

第1章 機械の基礎知識

第1節 基礎数表

1 単 位

自然現象を科学的・工学的に取り扱う場合、種々の量を数値で表わすために、いくつかの基本となる一定量が約束で決められている。それらが基本単位で、例えば、質量の単位「キログラム」は国際キログラム原器の質量に等しい。

基本単位系としてはメートル系のMK S系・CG S系、ヤード・ポンド系等があるが、単位のいつもの普遍性・国際性を目指す中で、一貫性のある単位系として各国で国際単位系（SI）が採用されている。我が国では、国際的情勢に対応して、1974年からJ I Sに導入している。

(1) 国際単位系（SI）

SIは、基本単位（7個）と補助単位（2個）より組み立てられている（表3.1参照）。その主な組立単位および併用単位を、表3.2に、他単位との換算率表を、表3.3に示す。

特に、重力単位系との換算関係は、次のとおりである。

標準の重力加速度 $g=9.8\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

1重量キログラム（単位記号 kgf, またはkgW） $=9.8\text{N}=9.8\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$

1重量キログラム毎平方センチメートル $=98,000\text{Pa})=0.98\text{bar}$

表 3.1 SI 基本単位および補助単位

	量	単位の名称	単位記号
基本単位	長 さ	メートル	m
	質 量	キログラム	kg
	時 間	秒	s
	電 流	アンペア	A
	熱力学温度	ケルビン	K
	物 質 量	モ ル	mol
	光 度	カンデラ	cd
補助単位	平 面 角	ラジアン	rad
	立 体 角	ステラジアン	sr

表 3.2 S I 単位および併用単位

量	単位の名称	単位記号	備 考
平 面 角	ラジアン	rad	$1^\circ(\text{度}) = \frac{\pi}{180} \text{rad}$, $1'(\text{分}) = \frac{1^\circ}{60}$, $1''(\text{秒}) = \frac{1'}{60}$ $1L$ (リットル) $= 10^{-3} m^3$ 1min (分) $= 60\text{s}$ 1h (時) $= 60\text{min}$ 1d (日) $= 24\text{h}$ 重力の加速度 $g = 9.8\text{m/s}^2$
立 体 角	ステラジアン	sr	
長 さ	メートル	m	
面 積	平方メートル	m^2	
体 積	立方メートル	m^3	
時 間	秒	s	
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	
速 度	メートル毎秒	m/s	
加 速 度	メートル毎秒毎秒	m/s^2	
周 波 数	ヘルツ	Hz	$1\text{Hz} = 1\text{s}^{-1}$
回 転 数	回 毎 秒	s^{-1}	min^{-1} (回毎分)
質 量	キログラム	kg	$1\text{t} = 10^3\text{kg}$
密 度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3	
運 動 量	キログラムメートル毎秒	$\text{kg} \cdot \text{m/s}$	質量×速度
力	ニュートン	N	$1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$ ($= 0.102\text{kgf}$) ($1\text{kgf} = 9.8\text{N}$, $1\text{kN} = 102\text{kgf}$)
力のモーメント	ニュートンメートル	$\text{N} \cdot \text{m}$	
圧 力	パスカル	Pa	$1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$ 1bar (バール) $= 10^5\text{Pa}$
応 力	パスカルまたはニュートン毎平方メートル	Pa N/m^2	
粘 度	パスカル秒	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	
動 粘 度	平方メートル毎秒	m^2/s	
エ ネ ル ギ ー	ジュール	J	$1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m}$
仕 事 率	ワ ッ ト	W	$1\text{W} = 1\text{J/s}$
熱 力 学 温 度	ケルビン	K	$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15$ セルシウス温度間隔は $^{\circ}\text{C}$ でもよい。
セルシウス温度	セルシウス度	$^{\circ}\text{C}$	
温 度 間 隔	ケルビン	K	
熱 量	ジュール	J	
比 熱	ジュール毎キログラム毎ケルビン	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	
電 流	アンペア	A	

表 3.3 SI 単位換算表

(太線枠内が SI 単位)

力	N	dyn	kgf	粘度	Pa·s	cP	P
	1	1×10^5	1.01972×10^{-1}		1	1×10^3	1×10
	1×10^{-5}	1	1.01972×10^{-6}		1×10^{-3}	1	1×10^{-2}
	9.806 65	9.80665×10^5	1		1×10^{-1}	1×10^2	1

注 $1P = 1 \text{ dyn} \cdot \text{s} / \text{cm}^2 = 1 \text{ g} / \text{cm} \cdot \text{s}$.
 $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 1 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$, $1 \text{ cP} = 1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$

圧力	Pa	bar	kgf/cm ²	atm	mmH ₂ O	mmHg or Torr	磁界の強さ	A/m	Oe
	1	1×10^{-5}	1.01972×10^{-5}	9.86923×10^{-6}	1.01972×10^{-1}	7.50062×10^{-3}		1	$1.257 \cdot 10^{-2}$
	1×10^5	1	1.019 72	9.86923×10^{-1}	1.01972×10^4	7.50062×10^2		79.58	1
力	9.80665×10^4	9.80665×10^{-1}	1	9.67841×10^{-1}	1×10^4	7.35559×10^2	磁束密度	T	G
	1.01325×10^5	1.013 25	1.033 23	1	1.03323×10^4	7.60000×10^2		1	1×10^4
	9.806 65	9.80665×10^{-5}	1×10^{-4}	9.67841×10^{-5}	1	7.35559×10^{-2}		1×10^{-4}	1
	1.33322×10^2	1.33322×10^{-3}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1.35951×10	1			

注 $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} / \text{m}^2$

応力	Pa	MPa or N/mm ²	kgf/mm ²	kgf/cm ²	動粘度	m ² /s	cSt	St
	1	1×10^{-6}	1.01972×10^{-7}	1.01972×10^{-5}		1	1×10^6	1×10^4
	1×10^6	1	1.01972×10^{-1}	1.01972×10		1×10^{-6}	1	1×10^{-2}
力	9.80665×10^5	9.806 65	1	1×10^2		1×10^{-4}	1×10^2	1
	9.80665×10^4	9.80665×10^{-2}	1×10^{-2}	1				

注 $1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 / \text{s}$

仕事・エネルギー・熱量	J	kW·h	kgf·m	kcal	熱伝導率	W/(m·K)	kcal/(h·m·°C)
	1	2.77778×10^{-7}	1.01972×10^{-1}	2.38889×10^{-4}		1	8.6000×10^{-1}
	3.600×10^6	1	3.67098×10^5	8.6000×10^2		1.162 79	1
	9.806 65	2.72407×10^{-6}	1	2.34270×10^{-3}			
	4.18605×10^3	1.16279×10^{-3}	4.26858×10^2	1			

注 $1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$, $1 \text{ W} \cdot \text{h} = 3,600 \text{ W} \cdot \text{s}$
 $1 \text{ cal} = 4,186.05 \text{ J}$ (計量法による)

仕事率(工率・動力)・熱量	kW	kgf·m/s	PS	kcal/h	熱伝達係数	W/(m ² ·K)	kcal/(h·m ² ·°C)
	1	1.01972×10^2	1.359 62	8.6000×10^2		1	8.6000×10^{-1}
	9.80665×10^{-3}	1	1.33333×10^{-2}	8.433 71		1.162 79	1
	7.355×10^{-1}	7.5×10	1	6.32529×10^2			
	1.16279×10^{-3}	1.18572×10^{-1}	1.58095×10^{-3}	1			

注 $1 \text{ W} = 1 \text{ J} / \text{s}$, PS: 仏馬力
 $1 \text{ PS} = 0.7355 \text{ kW}$ (計量法施行法による)
 $1 \text{ cal} = 4,186.05 \text{ J}$ (計量法による)

比熱	J/(kg·K)	kcal/(kg·°C)	比熱	J/(kg·K)	kcal/(kg·°C)
	1	2.38889×10^{-4}		1	2.38889×10^{-4}
	4.18605×10^3	1		4.18605×10^3	1

注 $1 \text{ cal} = 4,186.05 \text{ J}$ (計量法による)

(2) SI 接頭語

SI単位の10の整数乗倍を構成する接頭語を、表3.4に示す。

2 次 元

すべての物理量は、少数の、たがいに独立な基本的物理量の累乗の積に比例する。例えば、長さ、質量、時間を基本的物理量と見なして、それぞれL, M, Tの記号で表わせば、

$$\text{面積} : L^2 M^0 T^0, \quad \text{体積} : L^3 M^0 T^0, \quad \text{速度} : L M^0 T^{-1}, \quad \text{力} : L M T^{-2}$$

となる。この場合の累乗の指数を、L, M, Tに関する次元（ディメンション）という。

種々の量の関係を表わす式では、次元についても同じ関係が成立する。例えば、水圧シリンダーの圧力とシリンダーの断面積からそのシリンダーの圧力を求めるときは、

$$\text{内圧} [\text{力}/\text{長さ}^2] \times \text{断面積} [\text{長さ}^2] = \text{力} [\text{力}]$$

$$L^{-1} M T^{-2} \times L^2 M^0 T^0 = L M T^{-2}$$

このとき、内圧の数値が長さの単位を〔m〕として表わしておれば、それに乗ずる断面積も〔m〕単位の数値でなければならない。

3 ギリシャ文字

常用されることが多いギリシャ文字を、表3.5に示す。

表 3.5 ギリシャ文字

頭文字	小文字	読み方	頭文字	小文字	読み方	頭文字	小文字	読み方
A	α	アルファ	I	ι	イオタ	P	ρ	ロー
B	β	ベータ	K	κ	カッパ	Σ	σ	シグマ
Γ	γ	ガンマ	Λ	λ	ラムダ	T	τ	タウ
Δ	δ	デルタ	M	μ	ミュー	Τ	υ	ウプシロン
E	ε	イプシロン	N	ν	ニュー	Φ	φ	ファイ
Z	ζ	ジータ	Ξ	ξ	クサイ	X	χ	カイ
H	η	イータ	O	ο	オミクロン	Ψ	ψ	プサイ
Θ	θ	シータ	Π	π	パイ	Ω	ω	オメガ

表 3.4 SI 接頭語

倍 数	接頭語	記 号	倍 数	接頭語	記 号
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻¹	デシ	d
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ¹	デカ	da	10 ⁻¹⁸	アト	a

第2節 数 学

1 代数公式の例

$$(a \pm b)^2 = a^2 \pm 2ab + b^2$$

$$a^m \cdot a^n = a^{m+n}$$

$$(a \pm b)^3 = a^3 \pm 3a^2b + 3ab^2 \pm b^3$$

$$(a^m)^n = a^{mn} = (a^n)^m$$

$$a^3 \pm b^3 = (a \pm b)(a^2 \mp ab + b^2)$$

$$a^0 = 1 \quad (a \neq 0)$$

2 三角関数の定義

直角三角形ABCの $\angle ABC = \theta$ とすれば（図3.1参照），下式の関係がある。

$$\sin \theta = \frac{AC}{AB}$$

$$\operatorname{cosec} \theta = \frac{AB}{AC}$$

$$\cos \theta = \frac{BC}{AB}$$

$$\sec \theta = \frac{AB}{BC}$$

$$\tan \theta = \frac{AC}{BC}$$

$$\cot \theta = \frac{BC}{AC}$$

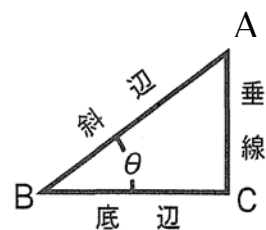


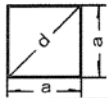
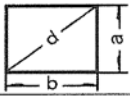
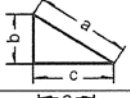
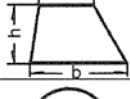


図 3.1 三角関数の定義

$$\overline{AB}^2 = \overline{BC}^2 + \overline{CA}^2 \quad (\text{ピタゴラスの定理})$$

3 平面図形の面積と立体の体積・表面積

基本的な平面図形と立体の面積・体積・表面積の例を，表3.6に示す。

表 3.6 平面図形の面積と立体の体積・表面積

正方形		面 積 $A = a^2$ $A = \frac{1}{2}d^2$
長方形 (矩形)		面 積 $A = ab$ $A = a\sqrt{d^2 - a^2} = b\sqrt{d^2 - b^2}$
直角三角形		面 積 $A = \frac{bc}{2}$ $a = \sqrt{b^2 + c^2}$
台形 (梯形)		面 積 $A = \frac{(a+b)h}{2}$
円		面 積 円 周 $A = \pi * r^2 = 3.1416r^2$ $C = 2\pi * r = 3.1416d$
球		体 積 表面積 $V = \frac{4}{3}\pi * r^3 = \frac{\pi d^3}{6} = 0.5236d^3$ $A = 4\pi * r^2 = \pi d^2 = 3.1416d^2$

4 数値の丸め方

鉱工業における十進法の数値を丸める場合は、図3.2に示す方法にもとづく：例：5桁を有効数字3桁に丸める場合（説明図は、JIS Z8401の規定に基づいて作成）。

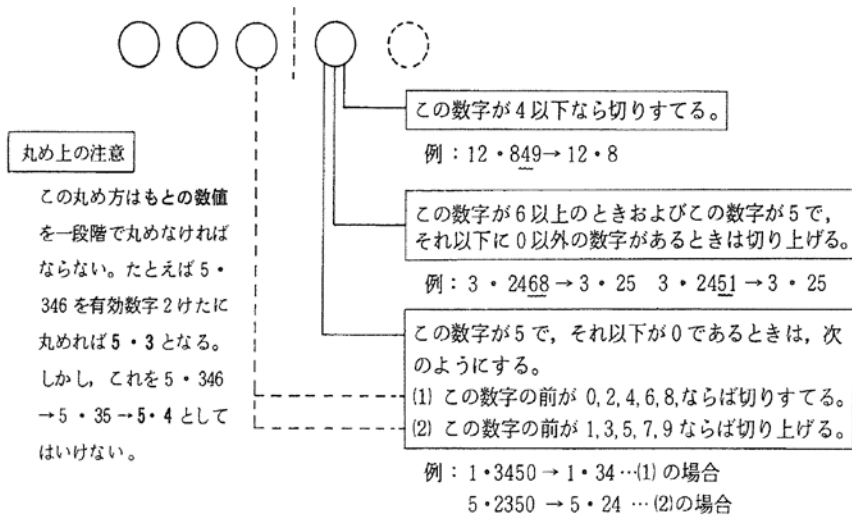


図 3.2 数値の丸め方

第3節 力 学

1 力の3要素

ある物体が、地球に対して時間とともにその位置や向きを変えることを地球上での運動という。物体の運動状態の変化は、力の作用によって起こる。力による運動状態の変化は、加えられた力の①大きさ、②方向、③着力点（作用点）によって決り、これを力の3要素という。力の図示は、図3.3のように、着力点から作用方向へ直線を引き（作用線）、その線上で力の大きさに比例した長さの矢印によって表わす。

