

# はじめに

本書は、材料力学の初心者念頭において執筆しました。

材料力学は、現場の技術者に役立つようまとめあげられた公式集とって差し支えありません。そこでは、複雑な式の展開はできるだけ行わず、簡単に解を求めることを目的としています。これは、いわば先人の偉大な知恵と経験の集積です。

本書でも、基本的にはそれを踏襲し、複雑な式はできるだけ排除して、平易に読めるよう努めました。最初の応力とひずみについての概念をしっかりと理解したなら、あとの基本的な要素の変形、応力、ひずみの計算は、公式に基づいて行えばよいでしょう。

しかし、近年の技術の進歩に伴い、こうした伝統的な手法だけでは、日々現実にかかる事態を正しく説明できないことが、しばしば起こっています。例えば、従来の材料力学では、材料を均質体として扱って論じてきました。しかし、現実の材料は、さまざまな大きさの初期欠陥を多数持つ非均質材料であり、それが種々の破壊の原因となります。技術の進展により、機器、部品はますます小形化、集積化し、そうした微小な非均質性が、機器の強度に大きく影響することが多くなってきています。

本書では、破壊力学に関する解説を8章に設けました。破壊力学とは、上記のような、材料の非均質性から不可避免的に発生する破損、き裂を対象とする学問です。筆者らは、通常材料力学の先に破壊力学を位置づけることが、今後の材料力学教育の必然的な進路であろうと考えてきました。

また、7章では、いまや機械設計の基本的手法となっている、有限要素法を使用する際に必要な基礎知識について解説しています。

なお、本書の完成に当たっては、図表の整理などで東京理科大学理工学部機

械工学科菊池研究室の大橋千夏さんにたいへんお世話になりました。また、コロナ社の関係各位には、数々の助言、忠告をいただきました。ここに心からお礼を申し上げます。

なお、本書は秀和システムから出版されていた『図解入門 よくわかる材料力学の基本』の改訂版です。この本を教科書に使用して講義をした10年の経験を踏まえて、本書では必要な箇所を整理、補筆しました。特に、2章では重ね合わせの原理を丁寧に解説しました。また、7章の有限要素法によるシミュレーションも大幅に書き改め、市販のCAEソフトウェアを使うために必要な知識を解説しました。

2014年2月

著 者

**〔執筆担当〕**

菊池 正紀：1, 5, 6, 8章

和田 義孝：2, 3, 4, 7章

# 目 次

## 1. 応力とひずみ

1.1 垂直応力と垂直ひずみ	1
〔1〕垂直応力 1 / 〔2〕垂直ひずみ 3	
1.2 せん断応力とせん断ひずみ	4
〔1〕せん断応力 4 / 〔2〕せん断ひずみ 5	
1.3 応力とひずみの関係	6
〔1〕垂直ひずみと垂直応力の関係 6 / 〔2〕代表的な材料定数 6 /	
〔3〕せん断応力とせん断ひずみの関係 7 / 〔4〕変形量の計算 7	
(コラム) 材料力学は微小変形だけを扱う？	8
1.4 応力-ひずみ線図	8
〔1〕材料強度の試験 8 / 〔2〕応力-ひずみ線図 9 / 〔3〕弾性変形,	
降伏応力 10 / 〔4〕塑性領域, 加工硬化, くびれ 10	
(コラム) 弾性ひずみと塑性ひずみの違いは？	11
1.5 さまざまな応力-ひずみ曲線	12
〔1〕0.2%耐力 12 / 〔2〕延性材料と脆性材料 12	
(コラム) 降伏応力は理論的に予測できる？	14
1.6 応力とひずみの測定法	15
〔1〕ひずみゲージ 15 / 〔2〕光弾性法 16	
(コラム) 塑性ひずみ=転位の発生と移動	17
1.7 安全率と許容応力	18
〔1〕許容応力 18 / 〔2〕基準強さと安全率 18	
(コラム) クリープひずみ	19

