

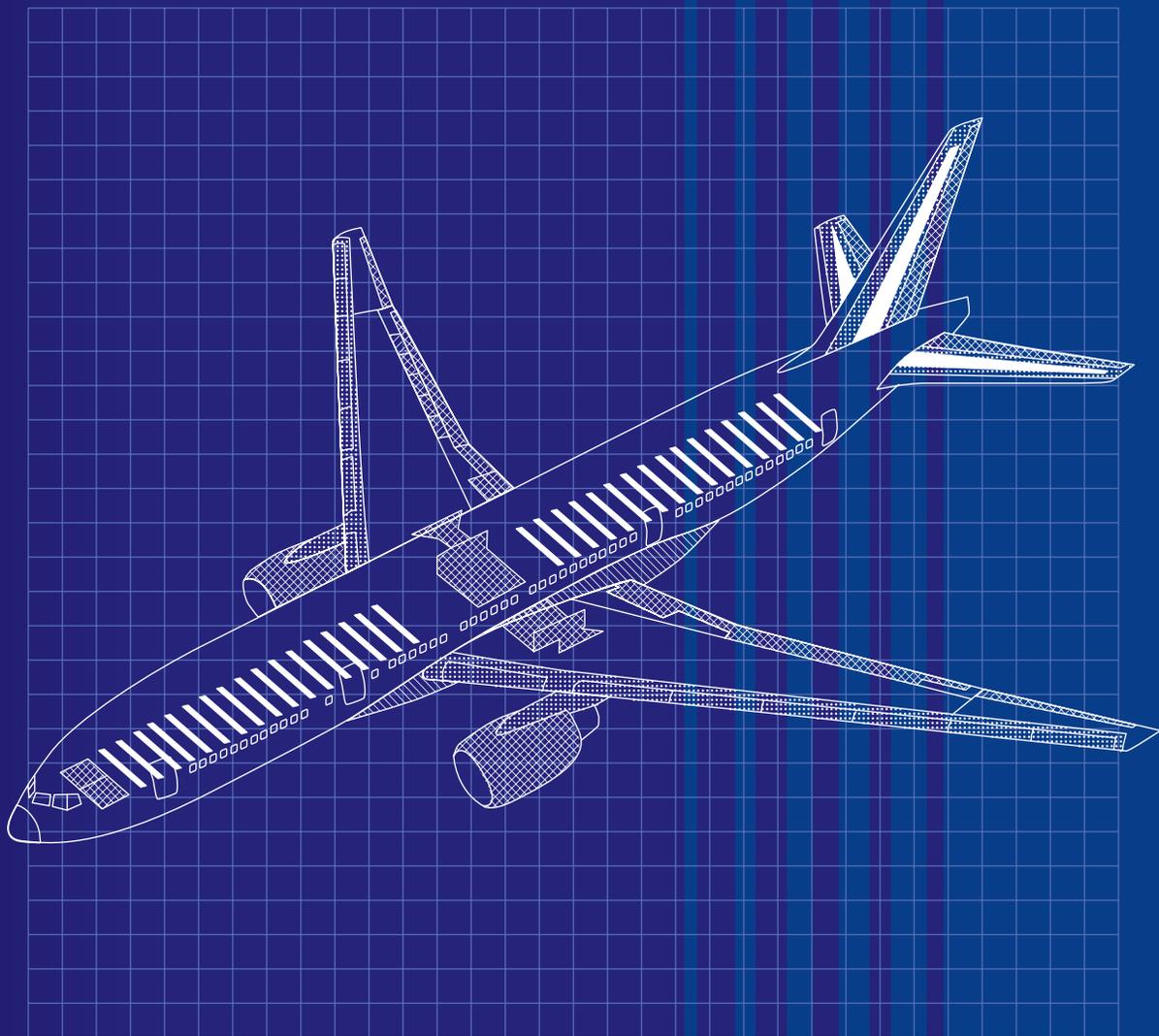
航空工学講座 4

# 航空機材料

---

## Aircraft Material

---



公益社団法人 日本航空技術協会

## 目 次

第1章 力学および材料力学の基礎 .....	1
1-1 力学の基礎 .....	1
1-1-1 物理単位、工学単位、国際単位 .....	1
1-1-2 ベクトル .....	6
1-1-3 運動の3法則 .....	7
1-2 材料力学の基礎 .....	8
1-2-1 荷重、応力、ひずみ .....	8
1-2-2 弾性変形と応力-ひずみ線図 .....	13
1-2-3 応力集中 .....	15
1-2-4 はり、曲げモーメント、せん断力 .....	15
1-2-5 はりの曲げ応力と断面係数 .....	21
1-2-6 はりの強度と断面寸法の決め方 .....	24
1-2-7 トラス .....	24
第2章 材料の強さと結晶組織 .....	31
2-1 静的強さ .....	31
2-1-1 引張強さ .....	31
2-1-2 その他の静的強さ .....	31
2-2 硬さ .....	32
2-3 クリープ強さ .....	34
2-3-1 クリープ .....	34
2-3-2 クリープ強さ .....	34
2-4 疲れ強さ .....	35
2-4-1 材料の疲れとS-N曲線、疲れ限度 .....	35
2-4-2 疲れ強さに影響する各種要因 .....	37
2-5 金属材料の強さと結晶組織 .....	37
2-5-1 金属の結晶構造 .....	37
2-5-2 合金の結晶構造 .....	39
2-5-3 結晶の大きさと金属材料の強さ .....	39

第3章 金属材料	41
3-1 構造材料からみた航空機の発達	41
3-2 現在の航空機の構造材料	45
3-3 航空機に使われる金属材料の規格	49
3-4 航空機に使われる主な金属材料の化学組成	50
3-5 鉄鋼一般	55
3-5-1 航空機に使用される鋼材	55
3-5-2 鋼中の合金元素の主な作用	55
3-5-3 鋼の熱処理	56
3-5-4 鋼の表面硬化	57
3-5-5 鋼の表面処理	58
3-6 炭素鋼	58
3-7 高張力鋼	60