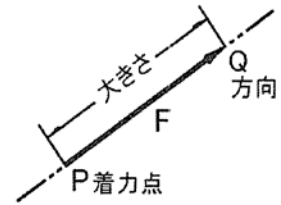


図3.3 力の3要素と図示

力は、固体を介して伝えられるだけではなく、液体、気体の圧力や流れによっても作用する。

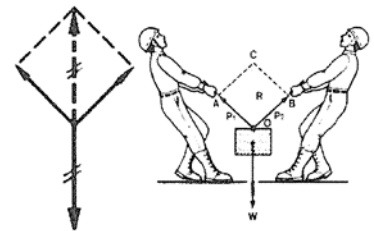
2 力のつり合い

いくつかの力が同時に1つの物体に作用したとき、その物体の運動状態（静止を含む）が変わらないと、これらの力はつり合っているといい、その物体はつり合い状態にあるという。

2つあるいは3つの力がつり合うためには、①大きさが等しく、②作用線が同一線上にあり、③方向が正反対であることが必要である（図3.4参照）。



(a) 2つの力のつり合い



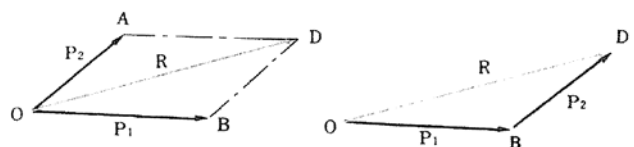
(b) 3つの力のつり合い

図3.4 力のつり合い

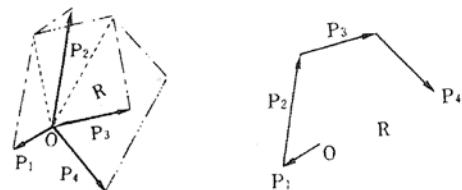
3 力の合成と分解

2つ以上の力が作用するとき、それらと同じ効果をもつ1つの力を考えることができ、それを元の力の合力といい、合力を求めることを力の合成という。逆に、1つの力を、同じ効果をもついくつかの力に分けることもでき、これを力の分解という。分解された力を元の力の分力という。

力の合成と分解の例を、図3.5に示す。力の合成・分解は、図(a)のように1平面上の場合だけでなく、(b)のように立体的に作用する多くの力についても可能である。



(a) 1つの平面内での力の合成



(b) 立体的に作用する多くの力の合成

図3.5 力の合成と分解

4 偶力とそのモーメント

大きさが等しく方向が反対で、着力点の異なる2つの平行な力を、偶力という(図3.6参照)。このような1組の力は、前項3のように合成できず、2力を合わせた作用は、物体を回転させることになる。この力をモーメント(記号M)といい、その大きさは、図の記号を用いて次式で表す。

$$M = F d \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

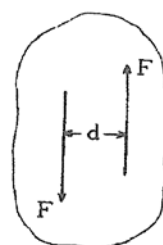


図3.6 偶力

5 重心と物体の安定

地球上のすべての物体は、地球の中心に向かう方向(鉛直下方)に地球の引力を受けている。この力を重力という。重力は物体の各部に作用している平行な力であり、そのすべてを合成したとき、その合力が作用する点を、その物体の重心という。従って、力の関係について考える場合、その物体の全重量が重心に集まっていると
して取り扱うことができる。

平面上に置いた物体を傾けたとき、重心の位置が底面の縁より内側にあれば、手を離しても元に戻る(図3.7参照)。重心がちょうど縁の上方に来るまで傾けて手を離すと、物体は元に戻らないが、すぐには倒れない。重心が縁より外に出るほど、大きく傾けて

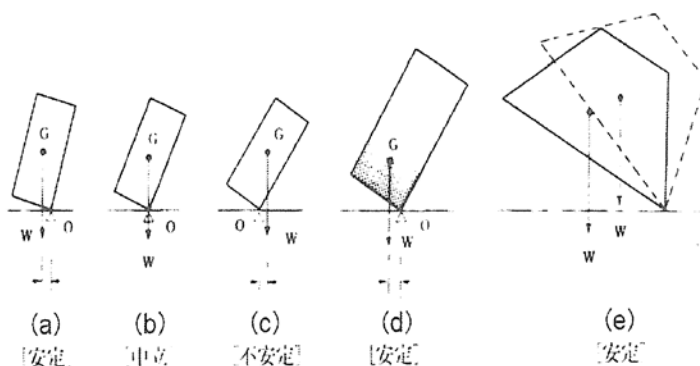


図3.7 物体の重心と安定の関係

手を離せば物体は倒れる。傾斜面に物を置いたときにも、同じことがおこる。

一般に、物体は、図3.7の(d)や(e)のように、①重心が低く、②底面が広いほど安定が良い。

6 運 動

(1) 速度と加速度

運動の速さの度合いを速度という。また、単位時間に起こる速度の変化を加速度という。

すなわち、時間 t [s] の間に距離 L [m] を動いたとすると、その間の速度(または平均速度) V [m/s] は、次のように表わされる。

$$V = L/t \quad [\text{m/s}] \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

時間 t [s] の間に速度が V_1 (初速度) から V_2 (終速度) [m/s] に変わったとすると、その間の加速度(または平均加速度) a [m/s²] は次のように表わされる。

$$\alpha = \frac{V_2 - V_1}{t} \quad [\text{m/s}^2] \quad \dots\dots (3.3)$$

$$\text{終速度 } V_2 = V_1 + \alpha t$$

$$\text{その間の平均速度 } V_m = \frac{V_1 + V_2}{2} = V_1 + \frac{1}{2} \alpha t$$

$$\text{その間に動いた距離 } L = V_m t = V_1 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$$

(2) 運動の3法則（ニュートンの3法則）

① 運動の第1法則（慣性の法則）

すべての物体は、他より力の作用を受けなければ、運動の状態を変えない（静止している物体は静止を続け、運動している物体は等速度で直線運動を続ける）。

② 運動の第2法則

力が物体に作用している間、物体には力の方向に加速度が生じる。加速度の大きさは力に比例し、物体の質量に反比例する。すなわち、

加速度＝力／質量、力＝質量×加速度、と示される。

③ 運動の第3法則（反作用の法則）

力の作用があれば、必ず、①同じ作用線上で、②大きさが等しく、③方向が反対の力が作用する。

(3) 円運動

物体が円周上を動く場合を円運動という（図3.8参照）。物体が円運動を続けるには円の中心に向かう力、求心力を受けていなければならない。求心力の反作用が遠心力である。求心力または遠心力の大きさは、物体の質量 m と、それが円周上を動く速度 v の2乗とに比例し、円運動の半径 r に反比例する。

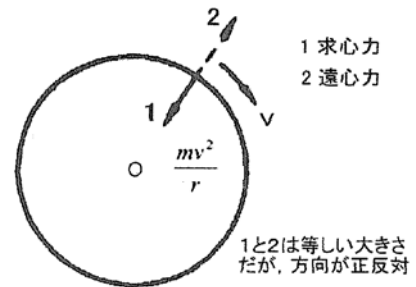


図 3.8 求心力と遠心力

(4) 回転運動

軸のまわりに自由に回転できる物体に対し、軸と直角方向に軸を通らない線上の力が加わると、物体は回転する（図3.9参照）。加えられた力と軸のところで生ずる反力とが偶力となって、 $M = F \times r$ のモーメントが作用するからである。また、軸が物体の重心を通っていないとき、物体の回転運動は重心に質量が集まっていると考え、その重心点の円運動として扱うことができる。

物体に2つ以上の力が作用しても静止しているためには、力のつり合いとともに、モーメントのつり合いが成り立つ必要がある。

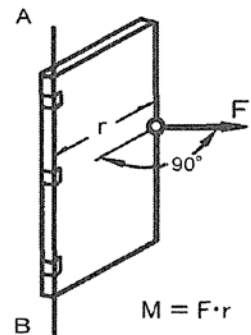


図 3.9 物体の回転運動

7 仕事と動力およびエネルギー

(1) 仕 事

力 F が作用し、質量 m の物体を距離 L だけ動かしたとき、その力のした仕事 W は次式で表される。

$$W = F L \quad [\text{力} \cdot \text{長さ} : \text{N} \cdot \text{m}, \text{kgf} \cdot \text{m} \text{ など}] \quad \cdots \cdots (3.4)$$

(2) 動 力

仕事の時間に対する割合を動力（工率）という。力 F が質量 m の物体を時間 t のあいだに距離 L だけ一定の速度で動かす（速度 $v = L/t$ ）とすると、

$$P = F L / t = F v \quad [\text{力} \cdot \text{長さ} / \text{時間}] \quad \cdots \cdots (3.5)$$

(3) エネルギー

仕事をする能力をエネルギーという。従って、仕事とエネルギーとの次元は同じである。

① 位置のエネルギー

高いところにある物体は、落下または降下によって仕事をすることができる。従ってエネルギーを持っているわけで、これを位置のエネルギーという。高さ h のところにある重量 G の物体のもつ位置のエネルギーは、次式で表わされる。

$$U = G h = m g h \quad (g \text{ は重力の加速度} : 9.8 \text{ m/s}^2) \quad \cdots \cdots (3.6)$$

② 運動エネルギー

運動している物体は、例えば、他の物体に突きあたると、それを動かすなどの仕事をする能力を持っている。すなわちエネルギーを持っているわけで、これを運動エネルギーという。速度 v で動いている質量 m の物体の運動エネルギーは、次式で表わされる。

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad \cdots \cdots (3.7)$$

速度が2倍になると、運動エネルギーは4倍になる。

③ エネルギー不滅の法則

エネルギーには、位置と運動のほか、熱、弾性体のひずみ、液体、気体の圧力、電気など、種々の形がある。これらはいろいろに形を変え、あるいは他の物体に移るが、エネルギーの出入りがない1つの範囲において総量は一定で、消滅することはない。これをエネルギー不滅の法則という。

例えば、物体が自由に落下するとき、高さが下がって位置のエネルギーが減るが、それは落下速度による運動エネルギーに変わり、この増減は等量である。

8 摩 擦

(1) 摩擦力

2つの物体が接触したまま相互にずらすためには、力を加える必要がある。これは接触面で作用する抵抗に打ち勝つためであり、この抵抗を摩擦力という。

静止している物体を動かすときに作用する摩擦を静止摩擦といい、運動中の物体に作用する摩擦を運動摩擦という。摩擦力を接触面に働く力（水平面上に置いた物体ならその重量）で除した値を、摩

摩擦係数という。摩擦係数を、水平面上の物体の場合を示した記号（図3.10参照）で表わすと、次式となる。

$$\mu = F/N, \quad F = \mu N \quad \cdots(3.8)$$

この図で、物体を滑らそうとする力が F より小さければ物体は動かない。物体がまさに動きだそうとするとき、または一定の速度で滑るときは、物体の重量 G と平面がそれを支える力 N および摩擦力 F と動きだそうとする力 K が、それぞれ釣り合った状態である。これによって接触面での摩擦係数が分かれば、次式からこの物体を動かすのに必要な力が求められる。

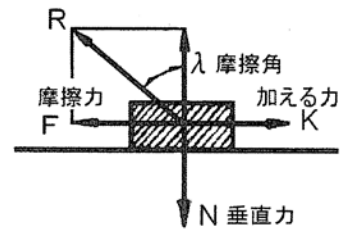


図3.10 摩擦力

$$K = F = \mu N \quad \cdots(3.9)$$

また N と F の合力 R が垂直方向（ N の方向）となす角 λ を摩擦角といい、次の関係が成り立つ。

$$\tan \lambda = F/N = \mu \quad \cdots(3.10)$$

静止している物体が動き始めるときの μ が静止摩擦係数（ μ_0 ）、一定の速度で動き続けるときの μ が運動摩擦係数〔すべり摩擦係数（ μ ）〕という。

摩擦係数は、接触面の状態により変わるので、滑りを起こさせたくないときは摩擦係数を大きく、なめらかに滑らせたいときは摩擦係数を小さくする。

(2) 摩擦の法則

摩擦の法則は、比較的表面に汚れの少ない固体摩擦（または乾燥摩擦）について経験的に得られ、油脂膜の境界摩擦（第7節「潤滑」参照）についてもほぼ成立する。

- ① 摩擦は接触面間に加えられた垂直力 N に比例し、見掛けの接触面積の大小に無関係である（静止摩擦および運動摩擦）。
- ② 摩擦はすべり速度に無関係である。
- ③ 一般に静止摩擦は運動摩擦より大きい。

(3) すべり摩擦とこがり摩擦

運動摩擦には2種類あり、2つの物体が接触して滑るときの摩擦をすべり摩擦、一方が他の物体にそって転がる時の摩擦をこがり摩擦という。こがりでも前項のような摩擦係数（ ρ ）があり、これはすべりの摩擦係数に比べて著しく小さい。この関係を、表3.7および表3.8に示す。重いものを運ぶとき、ころを敷くのはこの性質を利用したものであり、こがり軸受も同様である。

表3.7 すべり摩擦

面の種類	μ (ミュー)
木と木	0.25~0.50
木と麻縄	0.35~0.50
木と鋳鉄	0.20~0.60
金属と金属	0.15~0.20
金属と革	0.56
木と革	0.27

表3.8 こがり摩擦

車輪	平面	ρ (ロー)
硬い木	硬い木	0.05~0.08
鋳鉄	鋳鉄	0.005
軟鋼	軟鋼	0.005
焼入鋼球	鋼製軸受	0.0005~0.001

(4) その他の摩擦

摩擦は、個体と個体の間に生ずるだけではなく、固体と気体、固体と液体の間にも生ずる。パイプを通して空気や水を送るときは、この摩擦に打ち勝つ力を圧力の形で加えなければならない。

第4節 材料力学

1 内力と応力

すべての材料は、外部からの力（外力）を受けると変形し、この変形に抵抗して内部に力を生ずる（内力）。応力の次元は $L^{-1}MT^{-2}$ であり、応力の単位は $Pa(N/m^2)$ あるいは kgf/cm^2 である。

物体を横切る面を考えれば、この面上の内力と、外力とが釣合を保つ。この面上での単位面積当りの内力を応力といい、これを面に垂直な成分と面に平行な成分に分解したとき、垂直成分を垂直応力、平行な成分をせん断応力という。垂直応力は、その面を境として物体の两部分が引っ張り合っておれば引張応力、押し合っておれば圧縮応力である。例えば、棒を軸方向に引っ張ったとき、棒の内部で軸と直角な面上では、引張応力のみが生じ、せん断応力は生じない。また、材料を歪めようとする場合、力の方向と平行な面ではせん断応力のみが生じ、垂直応力は生じない。

