法 d : 筋目およびその方向
 f : 表面うねり (JIS B 0160)

a : 通過帯域または基準長さ, パラメータとその値
 b : 二つ以上のパラメータが要求されたときの二つ目以上のパラメータ指示
 c : 左記に同じ, d : 左記に同じ, e : 削り代

図 1・14 表面性状の指示方法

表面粗さ区分		加工方法											
		0.1 S	0.2 S	0.4 S	0.8 S	1.6 S	3.2 S	6.3 S	12.5 S	25 S	50 S	100 S	
鑄造	鑄造												
	ダイカスト												
塑性加工	鍛造												
	熱間圧延												
	冷間圧延												
	引抜き 押出し												
切削加工	転造												
	旋削												
	中ぐり												
	平削り												
	形・立削り												
	正面フライス削り												
	平フライス削り												
	穴あけ												
砥粒加工	リーマ仕上												
	ブローチ仕上												
	シェービング仕上												
	円筒研削												
	内面研削												
砥粒加工	ホーニング仕上												
	超仕上げ												
	ラッピング仕上												

上仕上げ A, 中仕上げ B, 普通仕上げ C

(注) 表面粗さ区分における 0.1S ~ 100S は R_z (μm) に相当する。

図 1・15 加工法と表面粗さの関係