3-8 ステンレス鋼	64
3-9 耐熱合金	72
3-9-1 航空機材料としての耐熱合金	72
3-9-2 耐熱合金の規格と名称	73
3-9-3 主な耐熱合金	73
3-9-4 新しい耐熱合金の開発	80
3-10 アルミニウム合金	83
3-10-1 航空機材料としてのアルミニウム合金	83
3-10-2 アルミニウム合金の規格と名称	85
3-10-3 アルミニウム合金の一般的性質	89
3-10-4 アルミニウム合金の加工	90
3-10-5 主なアルミニウム合金	91
3-11 マグネシウム合金	98
3-11-1 航空機材料としてのマグネシウム合金	98
3-11-2 マグネシウム合金の規格と名称	98
3-11-3 マグネシウム合金の一般的性質	99
3-11-4 マグネシウム合金の加工	99
3-11-5 主なマグネシウム合金	99
3-12 チタニウム合金	101
3-12-1 航空機材料としてのチタニウム合金	101

3-12-2	チタニウム合金の規格と名称	102
3-12-3	チタニウム合金の一般的性質	103
3-12-4	チタニウム合金の加工	105
3-12-5	主なチタニウム合金	106
<b>第4章 非金属材料</b>		<b>110</b>
4-1	非金属材料の種類と用途	110
4-2	プラスチック	110
4-2-1	熱可塑性樹脂	117
4-2-2	熱硬化性樹脂	123
4-2-3	プラスチックの物性	127
4-2-4	プラスチックの性質	127
4-2-5	航空機におけるプラスチックの応用例	127
4-3	ゴム	131
4-3-1	ゴムの名称	132
4-3-2	合成ゴムの種類	132
4-3-3	合成ゴム材料の物性	134
4-3-4	合成ゴム材料の性質	134
4-3-5	ゴムの航空機への応用	135
4-4	シーラント	141
4-4-1	チオコール系シーラント	141
4-4-2	シリコン系シーラント	141
4-5	接着剤	141
4-5-1	構造用接着剤	142
4-5-2	非構造用接着剤	150
4-6	塗料	151
4-6-1	塗料の種類	151
4-7	その他の非金属材料	152
<b>第5章 複合材料</b>		<b>155</b>
5-1	航空機構造材料としての複合材料	156
5-2	FRCMの基材	158