応力は、単純な形の材料の内部では一様に分布するが、形状が複雑になると分布が一様でなくなり凹んだ隅角部には大きな応力が生ずる。これを応力集中といい、材料の破壊はこのような個所に起こる場合が多い。材料のきずも応力集中の原因になる。直径が階段的に変化する軸で、隅角部に丸みをつけて加工するのは、応力集中を避けるためである。

2 ひずみ

材料に外力が作用して変形が生じたとき、その変形の度合をひずみ（無次元の値）という。棒を軸方向に引っ張れば長さが伸び、押せば縮む。これを縦ひずみ（引張ひずみ、圧縮ひずみ）という。

断面積 A の棒における引張りによるひずみの例を、図3.11に示す。

$$\text{引張応力 } \sigma = W/A \quad \text{縦ひずみ (引張ひずみ) } \varepsilon = \lambda/l$$

$$\text{縦弾性係数 } E = \sigma/\varepsilon \quad \text{横ひずみ } \varepsilon' = -\delta/d$$

せん断力を受けた物体には、ゆがみが生ずる。その度合を、せん断ひずみという。

上下面の面積が A のブロックにおけるせん断ひずみの例を、図3.12に示す。

$$\text{せん断応力 } \tau = W/A \quad \text{せん断ひずみ } \gamma = \lambda_s/l$$

$$\text{横弾性係数 } G = \tau/\gamma$$

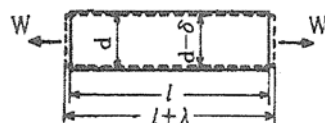


図 3.11 引張ひずみ

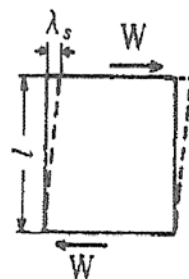


図 3.12 せん断ひずみ

3 材料の機械的性質

材料の機械的性質とは、材料が力を受けたときの変形の状況や、どれだけの力に耐えられるかという性質を総称したものである。

金属材料の棒を引っ張ったときの応力とひずみとの関係の代表的な例を、図3.13に示す。棒を引っ張れば、伸びると同時に太さが縮み断面積が小さくなるが、応力—ひずみ線図を描くときは、荷重を最初の断面積で割った値で応力を表わす。これを厳密には公称応力というが、一般に応力といえば公称応力を指す（材料の機械的性質は、第5節工業材料の表3.12～表3.15参照）。

(1) 弾 性

外力を受けると変形するが、外力を除けば元の形に戻る性質を弾性といい、そのような物体を弾性体という。固体材料は、ある限度の応力範囲では弾性体とみなすことができる。

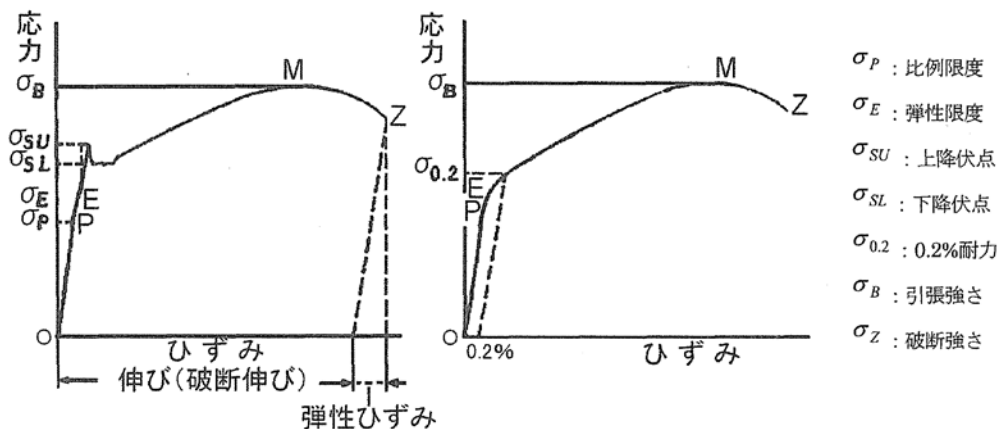
(2) 比例限度

材料に荷重をかけたとき、ある荷重までは応力とひずみは正比例する。これをフックの法則といい、この限度の応力を比例限度という（図3.13のP点）。

(3) 弾性係数

応力とひずみが正比例する範囲での垂直応力 σ とその方向の縦ひずみ ε との比 $E = \sigma / \varepsilon$ を、縦弾性係数という。せん断応力 τ とせん断ひずみ γ との比、 $G = \tau / \gamma$ を横弾性係数という。

同じ力に対して大きなひずみが起こるほど、その材料の弾性係数は小さい。



(a) 軟鋼の応力—ひずみ曲線

(b) 非鉄金属の応力—ひずみ曲線

図 3.13 応力—ひずみ曲線（模式図）

(4) 弾性限度

比例限度を超えて荷重をかけると、応力の増大に比べてひずみの増大がやや大きくなる。しかしある限度までは、荷重を除いたときひずみが完全に消える。この限度の応力を弾性限度という。（図3.

13のE点) 弾性限度を超える荷重を受けると、荷重を除いたあともひずみが残る、このような状態になった材料は機械的性質が損なわれ、その後の使用には耐えられない場合が多い。

(5) 降伏点

さらに荷重を大きくすると、応力は増さずにひずみだけが増す状態が現れる(図3.13の σ_s 部)。この現象を降伏といい、そのときの σ_s 部の応力を降伏点という。低炭素鋼や中炭素鋼では図3.13に示した関係が現れるが、合金鋼や非鉄合金では、図3.13(b)のように降伏点が現れない。そのような材料では荷重を除いたとき0.2%のひずみが残る場合の応力を耐力といい、降伏点に対応させる。

(6) 引張強さ

降伏点を超えて荷重をかけると、応力がふたたび上昇しながらひずみは急速に増し、やがて破壊が起こる。材料が破壊するまでに達する最大の応力を、引張強さという(図3.13のM点)。

応力-ひずみ線図では破壊の直前に応力が下がるが、これは、材料が切れようとするときはその個所がくびれて断面積が小さくなり、引き切るのに要する荷重が低下するからである。引張強さは材料の強さを代表するものであるが、このほかに、圧縮強さ、せん断強さなどがある。これらは荷重を静かに加えた場合(静荷重)の強さであるが、荷重が衝撃的にあるいは繰り返して加わる場合(動荷重)は、静荷重の場合よりも低い荷重で破壊する。

(7) 許容応力と安全率

材料が破壊するときの応力を破壊応力といい、引張の場合ならばそれは引張強さに等しい。構造物や機械類の設計で、その各部に生ずる応力を計算するとき、それが材料の破壊応力に近いと危険である。それゆえ、設計上の応力は、破壊応力 σ_z より小さいある限界に収まるようにするが、この限界を許容応力 σ_a という。許容応力に対する破壊応力の倍数を、安全率(S)という。

$$S = \frac{\sigma_z}{\sigma_a} \quad \dots\dots (3.11)$$

引張強さを基準にした場合、一般に用いられる安全率を、表3.9に示す。鋳鉄のように脆い材料は、交番荷重・衝撃荷重に対して安全率を大きく取る必要がある。

表 3.9 引張強さ破壊応力算定時の安全率例

材 料	静荷重	動 荷 重		
		繰返し	交番	衝撃
鋳 鉄	4	6	10	15
軟 鋼	3	5	8	12
鋳 鋼	3	5	8	15
銅および合金	5	6	9	15
木 材	7	10	15	20

4 はり

曲げ荷重を受ける棒を、はりという。はりはその支え方によって、一端を固定し他端が自由な片持ばり、両端支持のはり、両端固定のはり、一端固定で他端が支持のはり、3個所以上で支えた連続ばりなどに分けられる。

(1) はりに作用する力とモーメント

2点 R_1 、 R_2 で支えたはりに、上から荷重 W_1 と W_2 が加わったとき、これにつり合うために支点 R_1 と R_2 に上向きの反力 R_1 と R_2 が生ずる (図3.14 (a) 参照)。釣合いの関係から、次式が得られる。

$$W_1 + W_2 = R_1 + R_2 \quad \cdots (3.12)$$

また、モーメントが釣り合うために、 R_1 と R_2 点とについて、次式が成り立つ。

$$W_1 L_1 + W_2 L_2 = R_2 L \quad \cdots (3.13)$$

$$W_1 (L - L_1) + W_2 (L - L_2) = R_1 L \quad \cdots (3.14)$$

はりの長さ L と、荷重の位置および大きさ (L_1 、 L_2 、 W_1 、 W_2) が解っていれば、両支点での反力を求めることができる。

力とモーメントのつり合いは、はりの途中のどこでも成立しなければならない。

図3.14のはりで、 R_1 から x の距離にある断面を考えると、ここではりの左側について力が釣り合うために、 $F = R_1 - W_1$ の力がせん断力として作用している。また、モーメントの釣り合いのために、この断面では、次式のモーメントが作用する。

$$M = R_1 x - W_1 (x - L_1) \quad \cdots (3.15)$$

荷重を受けると、はりがたわみ曲がるのは、このようなモーメントが生ずるからで、これを曲げモーメントという。

(2) 曲げ応力

はりが上から荷重を受けて曲がると、上面 (曲りの内側) は圧縮され、下面 (曲りの外側) は引っ張られる (図3.15 参照)。これによって、それぞれ圧縮応力と引張応力が生ずる。この圧縮と引張とは、はりの上面から下面へ次第に変化しているから、その中間に変形なし (従って応力もゼロ) のところがある。これを中立面という。はりの断面が上下対称なら中立面ははり断面の高さの中央を通る。

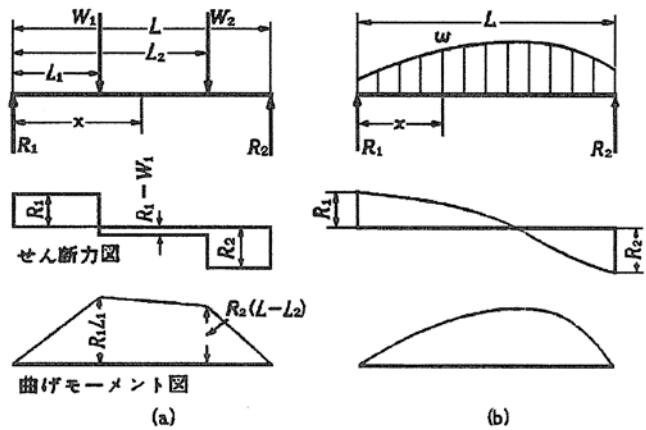


図3.14 支持ばりのせん断力図と曲げモーメント図の例

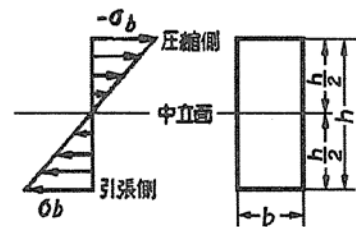


図3.15 はりせん断面の応力分布 (はりの高さ h 、幅 b)

中立面の上下で、圧縮と引張とで反対方向の応力が断面の各部分に分布して作用し、偶力を形成するから、それを合成したものが曲げモーメントとなる。

(3) はりの強さ・断面係数

図3. 15から解るように、曲げモーメントによる応力は、はりの上下面で最も大きい。この応力が材料の耐え得る限界（引張強さまたは圧縮強さ）を超えると、はりは折れる。

同じ曲げモーメントを生ずるのに、中立面から遠いところに作用する力は、近いところに作用する力よりも、効果大きい。従って、小さい力（面積当りにすれば応力）で大きな曲げモーメントをだすには、中立面から遠い部分の面積が大きいようなはり断面が有利である。はり材として最も多く用いられるH形鋼やI形鋼はその例である。

このように、曲げによって生ずる応力ははりの断面の形状に関する。曲げモーメントMと、はりの上下面に生ずる応力 σ_b （曲げ応力）との関係を

$$\sigma_b = M/Z \quad \cdots (3.16)$$

$$[\text{力}/\text{長さ}^2 = (\text{力} \times \text{長さ}) / (\text{長さ}^3)]$$

と表わすとき、このZを断面係数といい、断面形状によって決まる。

単純な断面の断面係数の例を、表3. 10に示す。Zが大きい断面のはりは、小さい場合に比べて、同じ曲げモーメントを受けたときの曲げ応力が小さい。

単純な荷重による計算例を、表3. 11に示す。

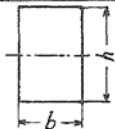
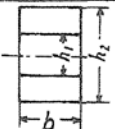
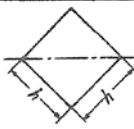
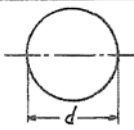
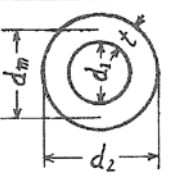
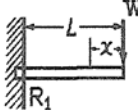
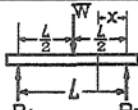
断 面	断 面 係 数 Z
	$\frac{1}{6} b h^2$
	$\frac{1}{6} \frac{b(h_2^3 - h_1^3)}{h_2}$
	$\frac{\sqrt{2}}{12} h^3$
	$\frac{\pi}{32} d^3$
	$\frac{\pi}{32} \frac{d_2^4 - d_1^4}{d_2}$ $\approx 0.8 d_m^2 t$ (肉が薄いとき)

表 3. 10 単純な断面の断面係数

表 3. 11 はりの曲げ応力計算例

梁 の 荷 重	M (Mmax)	R ₁	R ₂	F
	$M_x = Wx$ $M_{max} = WL$	$R_1 = W$		W
	$M_x = \frac{Wx}{2}$ $M_{max} = \frac{WL}{4}$	$R_1 = \frac{W}{2}$	$R_2 = \frac{W}{2}$	$\frac{W}{2}$

第5節 工業材料

1 鉄材料

金属材料のうちで、特に重要なのは鉄材料である。不純物をほとんど含まない純鉄は、磁氣的性質や鍛接性に特徴があり、それを生かす用途に用いられるが、最も用途が広いのは、炭素 (C) 1.7%まで（普通は0.8%まで）を含む炭素鋼と、1.7～6.7%（普通は2～4%）を含む鋳鉄である。

炭素鋼は、圧延、鍛造、鋳造（鋳鋼）によって機械類の素材や部品になる。鋳鉄は、もっぱら鋳造品の素材となる。

(1) 炭素鋼

炭素鋼は、不純物としてマンガン・けい素・りん・いおうなどを含む。りんといおうは鋼の性質を悪くする。圧延材・鍛造品・鋳造品として非常に広く使用される。一般構造用圧延鋼材と機械構造用炭素鋼鋼材の代表的な規格値を、おのおの表3.12および表3.13にあげる。

一般に、炭素含有率が高くなるにつれて、鋼は引張強度が増すが、一方でねばりは少なくなる。しかし、熱処理によって、鋼を強くし、ねばり強いものにすることができる。

① 低炭素鋼（軟鋼）（C 0.3% まで）

圧延・鍛造などの塑性加工がしやすく、溶接性が良いので、一般構造用圧延鋼材や、普通の引抜鋼管、ボルト・ナット、薄板、プレス製品などの材料になる。

② 中炭素鋼（C 0.3～0.6% 以上）

強さとねばりを要求される機械部品に広く用いられる。C 0.45%以上になるとねばりが少なくなるが、強さはさらに増し、また耐摩耗性を大きくすることができる。普通の鋳鋼はこの範囲に属し、切削や鍛造では作りにくい複雑な形状の部品に多く利用される。坑道支保用の鉱山用 I 形鋼の材料も、この範囲の炭素鋼である。

③ 高炭素鋼（C 0.6% 以上）

耐摩耗性が大きく、レール・車輪タイヤ・工具鋼などに使用する。

表 3.12 一般構造用圧延鋼材 JIS G 3101 (1991) の抜粋

種類	記号	化 学 成 分 %				引 張 試 験		
		C	Mn	P	S	降伏点または耐力* kgf/mm ² (N/mm ²)	引張強さ kgf/mm ² (N/mm ²)	伸 び* %
1 種	SS330	—	—	0.050 以下	0.050 以下	18以上～21以上 (175) (205)	34～44 (330～430)	21以上～30以上
2 種	SS400	—	—	〃	〃	22以上～25以上 (215) (245)	41～52 (400～510)	17以上～24以上
3 種	SS490	—	—	〃	〃	26以上～29以上 (255) (285)	50～62 (490～610)	15以上～21以上
4 種	SS540	0.30以下	1.60以下	0.040 以下	0.040 以下	40以上～41以上 (390) (400)	55以上 (540以上)	13以上～17以上

注) 記号の数字は引張強さの最小限を示している。*印: 材料また試験片の寸法によって異なる。

表 3.13 機械構造用炭素鋼鋼材；JIS G 4051（1991）の抜粋

記 号	化 学 成 分 %					標準機械的性質（参考）			
	C	Si	Mn	P	S	熱処理*	降伏点 kgf/mm ² (N/mm ²)	引張強さ kgf/mm ² (N/mm ²)	伸び %
S10C	0.08～0.13	0.15～0.35	0.30～0.60	0.030 以下	0.035 以下	N	21以上 (206)	32以上 (314)	33以上
S20C	0.18～0.23	〃	〃	〃	〃	N	25以上 (245)	41以上 (402)	28以上
S30C	0.27～0.33	〃	0.60～0.90	〃	〃	N	29以上 (284)	48以上 (471)	25以上
						H	34以上 (333)	55以上 (539)	23以上
S40C	0.37～0.43	〃	〃	〃	〃	N	33以上 (324)	55以上 (539)	22以上
						H	45以上 (441)	62以上 (608)	20以上
S50C	0.47～0.53	〃	〃	〃	〃	N	37以上 (363)	62以上 (608)	18以上
						H	55以上 (539)	75以上 (735)	15以上

注）記号の数字はC%の中間値の100倍で、10から58まで、2～3とびに規格ができています。

*Nは焼ならしの状態，Hは焼入・焼もどしの状態

（2）鋼の熱処理

鋼は、適切な加熱と急冷あるいは徐冷によって、性質をいろいろ改善できる。これを熱処理という、熱処理によって鋼の結晶組織が変化し、性質が変わる。

一般的な熱処理の方法について以下に概説する。加熱冷却には、さらに複雑な各種方法がある。

① 焼ならし

鋼は、圧延・鍛造・鑄造などの加工を受けると、そのままでは内部にひずみが残ったり、もろくなったりする。このような影響を除くため、800℃～950℃に加熱したのち空气中で放冷する処理を焼ならしという。

② 焼なまし

鋼の硬さを下げて軟化するため、800℃～900℃に加熱し、炉内で徐冷する処理をいう。

③ 焼入れ焼戻し

焼入れは、鋼を硬くし強さを増すため、800℃～900℃に加熱し、水や油に入れて急冷する処理をいう。この状態では、硬いが脆くなっているので、硬さを調節し、ねばさを増すため、150℃～200℃に加熱して空气中で放冷するか、あるいは550℃～600℃に加熱して急冷する。この処理を焼戻しという。焼入れ焼戻しはこの両方の処理で鋼の性質を改善する。

④ 表面硬化処理

鋼の機械部品では、軸や歯車などのように表面は硬くて摩耗に強いが、内部はねばり強くて大きな力に耐えることが望ましい場合もある。これに応ずるのが、表面硬化処理である。

最も普通の表面硬化処理は滲炭法である。本法では、低炭素鋼で作った部品を粉状炭素材の中に埋めて加熱し、表層だけ炭素含有率を高くしてから、適切な温度で焼入れ焼もどしをする。これにより、表層だけに焼きが入り、心は低炭素鋼のねばさを保ったものができる。

表面硬化処理には、このほか、表層に窒素を含ませる窒化法、表面だけを加熱する高周波焼入れ法などがある。

(3) 合金鋼および特殊鋼

炭素鋼に、ニッケル、クロム、マンガン、モリブデン、タングステン、バナジウムなどを加えたものを合金鋼または特殊鋼（特殊用途鋼）といい、種々の優れた性質を持っている。

強靱な鋼のニッケルクロム鋼やニッケルクロムモリブデン鋼、錆ないステンレス鋼（クロム18%とニッケル8%を含む、いわゆる18-8ステンレス鋼はその代表）、高温に耐える耐熱鋼、摩耗に特に強い高マンガン鋼（クラッシャーの歯板などに用いる）、切削加工に用いる工具鋼などがある。

(4) 鋳鉄および鋳鋼

炭素1.7~6.7%（普通は2~4%）を含む鉄を、鋳鉄という。鋼に比べもろくて弱い、溶解温度が低く、溶けると湯の流れがよく、もっぱら鋳物として複雑な形状の鋳物部品に広く用いる。

含まれる炭素の状態によって、破面が白色を呈する白鋳鉄とねずみ色を呈するねずみ鋳鉄がある。白鋳鉄は硬くて加工が難しいので、普通の鋳物はすべてねずみ鋳鉄である。鋳造のとき、急冷すると白鋳鉄になり、徐冷するとねずみ鋳鉄になる。

ねずみ鋳鉄は、圧縮強さが引張強さの3~4倍もあり、耐摩耗性が良好で、切削加工もしやすい特徴を持ち、軸受・シリンダー・ブレーキシュー・機械類のベッドなど用途が広い（表3.14参照）。ねずみ鋳鉄の鋳造過程で、溶湯にマグネシウムなどを加えて強さを増した強じん鋳鉄、合金鋳鉄としてクロムやアルミニウムを加えて酸に強くした耐食鋳鉄、鋳造のとき金型を当てて急冷し白鋳鉄化して硬くしたチルド鋳鉄、白鋳鉄を熱処理し、軟鋼に近い引張強さと伸びを持たせた可鍛鋳鉄などの高級鋳鉄もある。

鋳鋼は、炭素含有率の範囲は炭素鋼とほぼ同じであるが、規格上の規定はない。鋳造したままの状態ではひずみが残るので、一般に焼なましや焼ならしをして使う。いろいろの合金鋳鋼もあり、例えば、高マンガン鋳鋼は衝撃的な摩耗に強く、レールクロッシングや粉碎機の部品に用いる。

表 3.14 ねずみ鋳鉄品； JIS G 5501 (1991) 抜粋

種 類	記 号	供試材の鋳放し直径 mm	引 張 強 さ N/mm ² (kgf/mm ²)
3 種	FC200	13	235以上 (24以上)
		20	216以上 (22以上)
		45	167以上 (17以上)
4 種	FC250	13	275以上 (28以上)
		20	255以上 (26以上)
		45	216以上 (22以上)
5 種	FC300	20	304以上 (31以上)
		45	265以上 (27以上)
6 種	FC350	20	361以上 (37以上)
		45	314以上 (32以上)

注) 化学成分は規定しない。記号の数字は引張強さの中央値を示す。

2 非鉄金属材料

鉄以外の金属材料であり、よく用いられる重要な材料は、銅・すず・鉛・亜鉛・アルミニウムとそれらの合金である。主な材料の特性を、表3.15に示す。

(1) 銅および銅合金

① 銅

電気と熱の良導体であり、軟らかくて加工しやすく、耐食性も優れている。電線・電気機器の導体・熱交換器などに使用され、また種々の銅合金の素材となる。

② 黄銅（真ちゅう）

銅と亜鉛の合金で、亜鉛を10～40%含む。性質は銅に類似し、亜鉛の割合が多いと、引張強さが大きく高温加工に適する。適量のアルミニウム・鉄・マンガン・すずなどを加えた高力黄銅は、引張強さが普通の鋼に劣らず、船用プロペラ・歯車に使用される。

③ 青 銅

銅とすずの合金で、亜鉛・鉛・アルミニウムなどを添加したものもある。主に鋳物として利用され、耐食性と硬さが優れ、弁・コックなどに用いる。0.05～0.6%程度のりんを含むものは、りん青銅と呼ばれ、特に硬さと耐摩耗性に優れ、歯車・軸受・弁・ポンプ部品などに用いる。

(2) 軸受合金

軸受材料は摩擦係数が小で、圧縮荷重に強く、しかも軸の面とよく馴染むことが要求される。これらの条件を満足させるには、比較的軟らかい土台の中に硬い成分が微粒状に分布した組織の合金が良い。土台となる金属により、銅台・すず台・鉛台・亜鉛台などがある。

表 3.15 非鉄金属材料の強さおよび比重

材 料	弾性限界 N/mm ²	降伏点 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	比 重
スウェーデン鋼	130～160	180～260	320～390	7.85
軟 鋼	180～230	200～290	360～440	7.85
硬 鋼	270～310	290～	470～570	7.85
ばね鋼 焼入れせず	490～		780～980	7.85
焼入れ	740～		1,270～1,670	7.85
ニッケル鋼(Ni 2～3.5%)	320～	370～	550～660	7.85
鋳 鋼	200～	210～	340～690	7.85
铸铁 引張り			120～240	7.25
圧 縮			590～780	7.25
銅 鑄 造			140～210	8.60
板(焼なまし)			210～270	8.90
線 (引 抜)			340～480	8.90
黄銅 鑄 造			150～230	8.60
圧 延 (7～3)			320～590	8.60
(4～6)			340～650	8.60
青銅 鑄造 (焼なまし)			200～320	8.60
焼入れ			210～430	8.60
リン青銅 棒, 板, 線			310～460	8.70
ばね処理	540～		830	8.70
アルミニウム 鑄 造		29～69	74～120	2.60
板(焼なまし)		69～120	88～160	2.72
線 (引 抜)		88～230	170～380	2.72
ジュラルミン 焼なまし		98～130	200～250	2.80
(Al 95, Cu 3.5～4.5 熱処理		170～270	340～430	2.80
Mn, Mg など) 加 工		200～530	450～610	2.80
松 引張り			77	0.48
圧 縮	15～		27	
かしわ 引張り	47～		95	0.90
圧 縮	15～		34	

① 銅台軸受合金

銅にすず10%程度を加えた青銅（砲金），2～25%の鉛を含む鉛青銅がある。鉛青銅は，鉛が多いほど潤滑特性が優れ，高速回転用の軸受に向く。鉛が多い（30～40%程度）ものに軸受用銅・鉛合金があり，ケルメット軸受と呼ばれ高速高荷重軸受用に使用される。

② ホワイトメタル（すず台または鉛台）

すず台は，銅3～8.5%，アンチモン5～10%を含む合金で，一般にバビットメタル（JISではホワイトメタル）と呼ばれ，高荷重高速度軸受用に，最も性能の良い軸受合金の一つとされている。すず5～20%，アンチモン10～20%の鉛台のものは，衝撃・振動・高温に対する性能はやや劣るが，すず台合金に比べて安価である。

③ 亜鉛台軸受合金

亜鉛にアルミニウム・銅・マグネシウムを加えたものと、すず・アンチモンなどを加えたものがある。他の軸受合金に比べ安く、加工が容易であるが、摩擦係数は比較的大きい。

(3) アルミニウムとその合金

アルミニウムの最大の特徴は密度2.7と軽いことである。その合金とともに、近年ますます多く用いられている。

① 純アルミニウム

耐食性・加工性が良く、導電率が高いため、電線をはじめ電気機器に用いられる。強さは低いので、構造用材料には用いられない。

② アルミニウム合金

アルミニウムを主材とし、銅・マグネシウム・けい素などを加え、熱処理を施して、軽くて強いアルミニウム合金が作られている。ジュラルミンはアルミニウムと銅の合金で、さらにマグネシウムや亜鉛を加えたものは高力アルミニウム合金と呼ばれる。耐食アルミニウム合金、耐熱アルミニウム合金は、圧延材・鍛造材・引拔材・押出材にも用いる。

(4) ろう付合金

非鉄金属の合金で、金属材料の接合に用いる。母材より融点が低く、母材とよく合金となって定着することが必要である。

はんだは、ろう付合金の一種で、すずと鉛の合金（すずが20～95%）で電気機器の配線接続によく用いる。アルミニウム合金を接合するアルミニウムはんだ（すず・亜鉛・カドミウム・アルミニウムなどの合金）もある。これらは融点が低く（180～350℃）、軟ろうと呼ばれる。硬ろうの融解温度は大体500～1,000℃で、組成によって銀ろう・黄銅ろう・アルミニウムろう・洋銀ろうなどがあり、接合すべき材料によって使い分ける。

第6節 潤 滑

1 潤滑の目的

機械には軸受があり、そこには適当な潤滑剤を用いて異状なく動くように工夫されている。

潤滑の主目的は、その第1は焼けつきを防ぐこと、第2は摩耗を防ぐこと、そして第3は摩擦損失を少なくすることである。このほか、潤滑には冷却作用や密封・防錆・防塵などの作用もあるが、これも結局は上記の主目的を達成するためのものである。

第1の点は機械にとっては致命的な問題であり、第2点は機械の精度を失い、高価な機械といえどもその寿命を短くする点において重要である。第3点は、摩擦が発熱の原因となり、軸受の完全潤滑を脅かすという点で重要である。

2 潤滑の機構

(1) 完全潤滑

回転軸と軸受の関係を示す図3.16で、軸が矢の方向に回転すると、軸と軸受の表面に接触した油はその表面に強く吸着して離れず、軸受隙間の狭い方に向う。このため、粘性油膜で完全に隔てられた、いわゆる完全潤滑（粘性潤滑または流体潤滑ともいう）の状態になる。

(2) 境界潤滑

軸受において、原理上いかにそのすべり速度が遅くても、また潤滑油がいかに低粘度のもの

であっても、その流体に粘性がある以上は、必ず粘性油膜が構成され、軸と軸受との直接接触は生じないはずである。油膜が薄くなって、摩擦面に構成される分子層で数えられる程度の極めて薄い油膜を境界層（境界膜）と呼ぶ。