5-2-1 強化繊維 .....	158
5-2-2 FRCM のマトリックス .....	161
5-3 複合材料の理論と特性 .....	164
5-3-1 複合の理論 .....	164
5-3-2 FRCM の特性 .....	165
5-4 FRCM の製法 .....	170
5-4-1 FRP の製法 .....	170
5-4-2 FRM の製法 .....	173
5-5 複合材料の検査 .....	173
5-5-1 超音波検査 .....	173
5-5-2 X線検査 .....	175
5-6 複合材構造の修理 .....	176
5-6-1 損傷の検出 .....	176
5-6-2 修理 .....	177
5-7 先進複合材料の応用例 .....	180
5-8 複合材料の未来 .....	183
索引 .....	186

# 第1章 力学および材料力学の基礎

## 1-1 力学の基礎

### 1-1-1 物理単位、工学単位、国際単位

すべての物理的な量は、長さ、質量、時間などのいくつかの基本的な量の組み合わせとして表される。例えば、速度という量は長さを時間で割ったものであり、速度を  $V$ 、長さを  $L$ 、時間を  $T$  で表せば、 $V=L/T=LT^{-1}$  と表すことができる。また同様にして〔加速度〕 $=LT^{-2}$ 、質量を  $M$  とすれば、〔力〕 $=MLT^{-2}$  となる。

次元式は基本量の取り方によって異なる。上記の例で、質量  $M$  の代わりに力  $K$  を基本量に選べば、 $M=KL^{-1}T^2$ 、〔圧力〕 $=KL^{-2}$  などとなる。

これらの基本量に長さ、質量、時間を取り、これらの単位を基本として、他の量の単位を誘導したものが物理単位系（絶対単位系）、あるいは単に物理単位（絶対単位）といわれるものである。

一方、工学においては、質量の代わりに力を基本量に取り、一定質量に働く重力を基本単位のひとつとする単位系を用いることが多い。これが工学単位系（重力単位系）、あるいは単に工学単位（重力単位）といわれるものである。

次にメートル法における工学単位、物理単位、ならびに航空宇宙工学の分野などにおいて採用の著しい国際単位について、やや詳しく述べる。

#### a. 工学単位

長さ、時間の単位にはメートル、秒を用い、重さ、または力の単位としてキログラムを用いる。重さとは、手で物体を持ち上げるときに必要な力の感覚である。この力の感覚は物体に作用している地球の重力を力として感じているので、特に重量キログラム（kgf または kgW で表す）、一般にキログラム（kg）という。

質量は空間を専有する物質の量で、重さでも、力でもない。質量×地球の重力（重力の加速度）を工学単位のキログラムとしているので1キログラムは、

$$1 \text{ kg} = \frac{1}{9.8} \text{ kgs}^2 / \text{m} \times 9.8 \text{ m/s}^2$$

(重さ)                      (質量)                      (重力の加速度)

である。

## b. 物理単位

物理学では力の絶対単位をダイン (dyn) で表す。

$$1 \text{ kg} = 1,000 \text{ g} \times 980 \text{ cm/s}^2 = 9.8 \times 10^5 \text{ ダイン}$$