その性質はほとんど固体と同様で、摩擦の実験では、クーロンの摩擦法則、すなわち摩擦は荷重に比例し速度にはほぼ無関係という現象を呈する。境界層の影響が現われる程度の薄い油膜による潤滑を広く境界潤滑と呼び、また境界層における摩擦を境界摩擦と呼ぶ。

各種摩擦状態のモデルを、図3.17に示す。

実際の軸受では、完全潤滑と思われるものでも、完全潤滑あるいは境界潤滑、乾燥摩擦部分が、常に摩擦面に混在している（図3.18参照）。これらの量的な差異が、摩擦の大小や、軸受温度の高低となって現われる。

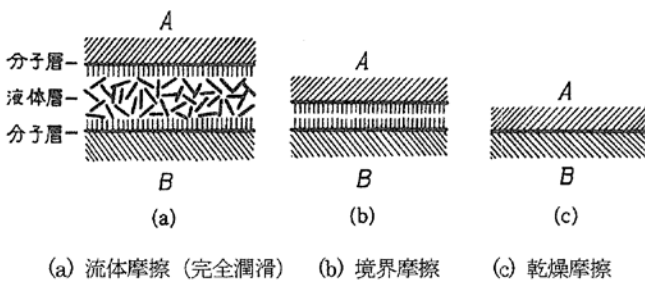


図3.17 幾何学平面における各種摩擦状態のモデル表示

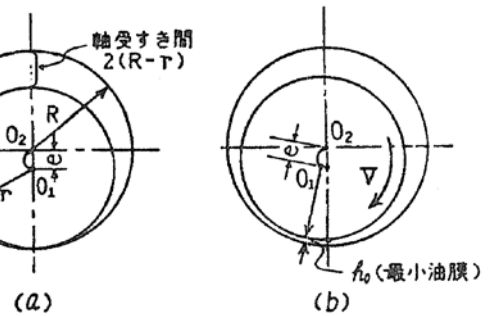


図 3.16 軸と軸受の関係位置

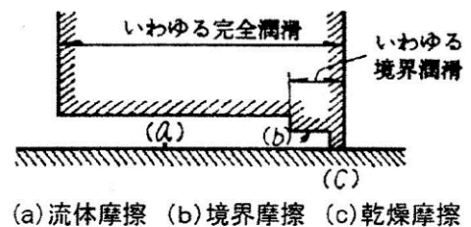


図 3.18 普通の摩擦面における潤滑状態のモデル標示

(3) 軸受の焼けつき

軸受が完全潤滑の状態で発生する熱は潤滑油の内部摩擦によるもので、この熱は潤滑油で運び去られるため特に問題ない。しかし、境界摩擦の状態では、熱を運び去るだけの油の流れがないため、摩擦熱はすべて摩擦面に入り、軸受の温度を支配する。軸受の焼けつきの示度は、PV値（ P =単位面積

当りの軸受荷重 $[\text{kg}/\text{cm}^2]$, V =すべり速度 $[\text{m}/\text{s}]$) である。

軸受の焼けつき現象は、荷重（圧力）それ自体による直接的な油膜の剥離や破断に起因するものでなく、荷重の増加による摩擦熱の増加から、面の温度が上昇し、その結果油膜が熱的に破断し、ついに焼けつきに至るものと考えられる。

潤滑剤の劣化速度は、温度 10°C 上昇するごとに倍加するので、適当な粘度の油を選定することが重要である。

(4) 限界 $d n$ 値

ころがり軸受の潤滑上の使用限界は、限界 $d n$ 値 (d =軸受内径) $[\text{mm}]$, n =回転数 rpm) でほぼ規定できる (表3.16参照)。

表 3.16 ころがり軸受の限界 $d n$ (内径 \times 回転数)

軸受の形式	グリース 潤 滑	油 潤 滑		
		油 浴	滴下・霧状	強 制
単列ラジアル玉軸受	180,000	300,000	400,000	600,000
自動調心型玉軸受	140,000	250,000	400,000	
アングュラ型軸受	180,000	300,000	400,000	600,000
円筒ころ軸受	150,000	300,000	400,000	600,000
円すいころ軸受	120,000	200,000	230,000	300,000
球面ころ軸受	100,000	150,000		250,000
スラスト玉軸受	60,000	90,000	180,000	225,000

すべり軸受では、 $\mu P V$ 値 (μ =摩擦係数) が発熱量を表わす因子となるのに対し、ころがり軸受では、すべり速度すなわち周速に比例する $d n$ (すべり速度を意味する) だけで表わすことができる。

3 潤滑剤の種類

現在、一般に使われている潤滑剤は、潤滑油、グリースおよび固体潤滑剤である。

近時、各種機械の速度・荷重・出力はますます増大し、かつ精度の向上と機械寿命の延長とが要求されている。このため、潤滑剤にはいろいろな添加剤が加えられ、その種類も多い。

(1) 潤滑油

通常、潤滑剤といえば石油系潤滑油を指すが、その主なものを、表3.17に示す。

表 3.17 潤滑油の種別および主な用途

種 別		主 な 用 途
ダイナモ油		電動機・発電機等高速回転軸受潤滑
マシン油		一般機械軸受、鉄道車軸
陸用内燃機関潤滑油		自動車などの内燃機械、小型空気圧縮機の潤滑、高荷重軸受
シリンダー油		飽和・加熱蒸気機関シリンダー潤滑
ギア油	自動車用	ハイポイドギア用
	工業用	一般機械の軽荷重・重荷重歯車用

(2) グリース

グリースは液状潤滑剤と増ちょう（稠）剤からなり、半固体状または固体状の潤滑剤である。

グリースの種類と特性および主な用途などを、表3.18にあげる。

グリースの硬さをちょう度によって分類し、使用上の目安とする。グリースには、室温でも流動性を示すちょう度0号のものから、ブロック状固形に近いちょう度6号に相当するものまでである(表3.19参照)。グリースのちょう度は、回転速度が大きい(d n 値が大きい)ほど、②荷重が小さいほど、③温度が低いほど、ちょう度番号0の方向の軟らかいものが適当である。

表 3.18 グリースの種類と特性および主な用途

種 類 項 目	カップグリース (カルシウム グリース)	ナトリウム グリース (ファイバー)	リチウム グリース	バリウム グリース	アルミニウム グリース (モ ビルグリース)
石 け ん 基	石灰石けん	ソーダ石けん	リチウム 石けん	バリウム 石けん	Al石けん
外 観	バター状	短繊維～ バター状	短繊維～ バター状	短繊維～ バター状	流 動 状
滴点 (最高) ℃	95 程 度	150～180程度	180～200程度	150～180程度	85 程 度
使用温度限界 (最低～最高) ℃	－10～70位	－15～100位	－25～130位	－10～130位	－10～70位
120℃に加熱し た後自然冷却	油と石けんが 分離する	変わらない	変わらない	変わらない	液 化
油 膜 強 度	小	中, 大	中	中	大
機械的安定性	良～やや良	良～優	良～優	良～ (不可)	良～ (不可)
耐 水 性	良	(良) ～不良	良	良	良
主な用途	一般機械の軽 ～中荷重で低・ 中速のところが り軸受および すべり軸受に 用いる	一般機械の中 荷重の各種軸 受に用途があ る (耐水性に は要注意)	万能グリース といわれ、各 種の軸受に用 いられる	万能グリース でもつばら自 動車用に供さ れている	自動車シャーシ 用に、また開放 歯車にも用途 がある (粘着 性大)

注) 製品によっては () 内のものがある。

ファイバークリースも高粘度を基油としたものは耐水性を示す。

表 3.19 グリースの使用条件とちょう度の選定

NLGI ちょう度 番号	0	1	2	3	4	5	6
ASTM ちょう度	355～385	310～340	265～295	220～250	175～205	130～160	85～115
給油 方法	刷毛ぬり	グリースカップ プレッシャーガン 集中潤滑	同 左	グリースカップ プレッシャーガン	同 左	グリースカップ 手ぬり	固形のま ま供給
使用 条件	d n 値	大					小
	荷重	小					大
	温度	低					高

(3) 固体潤滑剤

固体潤滑剤としては、グラファイトが古くから使用されていたが、近年になって二硫化モリブデン、酸化鉛、PTFE（ポリテトラフルオロエチレン）などが急速に発展してきた。これは原子力産業、塑性加工、ガスタービン、ジェットエンジンなど、石油系油はもとより、合成潤滑油でも困難な高温、低温、その他苛酷な用途に対する要求が強くなったためである。

二硫化モリブデンはせん断されやすい層状構造を持っているため、潤滑作用があり、粉末の状態、潤滑油やグリースに懸濁させた状態、さらにはビニール系、エポキシ系などの合成樹脂粘結剤として摩擦面に塗布した状態で使用され、潤滑油では得られない有効な焼付防止または摩耗防止効果が得られている。

第7節 機械の要素

1 溶 接

溶接法は融接法、圧接法およびろう付法の3つに大別される。融接法は金属をその熔融温度以上に加熱して、母材同士または外部から供給された熔融金属と融合凝固させる方法である。圧接法は金属を熔融に近い状態において、機械的打撃または圧力を加えて圧着する。

溶接法の種類にはガス溶接、電気溶接法、溶射、テルミット溶接法、ろう付など多くの方法があるが、そのうちガス溶接と電気溶接が工業上最も多く用いられる。

1) ガス溶接

ガス溶接には、酸素に混合して使用するガスの種類によって、酸素水素溶接、酸素アセチレン溶接、酸素ベンジン溶接などがあるが、酸素アセチレン溶接が一般的である。

酸素アセチレン溶接は、約3mm以下の薄鋼板の溶接や一部の特殊鋼鉄および銅合金などの非鉄金属溶接など広範な分野で使用される。溶接方法は、吹管と呼ばれる器具でアセチレンガスと酸素を混合し、その高温により、溶接する材料を加熱熔融し、溶接棒を用いて接合する。なお、アセチレンガスの圧力により高圧・中圧・低圧の3種に分けられ、低圧吹管が最も多く用いられている。

2) 電気溶接の種類

電気溶接には、電流の抵抗によって生ずる熱を利用する方法と、電弧の高温を利用する方法がある。

抵抗式電気溶接法 金属と金属との接触面に低圧の大量の電流を通ず

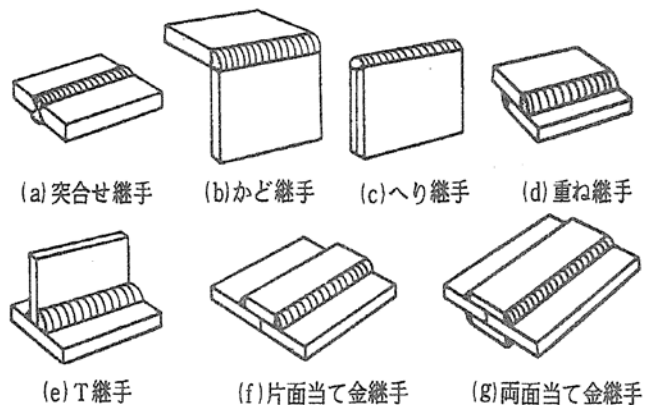


図 3.19 溶接継手の種類

ると、接触面は電気抵抗により局部的に温度が上昇する。このとき両金属を押圧すれば溶接部を溶融させ、あるいは溶融することなく接合することができる。スポット溶接などがこの方式である。

電弧（アーク）溶接法 回路の途中で溶接すべき金属を陽極（+）に、陰極（-）に溶接棒を結び、両者が触れようとするとき発生するアークにより溶接する方法である。鋼板や形鋼の溶接分野においては、ガス溶接に比較し、継手の機械的性質および溶接速度その他の点で優れているため、圧力容器、構造物、船舶などに用いる。約1.6mm以上であれば肉厚に制限はない。溶接棒の種類が継手強度を左右するので、その選択には注意を要する。

3) 溶接継手の種類

溶接部で結合した継手の基本形式は、(a)突合せ継手、(b)かど継手、(c)へり継手、(d)重ね継手、(e)T継手、(f)片面当て金継手、(g)両面当て金継手の7種である(図3.19参照)。

2 歯 車

一軸から他の軸に動力を伝達する方法の1つに、摩擦伝動がある。これは、2つの車を互いに押し付けて、その接触部に生ずるすべり摩擦の抵抗力を利用する。摩擦伝動車は、接触面に生ずるすべりによって、少し大きな動力は確実に伝えることができない。歯車はこの欠点を除き、確実な伝動を得るために伝動車の周囲（歯車ではピッチ円という）に歯形を付けたもので（図3.20参照）、次のような特徴がある。

- ① 回転を確実に伝達できる。ただし2軸間の距離が比較的短いときに用いる。
- ② 歯車の歯数を変えることによって、回転比を容易に変えられ、その回転比は終始一定である。
- ③ 耐久度が大きい。
- ④ 噛み合う歯車の2軸が平行でなくても、回転を確実に伝達できる。かさ歯車、ねじ歯車、ウォームとウォームギアなどの他、伝動装置や変速装置に広く用いられる。

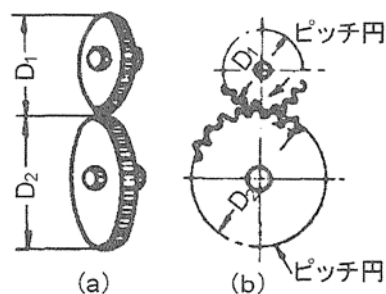


図 3.20 歯車の原理

(1) 歯車の種類

歯車には、その形状と噛み合う歯車軸の関係によって、次のような種類がある。

① 平歯車（スパーギア）

円周面上に軸と平行な直線歯を刻んだものである(図3.21(a)参照)。

② はすば歯車（斜歯歯車：ヘリカルギア）

平歯車の歯を円筒面のつる巻線に沿って刻んだものである(図3.21(b)参照)。この歯車の歯は、軸線に対して斜めに刻まれている。この歯車で動力を伝達する場合の2軸の関係は平歯車と同様であるが、平歯車で伝動をなめらかにし、騒音を防ぐには、同時に噛み合う歯数を増すため、多数の小歯にする。ただし、歯の強度は減少する。

はすば歯車は同時に噛み合う歯数を増して、がた付きの傾向を軽減できるので、高速度回転に耐え得る。しかし、歯が振じれているため、回転を伝えるときに軸方向に推力を生じるため、軸受の構造が面倒になる。これを防ぐには、振れ方向が反対の、相等しい傾斜を付けた2個のはすば歯車を合わせた構造にする（図3. 21 (c) 参照）。これをやまば歯車（複はすば歯車）という。

③ かさ（傘）歯車

円すい面上に放射状に歯を備えた歯車で、ちょうど傘を広げたような形状をしている。かさ歯車は回転を伝える軸と、伝えられる軸が平行ではなく、ある角度（普通は 90° が多い）を持つ場合の動力伝達に使用する（図3. 21 (f), (g), (h) 参照）。