ダインの実用単位として  $10^5$  ダイン = 1 ニュートン(N)としている。従って、 $1 \text{ kg} = 9.8 \text{ N}$  である。

$$1 \text{ N} = 0.101972 \text{ kg}$$

$$1 \text{ dyn} = 1.01972 \times 10^{-6} \text{ kg}$$

また、質量  $1 \text{ kg}$  を工学単位で表せば、

$$\text{質量 } 1 \text{ kg} = 0.101972 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$$

となる。

なお、物体の重量は場所によって異なるが、場所を指定しないで単に重量という場合には、標準の  $g$  に対する重量 (標準重量) を意味するのが普通である。すなわち、質量  $1 \text{ kg}$  の物体の標準重量は  $1 \text{ kgf}$  である。

## c. 国際単位

この単位系 (Le Système International d'Unités) は、世界に共通して公式的に SI と略称され、一般にはそのまま SI とか SI の単位と呼ばれるもので、1960年の国際度量衡総会で採択され、その後、多少の修正・拡大を経て、メートル単位系の形態として、広範な支持を得ている。SIの生まれた背景には、メートル単位系の多様性から生じる混乱がある。すなわち、1875年に締結されたメートル条約に由来するメートル単位系には、MKS系・CGS系、重力系、静電系・電磁系・ガウス系など、いくつもの系統が含まれており、この多様性から混乱が生じていた。この混乱を收拾するために1948年以来、国際度量衡委員会で検討され、その後の学術ならびに産業の諸分野で必要とされる単位系として制定されたものがSIである。

SIが航空宇宙工学の分野で採用著しいのは、発展の目覚ましい宇宙開発と無縁ではない。これまで航空工学の分野では、他の工学分野と同様に工学単位 (重力単位) が用いられてきたが、この単位の基本となる重力の加速度が地表上でも時と場所により異なり、まして広い宇宙空間では、もちろん異なることから、ある物体についての重量と質量の数値が一致しないことが、宇宙工学の発展につれて目立ちはじめた。従って、航空宇宙工学の分野では工学単位の意義が低下したと考えられ、代わってSIが有用なものとして採用されたのである。

SIは、基本単位、組立単位を要素とする一貫性のある単位の集団 (これらをSI単位と呼ぶ) と、これらの単位にSI接頭語を付けて構成されるSI単位の10の整数乗倍とで運用される。

次にSI基本単位、組立単位、SI接頭語、ならびにSIと併用される単位について簡単に触れておく。なお、詳しくはJISなどを参照されたい。

## (1) SI基本単位

SI基本単位とは、SIの基礎とすることに決められ、明確に定義された7つの単位であって、次元の見地から独立であるとみなすことに取り決められたものである (表1-1)。

## 1-1 力学の基礎

表 1-1 SI 基本単位

量	名 称	記 号	定 義
長さ	メートル	m	(a)
質量	キログラム	kg	(b)
時間	秒	s	(c)
電流	アンペア	A	(d)
熱力学温度	ケルビン	K	(e)
物質質量	モル	mol	(f)
光度	カンデラ	cd	(g)

- (a) 1 秒の  $1 / 299,792,458$  の間に光が真空中を伝わる行程の長さ。
- (b) 国際キログラム原器の質量。
- (c)  $^{133}\text{Cs}$  原子の基底状態での 2 つの超微細準位の間の変移に対応する放射の  $9,192,631,770$  周期の継続時間。
- (d) 真空中に 1 メートル (m) の間隔で平行に置かれた無限に小さい円形断面積を有する無限に長い 2 本の直線状導体のそれぞれを流れ、これらの導体の長さ 1 メートルごとに  $2 \times 10^{-7}$  ニュートン (N) の力を及ぼし合う一定の電流。
- (e) 水の三重点の熱力学温度の  $1 / 273.16$
- 備考：ケルビン (K) の代わりにセルシウス度 (記号 $^{\circ}\text{C}$ ) を用いてよい。セルシウス度で表される温度の数値は、ケルビンで表される温度の数値から 273.15 を減じたものに等しい。温度差を表すにもケルビン、またはセルシウス度を用いる。
- (f)  $0.012$  キログラムの  $^{12}\text{C}$  の中に存在する原子と等しい数の構成要素を含む系の物質質量。
- (g) 周波数  $540 \times 10^{12}$  ヘルツの単色光を放出し、所定の方向における放射強度が  $1 / 683$  ワット毎ステラジアンである光源の、その方向における光度\*。

\*この定義は、第 16 回国際度量衡総会 (1979 年) で採用された。

## (2) SI 組立単位

SI 組立単位とは、対応する諸量を結びつける、いくつかの選ばれた代数的関係に基づいて、基本単位を組み合わせることにより構成することのできる諸単位であって、表現方法により次の 4 種がある (表 1-2、-3、-4、-5)。

表 1-2 基礎単位を用いて表される SI 組立単位の例

量	名 称	記 号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速さ	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>

表 1-3 固有の名称を持つ SI 組立単位

量	名 称	記 号	定 義
周 波 数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m・kg・s <sup>-2</sup>
圧 力、応 力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N・m
仕事率（工率）、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電 荷	クーロン	C	A・s
電 圧、電 位	ボルト	V	W/A
静 電 容 量	ファラド	F	C/V
電 気 抵 抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁 束	ウェーバ	Wb	V・s
磁 束 密 度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
光 速	ルーメン	lm	cd・sr
照 度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放 射 能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
平 面 角	ラジアン	rad	(a)
立 体 角	ステラジアン	Sr	(b)
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
吸収線量・比エネルギー分与・ カーマ	グレイ	Gy	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
線量当量・周辺線量当量・方 向性線量当量・個人線量当量	シーベルト	Sv	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
酵素活性	カタール	kat	s <sup>-1</sup> ・mol

- (a) 円周上で、その半径の長さに等しい長さの弧を切り取る 2 本の半径の間に含まれる平面角。
- (b) 球の中心を頂点とし、その半径を 1 辺とする正方形の面積と等しい面積をその球の表面で切り取る立体角。

## 1-1 力学の基礎

表 1-4 固有の名称を用いて表される SI 組立単位の例

量	名 称	記 号
粘度	パスカル秒	Pa・s
力のモーメント	ニュートン・メートル	N・m
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>
熱容量、エントロピ	ジュール毎ケルビン	J/K
比熱、比エントロピ*	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)
誘電率	ファラド毎メートル	F/m
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m

\* 質量エントロピともいう。

## (3) SI 接頭語

SI 接頭語とは、SI 単位の 10 の整数乗倍を構成するための接頭語のことである (表 1-5)。

表 1-5 SI 接頭語

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

## (4) SI と併用される単位

1969 年の国際度量衡委員会は、SI 以外の単位ではあるが広く使われていて、しかも重要な役割を果たしている特定の単位を併用することが必要であろうと認めた。それらを表 1-6 に示す。

表 1-6 SI と併用される単位

名 称	記号	SIでの値
分	min	1min = 60 s
時	h	1h = 60 min = 3,600 s
日	d	1d = 24 h = 86,400 s
度	°	1° = (π / 180) rad
分	'	1' = (1 / 60)° = (π / 10,800) rad
秒	"	1" = (1 / 60)' = (π / 648,000) rad
リットル	l	1l = 1d m <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1t = 10 <sup>3</sup> kg

## 1-1-2 ベクトル

速度、力などのように、大きさを持つ量をベクトルと呼ぶ。ベクトルを図示するには矢頭を付けた線分を用い、線分の長さでベクトルの大きさを表す。また、これを記号で表すには  $A$  のような肉太書体を用いる。2つのベクトル  $A$  と  $B$  が大きさも方向も一致するとき、それらは相等しいといい、等式  $A = B$  で表される（位置は異なってもよい：図1-1）。ベクトル  $C$  が  $A$  と大きさが同じで方向が反対ならば、 $C = -A$  と表す。