④ ねじ歯車

はすば歯車と同形であるが、噛み合いの状態は図3. 21 (i) に示すようになる。すなわち、はすば歯車と違う点は、噛み合う歯車の両軸が互いにある角度を作っている点で、この角度の相違によって歯形の振れも変わってくるが、実際には 90° の場合が多い。

⑤ ウォームとウォームギア

相互に直角に交わらない一種のねじ歯車である（図3. 21 (j), (k) 参照）。ウォームは台形ねじ状をし、普通のねじと同様に2条・3条などに切られる場合がある。これと噛み合う歯数の多い大歯車が、ウォームギアである。動力は必ずウォームからウォームギアへのみ伝える。この特徴から、ウォームとウォームギアは減速比の大きい減速装置に使用される。

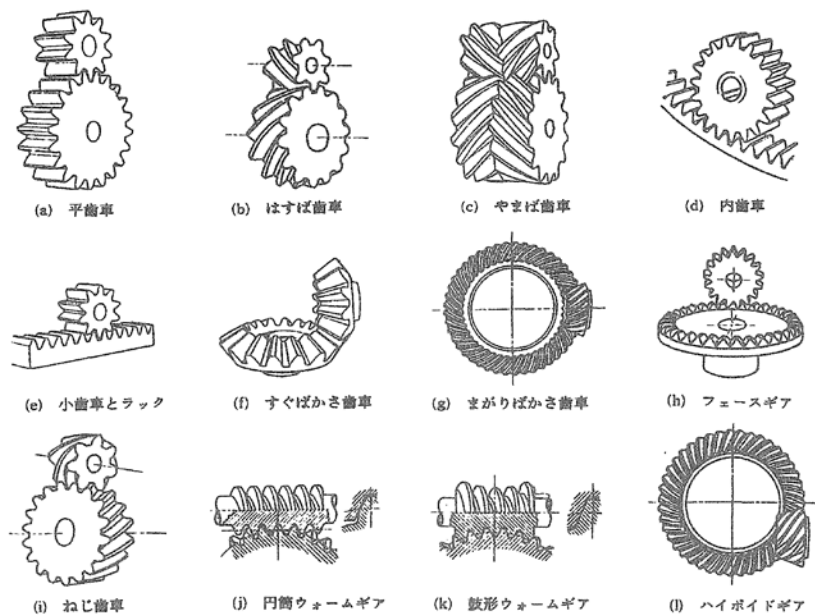


図 3. 21 歯車の種類

(2) 歯車の回転比

歯車の回転比は、噛み合う各歯車の直径に反比例する。噛み合う一對の歯車において、Aが原動車、Zが従動車を示し、 d ：ピッチ円直径、 i ：回転比、 z ：歯数、 n ：回転数（rpm）とすれば、次式が成立する。

$$\text{平歯車} \quad i = \frac{n_z}{n_A} = \frac{d_A}{d_z} = \frac{Z_A}{Z_z} \quad \cdots \quad \text{1段掛歯車装置} \quad \cdots \cdots (3.17)$$

$$\text{平歯車} \quad i = \frac{n_z}{n_A} = \text{各原動車の歯数の積} / \text{各従動車の歯数の積} \quad \cdots \quad \text{2段掛歯車装置} \quad \cdots \cdots (3.18)$$

なお、A歯車とZ歯車の回転方向は、中間軸数が0または偶数のときは反対方向、奇数のときは同方向である。かさ歯車の回転比は、次式のとおりである。

$$i = \frac{n_a}{n_b} = \frac{d_b}{d_a} = \frac{z_b}{z_a} \quad \cdots \cdots (3.19)$$

ただし n_a 、 n_b ：大・小歯車の回転数、 d_a 、 d_b ：大・小歯車のピッチ円の直径、 z_a 、 z_b ：大・小歯車の歯数。

各種歯車の回転比の限界を、表 3.20 に示す。

表 3.20 各種歯車の回転比の限界

速 度 別	平歯車	かさ歯車	やまば歯車	ウォームと ウォームギア
低 速 度	1 : 7	1 : 5	1 : 15	1 : 20
高 速 度	1 : 5	1 : 3	1 : 10	1 : 10

3 軸 受

荷重を受けながら回転する軸を支持する機械部品を軸受、軸が軸受で支持される部分をジャーナルという。ジャーナルと軸受との間で動力の損失を伴う摩擦を生ずるので、軸受においては特に減摩方法および十分な強さを持つことを考慮する必要がある。

軸受は、荷重の作用状態と接触状態から、すべり軸受ところがり軸受に分類することができる。

(1) すべり軸受

1) すべり軸受の種類

軸と軸受が滑り接触をするものであり、ジャーナル軸受（横軸受）とスラスト軸受がある。前者は、荷重が軸心に直角にかかる軸に対して使用し、後者は、立軸受とつば軸受があり、軸心と平行に荷重が掛かる軸に対して使用する（図 3.22 参照）。

回転する軸を支えるジャーナル軸受の簡単なものは、図 3.22A のように軸受だけを別にして、ボルトにより適当な所に取付ける。

容易であるから、受金としての適性は高い。しかし、それ自身は強度が低いので青銅・铸铁または铸鋼の受金の裏張りとして使用することが多い。また、過熱して溶けて流れ出しても軸を損傷しない。従って $p=6\sim 9\text{MPa}$ が許容される。

② 受金の形状

軸受に受金を用いるのは摩擦を少なくし、摩耗した場合に取替えられるからである。簡単な受金には、一体の円筒形に作り、軸受本体に固定するものがある。ただし、製作費は安いがまったく調整が利かないので、普通、受金は分割する。

青銅製受金を、図3.23に示す。受金の油

みぞはジャーナルの回転速度が遅い場合には、その合わせ目の角を削り落とし、この落とし角が油みぞ内の油のまわりをよくするための油道となるようにする。油みぞの切り方は、一般に図に示すものが用いられている。

ホワイトメタルの裏張りを施す場合には、受金にみぞを掘って突起を作り、軸と同等の棒を受金の間に入れ、その隙間に溶けたホワイトメタルを流し込む(図3.24参照)。

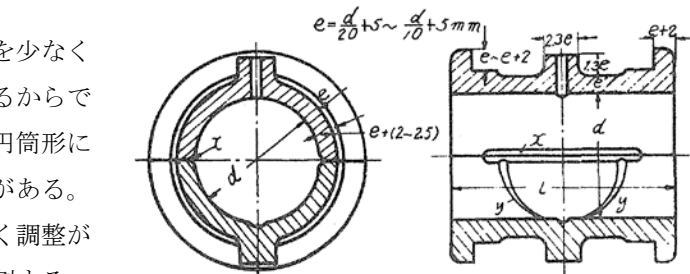


図 3.23 青銅製軸受金の例

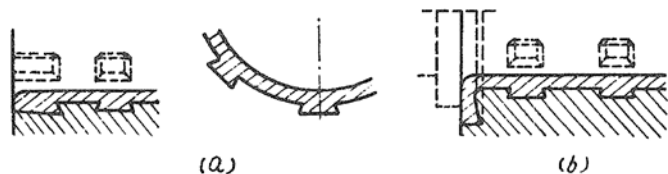


図 3.24 ホワイトメタルの裏張り

3) スラスト軸受

① 立軸受 (ピボット軸受)

垂直軸の底部を支持する軸受でジャーナルが軸端にあつて、縦推力に抵抗させるもので、外力は軸の中心線と同じ方向に作用する。立軸受の下端は、平または皿形に作り、青銅または鋼製の円盤で受ける。立軸受の一例を、図3.25に示す。

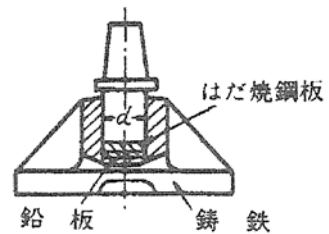


図 3.25 簡単な立軸受の例

(2) ころがり軸受

軸と軸受の間に、玉あるいはころを入れて、ころがり接触としたもの。前者を玉軸受、後者をころ軸受という。面で接触するすべり軸受に比べ、摩擦はほとんどなく、大部分が回転摩擦で、摩擦仕事はすべり軸受の約

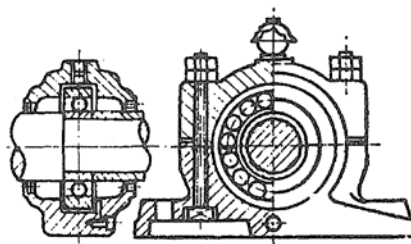


図 3.26 スラスト玉軸受の例

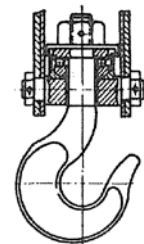


図 3.27 スラスト玉軸受の使用例

15%にすぎない。そのため、機械の効率は著しく高い。

ころがり軸受では、内輪（内レース）を軸に、外輪（外レース）を軸受に固定すれば、ころがり接触により、転動体が軸の荷重を支持する。この場合、転動体が互いに触れて、ころび出るのを防ぐために、保持器（ケージ）を用いる。ころがり軸受は、ラジアル軸受（軸線に直角な荷重を受ける）とスラスト軸受（荷重を軸方向に受ける）に分類できる（図3.26、図3.27参照）。

(3) 軸受に対する注意

- a) 軸受は常に手で触り、普通運転状態時の温度を確認しておき、温度の異状上昇時に備える。
- b) 重要機械の軸受には温度計を取付け、その温度を正確に検視する。
- c) 給油の状態に注意し常に適量とする。オイルリング式ではリングの回転状態に特に注意する。
- d) 潤滑油は軸受の種類または使用個所によって適度に入れ替える。
- e) 軸受は、はなはだしく摩耗する前に、修理するか取り替える。
- f) 軸受取り付け各部を調べ、緩んでいる個所は増し締めをする。
- g) 軸受振動の有無を検査し、振動の激しいものは原因を追究し、取付け方法などを変更する。

4 ベルトとチェーン伝動

(1) 平ベルト伝動

2個のベルト車へ帯状のベルトを巻掛けて、ベルト車とベルトとの間の摩擦によって動力を伝える装置である（図3.28参照）。2軸間の距離が大きく、若干のすべりが許容できる場合に用いる。最近では、OA機器や自動化機器などの精密回転伝達用にも用いられている。

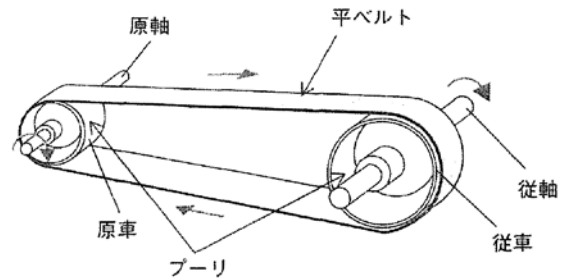


図 3.28 平ベルト伝動

① ベルトの掛け方と速度

ベルトの掛け方には、2軸を同方向へ回転させるオープン（けさ掛け）、2軸を反対方向へ回転させるクロス（たすき掛け）の2方式がある（図3.29参照）。ベルトの速度があまり速いと波動や脱落が起こりやすいので、速度は約20m/sとされる。

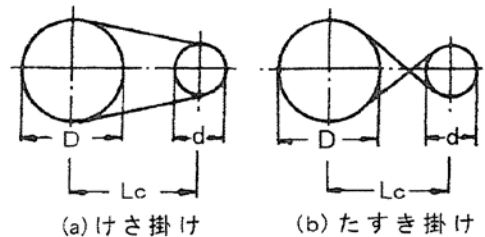


図 3.29 ベルト車の軸間距離

② ベルト

ベルトの材料は旧来、皮・木綿・ゴムなどで、牛皮をなめして2~3枚重ねたもの、木綿（ベルトの強さ35~51MPa）にゴムを浸み込ませたゴムベルトなどを使用された。近年は、合成繊維やプラスチックの利用が進んでいる。

③ ベルトとベルト車に関する原理的な計算例

a) ベルト掛け軸の回転比と直径

ベルト車とベルト間の摩擦が十分で滑りがないと仮定すれば、両車の円周速度は等しい。図3.29で、 D ：原動ベルト車の直径〔mm〕， N ：原動ベルト車の毎分回転数， d ：従動ベルト車の直径〔mm〕， n ：従動ベルト車の毎分回転数， t ：ベルトの厚さ〔mm〕とすれば、次式となる。

$$\text{1 段変速の回転比} \quad i = \frac{n}{N} = \frac{D}{d} \quad \cdots \cdots (3.20)$$

ただし、ベルトの厚さを考慮し、またすべりを3%とすれば、次式となる。

$$i = \frac{n}{N} = \frac{0.97(D+t)}{(d+t)} \quad \cdots \cdots (3.21)$$

すべりが3%を超えると、摩擦熱のためベルトが損傷する恐れがある。普通、ベルト車の回転比 N_2/N_1 は1：6以下とし、それ以上の場合は2段または3段にベルトを掛ける。

b) ベルトの長ささとベルト車の軸間距離

ベルトの長さを求める実用式には次式を用いる。

$$L \cong \frac{1}{2}\pi(D+d) + 2L_c + \frac{(D-d)^2}{4L_c} \quad \cdots \cdots (3.22)$$

・・・けさ掛け（オープン）

$$L \cong \frac{1}{2}\pi(D+d) + 2L_c + \frac{(D+d)^2}{4L_c} \quad \cdots \cdots (3.23)$$

・・・たすき掛け（クロス）

ただし、 L ：ベルトの長さ〔mm〕， L_c ：軸間距離〔mm〕とする。普通 L_c は10m以内とし、けさ掛けでは大ベルト車の直径 D の4倍以上、たすき掛けではベルト幅の20倍以上とする。

(2) Vベルト伝動

Vベルトは、台形断面のロープを、V形みぞのある平行2軸間のVベルト車上にかけて使用する（図3.30および表3.22参照）。

平ベルトに比べ、次のような特徴がある。

- ① 比較的小さな張力で大きな力を伝動できる。
- ② 衝撃が少なく、回転が静かである。

ベルト速度は、15m/sくらいが最もよい。あまり高速度には適さず、約22m/sで最大伝達馬力となる。回転比は7～10まで取れる。

(3) チェーン伝動

チェーンを鎖歯車にかけて動力を伝達する装置を鎖伝動装置という。チェーンは長さを伸縮できる特徴があり、ベルトに

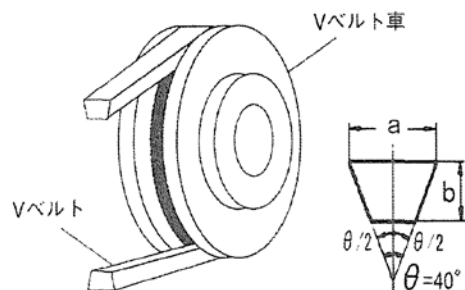


図 3.30 Vベルト伝動

表 3.22 Vベルトの種類と寸法（mm）

形 別	a	b
M	10.0	5.5
A	12.5	9.0
B	16.5	11.0
C	22.0	14.0
D	31.5	19.0
E	38.0	25.5

比べて伸びやすべり損失が少なく寿命も長い。チェーン伝動は、その用途から伝動用、荷あげ用、運搬用の3種に区別できる。伝動用にはローラーチェーンが一般に使用されている。ローラーチェーンの使用速度は、 5m/s 以下（ $2\sim 3\text{m/s}$ が最も具合がよい）で、最大約 7m/s である。

軸間隔が少なく、しかも歯車が使用困難な場合の伝動用にも用いられる。

5 滑 車

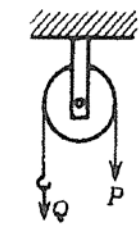
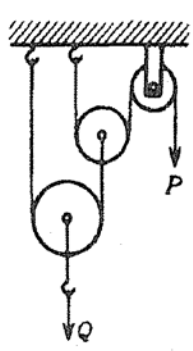
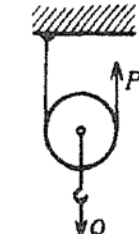
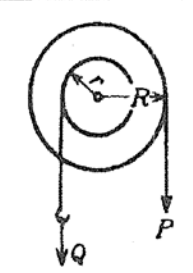
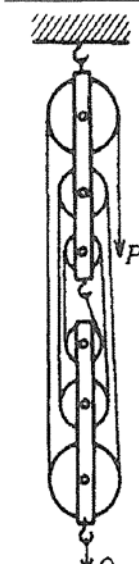
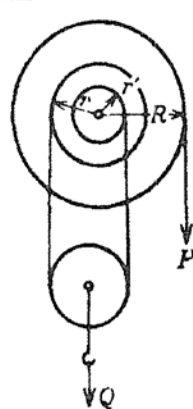
滑車は、ロープによる力の伝達の変換方向を変え、また力の伝達の倍率を変えるのに、広く利用される。その例を、表 3.23 に示す。揚力比は、ロープの一端に加えた力 P に対するロープの他端または滑車に吊るした荷重 Q の倍率である。ロープに加えた力は、摩擦を無視すればロープの全長に同じ大きさで伝わるので、力またはモーメントのつり合いの関係から、揚力比を知ることができる。

滑車を通したロープの端を引くと、荷重が引き上げられる。その動きは、ロープを引いた動きを、揚力比で割った値になる。これは、エネルギーと仕事の関係から理解できる。

例えば表 3.23 の動滑車で、ロープの端を力 P で長さ a だけ引っ張ると、荷重 Q は $a/2$ だけ引き上げられる。そして、 $Q = 2P$ であるから、ロープを引っ張る仕事 $Pa =$ 荷重を引き上げる仕事 $Q \cdot a/2 = 2P \cdot a/2 = Pa$ という関係になっている。この仕事は、荷重の位置のエネルギーを $Q \cdot a/2 = Pa$ だけ増すことに費やされる。

このように滑車を用いれば、小さな力で、動きは小さくなるが大きな力を発揮できる。

表 3.23 滑車の揚力比

構 造	名 称 揚力比 Q/P	構 造	名 称 揚力比 Q/P
	定滑車 1		ろくろ 滑車数 n 個 $2n-1$
	動滑車 2		段滑車 R/r
	ろくろ 滑車数 $2n$ 個 $2n$		差動滑車 $\frac{2R}{r-r'}$

第8節 設備保全

1 設備保全の意義

一般に、製造企業活動の究極的な狙いは、設備を使って生産活動を行い利益を得ることにあるのは論を待たない。そのため、生産活動においては、「故障ゼロ、不良ゼロ、災害ゼロの3つのゼロ達成」が狙いになる。今や災害ゼロは目標化され現実的なものになっており、故障ゼロも決して不可能なことではない。

この故障ゼロを達成するには、重複小集団活動を含む全員参加による生産活動を通じて「人と設備の体質改善による企業の体質改善」を果たす必要がある。因みに、人の問題は、「私生産する（作る）人、あなた直す人」といった分業の思想から来る無関心さ、「壊れたら後で直せばよい」といった事後保全の考え方などが挙げられる。

また、設備の問題では、設計・製作の悪さや手入れ不足から来る故障・不良の多発による設備総合効率の劣悪さなどが挙げられる。

鉱山保安における災害ゼロへの体質改善・実践と共通する部分も多い。設備の一生は、その設備が工場・鉱山内に導入され据付試運転を行ったときに始まり、劣化によって経済的にその役を果たし得なくなり、置換されたときに終る。このような設備の一生を世話するのが設備管理である。

この設備管理の業務を大別すると、①設備の新設、②修理（収益力の復帰）、③改造（保全上からする収益力の増加）、④更新（老朽化に基く更新）になる。

設備は使用してはじめて企業・使用者に利益をもたらす。一般に設備は使用しなくても費用がかかる。操業度の低い設備は、収益よりも費用の方が大きく、かえって損失をもたらすことになる。しかし一方操業度を高めれば、設備の劣化が早くなり、これをくい止めようとする努力が設備保全（以下単に保全という場合がある）といわれるものである。

保全により故障ゼロを達成しようとするときの基本のひとつに、「故障する前にその前兆を予知して事前整備で故障の未然防止を図っていこう」とする予防保全（PM：Preventive Maintenance）がある。この狭義のPMをより具体的には、「強制劣化をなくし、自然劣化の状態にししながら劣化の状態を測定し、それがある程度以上になれば復元することを徹底する」と表現することができ、この実践が肝要である。

2 PMの意味と保全方式

1950年代にアメリカから初めてPM（予防保全）が導入され、以来、PM（予防保全）→TBM（定期保全）→CBM（予知保全）と変遷してきている。現在の主流はCBMといわれているが、必ずしもすべてがCBMではなく、各方式を使い分けている。

4つの保全方式に加えて、PMをさらに3つに分けて、合わせて6つ手段がある。これら手段とその特徴は次のとおりである。

(1) 予防保全：PM (Preventive Maintenance)

設備の予防医学ともいえる。

設備の健康状態を維持し、病
気(故障)にならないように、
劣化防止のための日常保全。
定期検査。設備診断。劣化回
復のための整備を行う。やり
方により次の3つに分類され
る。

1) 定期保全：TBM

(TimeBased
Maintenance)

その設備の劣化にもっとも
比例するパラメーター(生産
台数, トン数, 使用日数など)
で修理周期を決め, 周期まで
使用したら無条件で修理を行
う。

長所：点検などの保全工数
がかからない。故障も少ない。

短所：オーバーメンテナン
スとなり, 修理費が大きくな
る。

2) 予知保全：CBM

(Condition Based
Maintenance)

設備の劣化状態を, 各測定
データとその解析によって定
常または定期的に把握し, 劣
化を示す値があらかじめ定めた劣化基準値に達したら修理を行う。

長所：TBMの短所であるオーバーメンテナンスを防止できる。

短所：設備診断や監視システムのためのコストがかかる。

PM(予防保全)のうち主要な手段である定期保全と予知保全について, 図3.31に図示する。

3) オーバーホール：IR (Inspection and Repair)

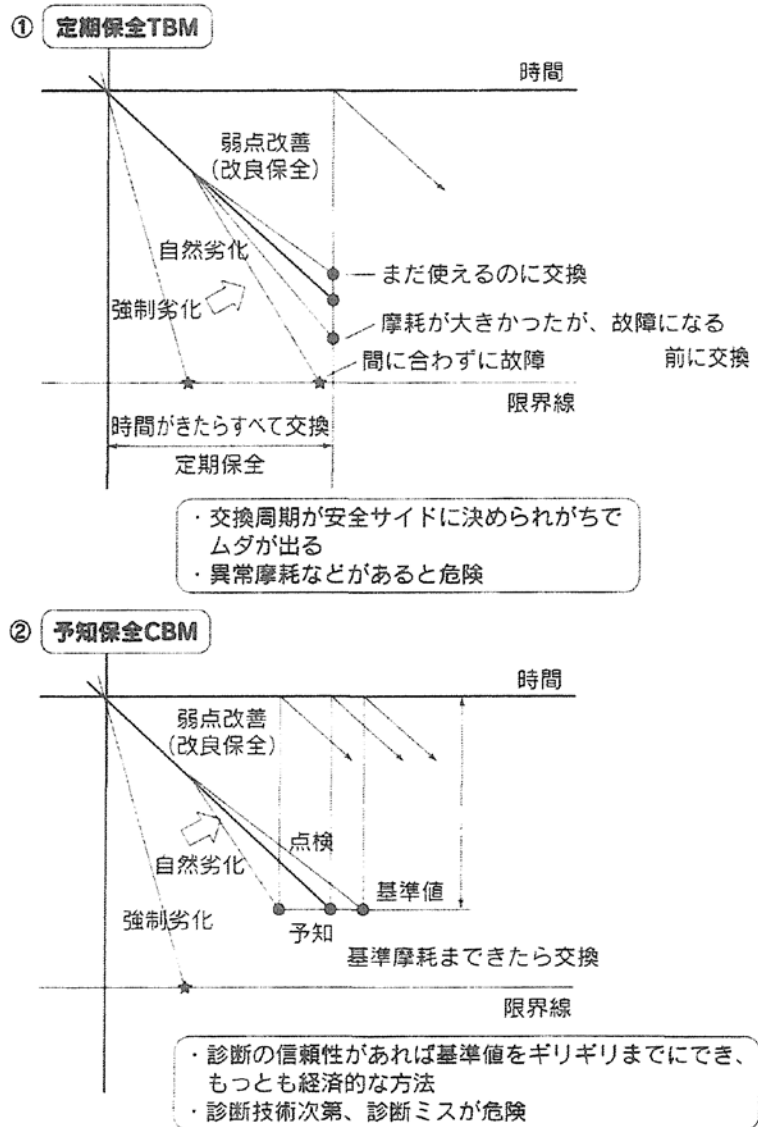


表 3.31 PMと定期保全・予知保全

設備を定期的に分解・点検し、その時点で良否を判断して不良のものは取り替える。主要生産設備などで比較的広く実践されている手段である。

長所・短所：CBMとTBMの中間的性格を持つ。生産調整や予備機が必要になる。

(2) 事後保全：BM

(Breakdown Maintenance)

点検・定期交換をまったくやらず、設備が故障（機能停止）してから復旧工事をやる。原則的には、事前に予測できるものを対象にする。

長所：寿命まで使うことになるので、二次故障がなければ最も経済的である。

短所：設備が多くなると故障が多くなり、生産に支障をきたす。

(3) 改良保全：CM

(Corrective Maintenance)

設備の保全性・信頼性を向上させるための改善，故障の再発防止，寿命延長，保全時間短縮，生産性向上のための改良など広範囲の設備改善を含む。

(4) 保全予防：MP (Maintenance Prevention)

保全性・自主保全性などを新しい設備づくりに反映させる活動である。特に、改良保全情報が良質である。また新設に限らず、設備改造の機会もチャンスととらえて実践する。

オリジナルのPMの概念では、S（セーフティー）、M（モラル）を高めるには、従業員の利益を増すと同時に、設備能力を高めて生産の損失を減らし生産の収入を増して企業の利益を増すことが大切である、とされている。

同時に、これらはいずれも、P（プロダクティビティ）、Q（クオリティ）、C（コスト）、D（デリバリー）の問題である。生産を増して売上を増やすか、設備や人員を少なくする；もっと高く売れるもの、もっと多く売れるものを作る；不良品を減らし歩留や原単位を下げる；生産速度を安定させて仕掛品を減らし、納期遅れをなくす；などがこれである。これらはすべて保全費用と合わせて考えなければならない。

さらに、設備各部の寿命を延ばすことによって故障頻度を少なくする、適切な材料を選び単位使用時間当りの保全材料費を下げる、能率向上によって労務費を少なくする、貢献度を考慮しながら経費

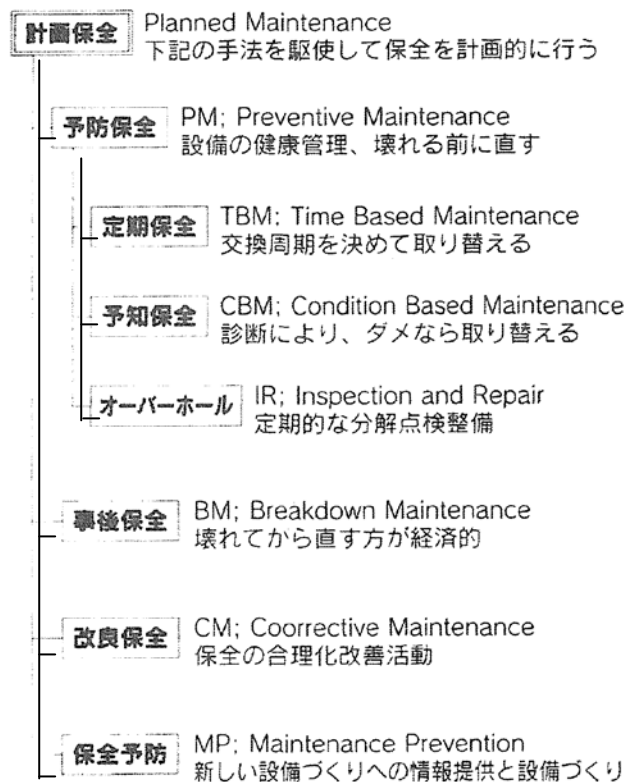


図3.32 計画保全と手段

を減らす、設備およびその部品を標準化・規格化して保全をしやすいとする、などによって保全費用を下げることが、大きな意義がある。これらを実現できるようにする保全がPMである。

3 故障低減活動（故障ゼロ化活動）と計画保全

6つの保全方式を手段として計画的に故障ゼロを達成しようと図るとき、これを「計画保全」と呼ぶ（図3.32参照）。一般装置産業で、「不良ゼロ」を目標に設備保全を進めるとき、これを従来のPMを発展させたTPM（Total Productive/Preventive Maintenance）と呼ぶのと同義である。

(1) 計画保全の進め方

計画保全の進め方は、まず故障の低減活動から入り、徐々に予防保全体制を指向するのがよいとされている。

計画保全体制づくりのイメージを、図3.33に示す。

(2) 前提になる考え方

計画保全体制づくりのスタートは、設備の徹底的な復元改造活動により、設備故障をなくし、突発的な設備の故障をゼロにすることから始める。そのためには、（製造）生産・保全部門が協力し合って以下の活動を展開することである。