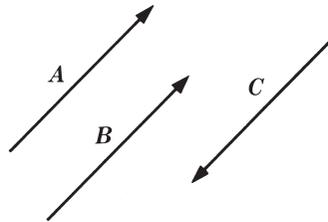


図1-1 ベクトル

以下に「ベクトル合成」と「ベクトル成分」について説明する。

## a. ベクトルの合成

図1-2のように、点  $O$  からベクトル  $A$  と  $B$  を表す線分を引き、それを2辺とする平行四辺形を作り、 $O$  を通る対角線の表すベクトル  $C$  を2つのベクトルの和といい、 $C = A + B$  と表す。ベクトルの加法においては、交換法則  $A + B = B + A$ 、ならびに結合法則  $(A + B) + C = A + (B + C)$  が成り立つ。なお、 $A$  と  $-B$  との和を  $A - B$  と書き、これをベクトル  $A$  と  $B$  の差という。

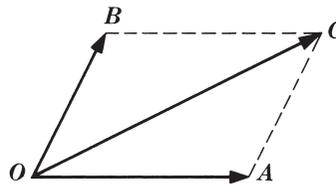


図1-2 ベクトルの合成

## b. ベクトルの成分

図1-3のように、ベクトル  $A$  の直角座標軸への正射影をそれぞれの方向の成分といい、 $A_x$ 、 $A_y$ 、 $A_z$  で表す。なお、任意の方向  $S$  に関する  $A$  の正射影を  $S$  の方向の成分という。

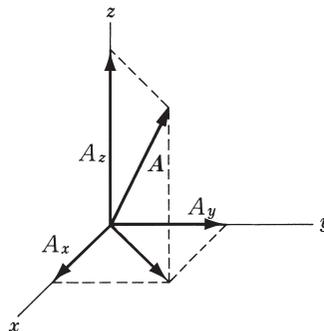


図1-3 ベクトルの成分

### 1-1-3 運動の3法則

力学の基礎法則として、ニュートンの3法則といわれるものがある。これは学問的には、質点の力学の範ちゅうで論じられるものである。

質点の力学とは、すべての物体の運動を、その物体の変形や回転を度外視して、その物体の重心の運動のみに着目し、その重心にその物体の全質量を集中させた質点の運動として力学的に取り扱おうというものである。すなわち、質点とは幾何学的な点に質量という物性を付与したもので、物体の寸度に比べ、極めて大きな規模の運動が力学的な対象となる場合、この物体の重心に全質量を集中させたと考え、質点の運動として力学的に取り扱った方が合理的であるということから考え出されたものである。

質点の運動状態を変化させる原因は力である。また、質点の運動状態を代表する量として、運動量（質量×速度 =  $mv$ ）と、運動エネルギー（ $1/2$  質量×速度<sup>2</sup> =  $1/2 mv^2$ ）の2つの量が用いられる。

前置きはこのくらいにして、以下にニュートンの3法則のみを記すが、本書では、これ以上の解説は意とするところではないので、詳しくは力学に関する他の参考書を参照願いたい。

#### a. 第1法則

外からの力が作用しなければ、質点は静止、もしくは一直線上の一様な運動を続ける。すなわち、運動量は不変である（慣性の法則、運動量保存の法則）。

#### b. 第2法則

質点の運動量の時間的な変化割合は、これに作用する力に等しい（力の定義）。

#### c. 第3法則

作用と反作用は等しい。すなわち、2質点間に作用する力は、常に大きさ相等しく、向き相反し、2質点を結ぶ直線に沿って作用する（作用反作用の法則）。

## 1-2 材料力学の基礎

### 1-2-1 荷重、応力、ひずみ

#### a. 荷 重

すべての構造物、ならびにその構造要素は、その表面に他の構造、または構造要素から伝えられる力やモーメント、流体による圧力、その他その使用目的に応じた各種の荷重を受け、また物体内部には、自重や慣性力などの荷重を受ける。これらの荷重は材料力学的には外力とも呼ばれ、次のように分類されている。

#### (1) 速度による分類

##### ★ 静荷重

静的な荷重、すなわち時間の変化に伴って大きさや方向が変化しない荷重を静荷重という。

##### ★ 動荷重

動的に作用する荷重、すなわち時間の変化に伴って大きさや方向が変化する荷重を動荷重という。このうち繰り返し変動するものを繰り返し荷重、大きさのみでなく方向も変わるものを交番荷重という。大きな加速による荷重を衝撃荷重、衝撃的に繰り返し作用するものを繰り返し衝撃荷重という。

#### (2) 分布様式による分類

##### ★ 分布荷重

荷重が分布状態にあるものをいうが、さらに等分布と不等分布に分けられる。

##### ★ 集中荷重

荷重が1点に集中したものをいう。

#### (3) 作用による分類

##### ★ 軸荷重

材料を軸方向に引き伸ばす（押し縮める）ように働く荷重である。

##### ★ せん断荷重

物体の軸線、または軸面に垂直に作用して、横断面にせん断力や曲げモーメントとして作用するような荷重をいう。

##### ★ 曲げ荷重

物体に曲げの作用を与える荷重をいう。

##### ★ ねじり荷重

物体にねじりの作用を与える荷重をいう。

##### ★ 組み合わせ荷重

上記の荷重が組み合わさって作用する荷重をいう。

## b. 応 力

すべての材料は荷重（外力）によって変形し、この変形に抵抗して材料内部に力を生じる。この力を内力といい、物体内に仮想面を考えれば、仮想面上の内力は外力と釣り合っている。この仮想面上の単位面積当たりの内力を応力という。応力を仮想面に垂直な方向と平行な方向に分解して、垂直な成分を垂直応力（ $\sigma$ ）、平行な成分をせん断応力（ $\tau$ ）といい、仮想面が互いに引張り合う（あるいは押し合う）とき、この垂直応力を引張応力（あるいは圧縮応力）という。

実際に材料にかかる荷重の状態は必ずしも一方向のみの単純なものではないが、荷重と応力の関係についてわかりやすく単純化して以下に説明する。

## (1) 引張荷重と応力（図 1-4）

棒の両端を等しい力で引張ると、棒は左右どちらにも動かない（図 1-4 の(a)）。引張力の方向に垂直な仮想面 MN では、左側に  $W_1$  と大きさが等しい反対方向の内力  $W_a$  が、また右側に同様に  $W_b$  が発生している（図 1-4 の(b)）。この  $W_a$  と  $W_b$  が引張応力である（図 1-4 の(c)）。

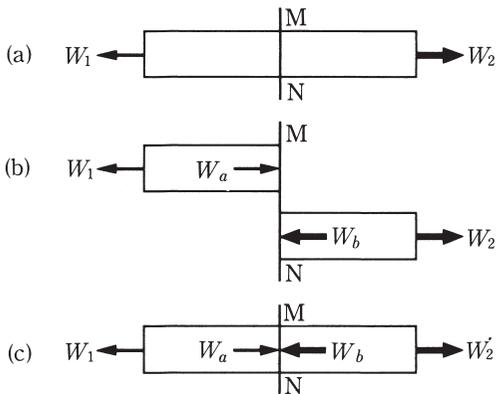


図 1-4 引張荷重と応力

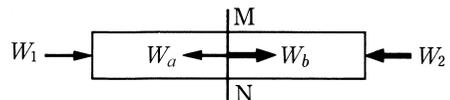


図 1-5 圧縮荷重と応力

## (2) 圧縮荷重と応力（図 1-5）

引張りの場合と、同様に棒の両端を等しい力で圧縮すると、棒は左右どちらにも動かず、圧縮力の方向に垂直な仮想面 MN では左側に  $W_1$  と大きさが等しい反対方向の内力  $W_a$  が、右側に同様に  $W_b$  が発生している。この  $W_a$  と  $W_b$  が圧縮応力である。