製造（生産）部門

- ① 自主保全活動を通じ、徹底して設備の復元改善を進める。
- ② 設備に強いオペレータを育成し、設備の日常管理を徹底することである。

保全部門 次の進め方で故障ゼロを実現する。

- ① 強制劣化要因を洗い出し、復元・改善する（寿命延長1）。
- ② さらに必要な箇所を、改良保全で固有の寿命を延ばす（寿命延長2）。
- ③ 施設の機能部位・部品の自然劣化パターンを研究する。
- ④ 予防保全に入り、まず定期保全を実施する。
- ⑤ さらに寿命のバラツキのある箇所に予知保全を行い、劣化を基準値以内で管理して故障ゼロを維持する。これらのアプローチを図3.34に示す。

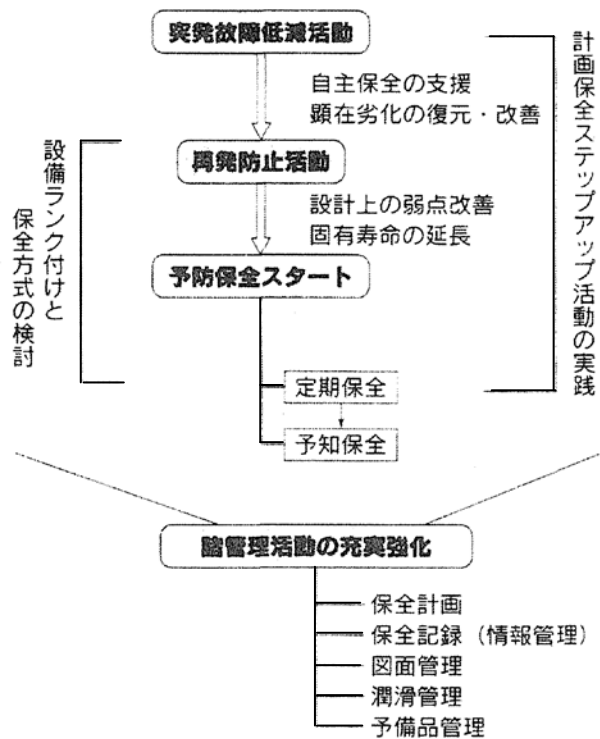


図 3.33 計画保全体制づくり

4 保全部位と保全方式選択

(1) 故障ゼロへのアプローチ

思想的な面での故障ゼロは、「保全」や「予防」の思想の上に成り立っている。しかし、故障ゼロを実現するための活動には、いろいろなアプローチがある。ここでは、機能部位の劣化をどう把握し、それをどんなパラメータで捉えて測定するかをポイントに、その手順を紹介する。

- ① ステップ 1：強制劣化要因を洗い出し、復元・改善する。

自然劣化のみが進行するような設備環境条件を整える。つまり、強制劣化要因の排除、放置された劣化の復元・改善である。

ポイント：清掃による不具合の摘出改善，発生源対策，微欠陥の摘出。改善，基本条件の整備，使用条件の明確化と遵守

- ② ステップ 2：設備の固有寿命を延長する。

いくら劣化の復元改善を図っても、もともと設計的に弱点をもったものは、それ相当の改良保全を施す必要がある。この判断は、保全の周期や寿命のバラツキから判断できる。

ポイント：設計上の弱点の改善，耐摩耗性・強度・じん性などより高い性能の確保，動作ストレスの軽減対策

- ③ ステップ 3：自然劣化のパターンを探求する。

保全の対象となる部位は、原則として時間とともに何らかの機能劣化が起こるものでなければならない。すべての機能部位、つまりストレスを受けているものは、常に何らかの時系列的な変化があるはずである。

ポイント：時間とともに変化する劣化パターンの探求，劣化の物理的解析，劣化度測定による劣化と品質の関係の把握

- ④ ステップ 4：パラメータを探索する。

劣化のパターンが認識されたら、その変化をどんなパラメータで、具体的にはどんな物理量で測定するかが次の段階となる。このステップが診断技術が必要とする。ここでは、あらゆるセンサと診断装置が活躍する場となる。

ポイント：劣化パターンからパラメータを選定，パラメータから測定方法を選択，劣化がどういう形態の物理量になって現れるか（変位，寸法変化，動作による振動，消費電流，電力・温度・

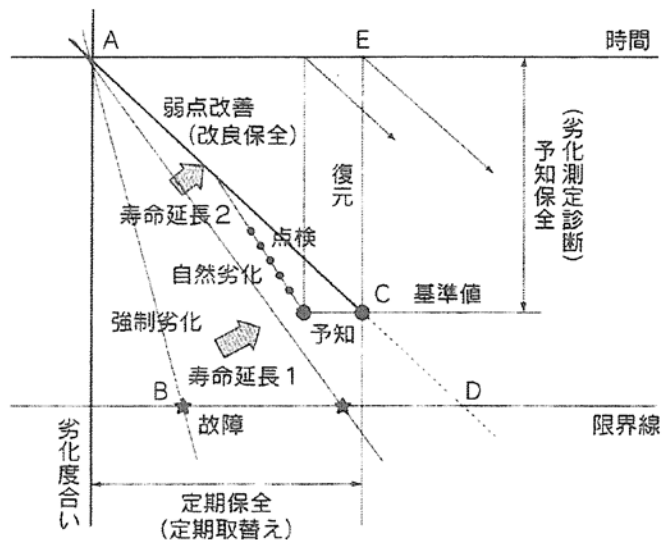


図 3.34 故障ゼロの考え方とアプローチ

圧力・磁気など)

⑤ ステップ 5：予知保全を実施する。

定期保全でも故障ゼロは守れるが、極限寿命をベースとした保全を追及する場合は、保全の基本は予知保全となる。

ポイント：簡易診断による傾向管理，変化点を捉えた精密診断，適切な診断技術の適用と開発，計画的な復元整備

(2) 設備の重要度ランク付け

設備の重要度は、工場・鉱山設備全体に対し、その設備が生産（生産量、品質）にどのような影響をどの程度与えるのか、また、故障の際の、設備自体の被害規模などを考慮して、その会社・企業が決めるべきである。

一般には、まず、重要度選択のポイントを次のような6つの評価観点で区分し、それぞれ表3.24のような評価基準をもとにして点数評価を行う。次いで、表3.25のように、総合点数の大きさに応じてS・A・B・Cランクなどのランク付けを行い、それぞれに対応した保全を実施する。

- 生産量（負荷状況、代替機の有無）：P
- 品質に与える影響：Q
- コストに与える影響：C
- 納期と設備被害に与える影響：D
- 安全性：S
- モラル：M

(3) 保全方式の選択

一般に、設備は重要度によってランク付けされ、それに合った保全方式を選択する。そのためには、保全方式を適用する設備の保全部位の具体的な選択が必要になる。

保全部位は本来、設備の設計・製作段階で明らかにされるべきものであるが、しかし現実には、生産設備などではその使用段階で、幾多の故障修理の経験を経て見つけ出すケースが一般的である。

設備の保全部位が決まると、その部位に対しどんなやり方で保全するかという保全方式の選択を行う。その際、配慮すべき2つの大きなファクターは、①その設備の重要度、②劣化がどんな要因により規定されているか、である。

劣化要因については、その設備の劣化速度があるパラメータ（時間・生産量・作動回数など）に比例するかしらないか、ということが重要である。比例すればTBM（定期保全）、比例しなければCBM（予知保全）かIR（オーバーホール）という方式になる。実際には、上記の2つのファクターを組み合わせで選択すべきである。この決め方は、相当の経験と設備についての知識が必要であり、設備保全の課題であるといえよう。

企業を取り巻く環境の変化から、より経済的な保全方式が求められているとき、設備の劣化の程度を測定して、修理・交換につなげるCBM（予知保全）が今またクローズアップされている。

劣化要因を重視した場合の保全方式選定フローチャートの例を、図 3.35 に示す。また、劣化パターンと診断の概念を、図 3.36 に示す。

表 3.24 重点設備の考え方と保全方式のための重要度評価例

課題観点	評価のポイント	評価例 (点数)
P (生産) から見て	<ul style="list-style-type: none"> ・ 予備のない設備 ・ 故障の多い設備 ・ 故障による生産減が大きい設備 ・ 同業他社に比べて生産性の低い設備 ・ アウトプット変動の大きい設備 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 停止すると全プラントが停止。…… 5 ・ 停止すると減産運転に至る。…… 3 ・ 停止しても生産に影響がない。…… 0
Q (品質) から見て	<ul style="list-style-type: none"> ・ 品質に大きな影響のある設備 ・ 品質変動の大きな設備 ・ 故障により品質変動の生じる設備 	<ul style="list-style-type: none"> ・ トラブルは品質に大きく影響。…… 5 ・ トラブルは品質に影響。…… 3 ・ トラブルは品質に影響を与えない。… 0
C (コスト) から見て	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高価な原料を投入する設備 ・ 人手を多く要する設備 ・ 電力・熱などを多く費やす設備 ・ 故障による原単位損失の大きい設備 	保全影響度： <ul style="list-style-type: none"> ・ 突発故障の修理コストが大きい。…… 5 ・ 突発故障の修理コストは中程度。…… 3 ・ 突発故障の修理コストは問題ない。… 0
D (納期) から見て	<ul style="list-style-type: none"> ・ 多種類の設備がかかわる設備 ・ 最終工程に近い設備 ・ 生産タイミングが問題になる設備 ・ 故障が全体生産を遅らせる設備 	安全保全： <ul style="list-style-type: none"> ・ 可燃性/有害性の危険性あり。…… 5 ・ 故障による人的災害の可能性あり。… 3 ・ 危険性・2 次的トラブルはない。…… 0
B (安全・環境) から見て	<ul style="list-style-type: none"> ・ 安全設備 ・ 空調設備 	使用年数： <ul style="list-style-type: none"> ・ 20 年以上経過 …………… 5 ・ 10 年以上 20 年未満経過 …… 3 ・ 10 年以内 …………… 0
M (モラル) から見て	<ul style="list-style-type: none"> ・ 公害関連設備 ・ その他故障により環境悪化する設備 	など・・・

表 3.25 設備の重要度区分と適用保全方式例

重要度区分	最重要設備 (S ランク)	重要設備 (A ランク)	PM 設備 (B ランク)	BM 設備 (C ランク)
評価点合計	〇〇点以上	〇〇～〇〇点	〇〇～〇〇点	〇〇～〇〇点

このランクごとに、例えば、

- ① S ランク設備：高級 CBM (常時監視装置をつける) システム
- ② A ランク設備：中級 CBM (定期的簡易診断+精密診断) システム
- ③ B ランク設備：(時間基準) 予防保全 (TBM) システム
- ④ C ランク設備：事後保全 (BM) システム

といったように、採用すべき保全方式を選択する (多くの企業ではこのような手順で選択している)

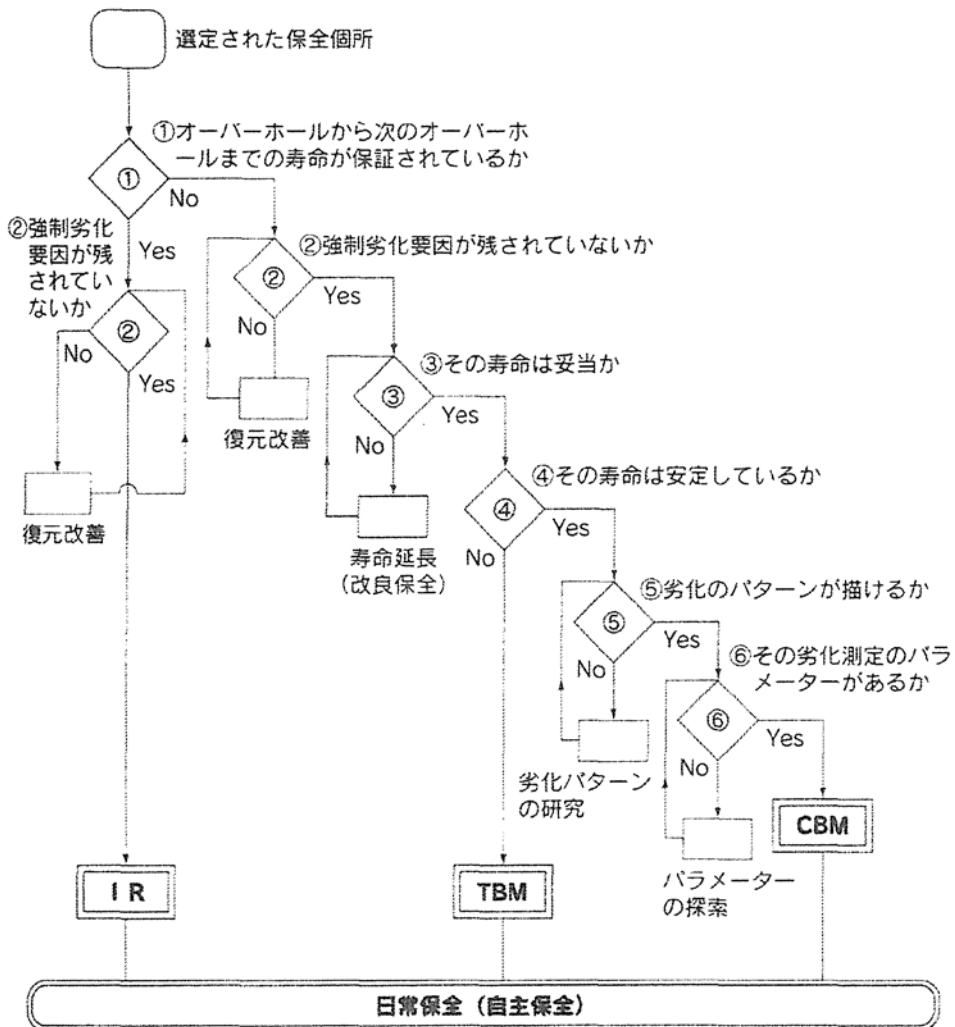


図 3.35 保全方式選定フローチャート例

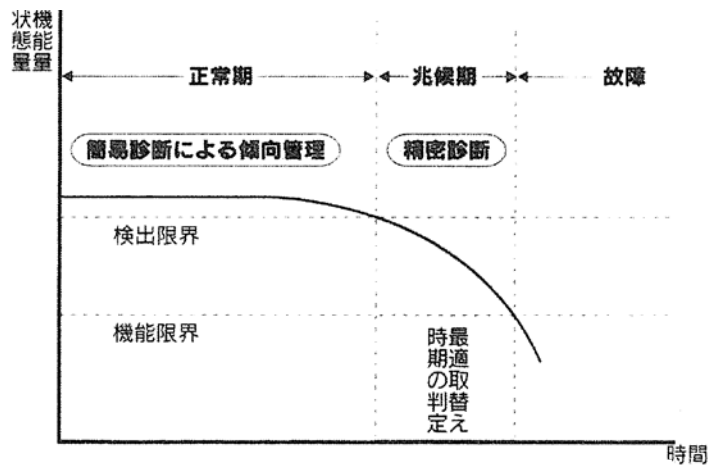


図 3.36 設備の劣化パターンと診断の概念