## (3) せん断荷重と応力（図 1-6）

リベットで接合した 2 枚の板のそれぞれを図 1-6 に示すように左右に引張るとリベットの胴には 2 枚の板の接合面と同一平面の MN にせん断応力  $W_a$  と  $W_b$  が発生し、せん断荷重  $W_1$ 、 $W_2$  と釣り合っている。

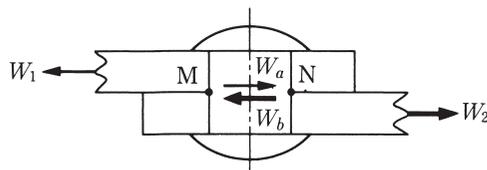


図 1-6 せん断荷重と応力

せん断応力 ( $W_a$  または  $W_b$ ) の大きさはリベットの径を  $D$  とすると、

$$\frac{W_1(\text{または } W_2)}{\frac{\pi}{4} D^2}$$

となる。

正確にいうと、物体には垂直応力と、せん断応力しか生じない。しかし、応力状態などを区別するために、いろいろな名称を用いることがある。

例えば、断面に一次的に分布し、合力が0に等しい垂直応力は、曲げモーメントによって生じるから、これを曲げ応力と称したり、軸線からの距離に比例して横断面に一次的に分布する、せん断応力はねじりモーメントによって発生するので、ねじり応力という。このほかに集中応力、残留応力、熱応力、衝撃応力、繰返応力などのことばがあるが、根本的には垂直応力ないしは、せん断応力がベースとなっている。

#### (4) 熱を受ける材料に発生する応力 (熱応力)

両端を固定した材料を熱すると、材料は膨張し両端部には圧縮荷重がかかるので圧縮応力が発生する。この応力を熱応力という。熱応力は膨張係数の異なる材料の部品で組み合わされた品物が熱せられた場合にも発生する。すなわち、膨張係数の低いものには引張応力が発生し、膨張係数の高いものには圧縮応力が発生する。また、組み合わせの内容によっては、せん断応力も発生する場合がある。

#### (5) 内圧を受ける薄肉円筒に発生する応力 (図 1-7)

##### ★ 円周方向に発生する応力 $\sigma_{H1}$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$$\sigma_{H1} = \frac{\text{内圧} \times \text{内径} \times \text{長さ}}{\text{肉厚} \times 2 \times \text{長さ}} = \frac{p \times D \times l}{t \times 2 \times l} = \frac{pD}{2t}$$

$p$ : 内圧 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$D$ : 内径 (cm)

$t$ : 肉厚 (cm)

$l$ : 円筒の長さ (cm)

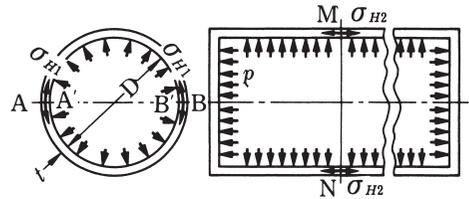
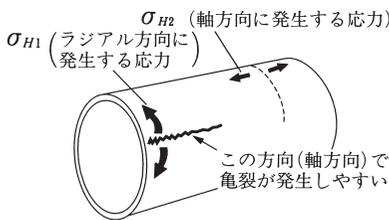


図 1-7 内圧を受ける薄肉円筒に発生する応力

##### ★ 軸方向に発生する応力 $\sigma_{H2}$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$$\sigma_{H2} = \frac{\text{内径断面積} \times \text{内圧}}{\text{円筒の断面積}} = \frac{\frac{\pi}{4} \times D^2 \times p}{\pi \times D \times t} = \frac{pD}{4t}$$