1.8	疲労に対する基準強さ	20
	〔1〕疲労 20 / 〔2〕S-N線図と疲労限 20	
1.9	疲労はなぜ起きるのか	21
	〔1〕材料の不均質性 21 / 〔2〕応力集中 22 / 〔3〕疲労の原因は応力集中 22	
	(コラム) 骨と金属の違い	23
	1章のまとめ	23
	演習問題	23

## 2. 引張りを受ける棒

2.1	重ね合わせの原理	25
2.2	棒の引張りと圧縮	27
2.3	異なる材料を組み合わせた棒	29
	〔1〕複合材料の単純なモデル 29 / 〔2〕各部の応力、ひずみ、および伸びの計算 30	
	(コラム) 複合材料	31
2.4	骨組み構造①：静定問題	31
	〔1〕2本の棒でできた骨組み構造の問題 31 / 〔2〕解法：力のつり合いを考える 32	
2.5	骨組み構造②：不静定問題	33
	〔1〕3本の棒が1点でピン結合されている問題 33 / 〔2〕解法：つり合いと変位の条件を考える 34	
2.6	熱 応 力	35
	〔1〕熱ひずみと熱応力 35 / 〔2〕熱応力は熱ひずみと直接には関係しない 36	
	2章のまとめ	37
	演習問題	37

### 3. はりの曲げ

3.1 はり	38
〔1〕 はりの荷重方法と支持方法	38 / 〔2〕 支持方法の組合せ 40
3.2 せん断力と曲げモーメント	41
〔1〕 曲げモーメント	41 / 〔2〕 せん断力と、正負の向き 41 / 〔3〕 曲げモーメントの正負の向き 42
3.3 せん断力線図と曲げモーメント線図	42
〔1〕 S.F.D. と B.M.D.	43 / 〔2〕 S.F.D. の描き方 43 / 〔3〕 計算例：中央に集中荷重を受ける単純支持はりの B.M.D. と S.F.D. 45 / 〔4〕 計算例：分布荷重を受ける単純支持はりの B.M.D. と S.F.D. 47
3.4 S.F.D. と B.M.D. の例	49
〔1〕 複数の集中荷重を受ける単純支持はり	50 / 〔2〕 等分布荷重を受ける単純支持はり 51 / 〔3〕 自由端に集中荷重を受ける片持はり 52 / 〔4〕 二つの集中荷重を受ける片持はり 52 / 〔5〕 等分布荷重を受ける片持はり 52
3.5 はりに生じる応力	54
〔1〕 断面形状によるたわみ方の違い	54 / 〔2〕 曲げ応力 55 / 〔3〕 中立面と中立軸 56 / 〔4〕 はりのたわみ方 57 / 〔5〕 断面二次モーメントと曲げ剛性 58 / 〔6〕 曲げ応力の求め方 60 / 〔7〕 断面一次モーメントと断面二次モーメント 61 / 〔8〕 はりに生じるせん断応力 62
3.6 はりのたわみ	64
〔1〕 はりのたわみの考え方	64 / 〔2〕 計算例：自由端に集中荷重を受ける片持はり 66 / 〔3〕 計算例：中心に集中荷重を受ける単純支持はり 67
3.7 重ね板ばね	68
〔1〕 平等強さのはり	69 / 〔2〕 重ね板ばね 70 / 〔3〕 組合せはり 71
3章のまとめ	71
演習問題	72

## 4. 軸のねじり

4.1 中実丸軸	73
〔1〕動力を伝達する軸	73 / 〔2〕軸に生じる応力とひずみ 74 /
〔3〕断面二次極モーメントとねじり剛性	75
4.2 中空丸軸	76
〔1〕軽量な中空丸軸	76 / 〔2〕中実丸軸との径の比による違い 77
4.3 はりの曲げと軸のねじりの相似点	79
たわみとねじりの計算手順の比較	79
4.4 伝導軸	80
〔1〕軸が伝える仕事	80 / 〔2〕中実丸軸と中空丸軸の比較 81
4.5 円筒形コイルばね	82
〔1〕素線に生じる応力とひずみ	82 / 〔2〕半径と巻数と応力の変化 83
4.6 円錐形コイルばね	84
素線に生じる応力とひずみ	85
4章のまとめ	85
演習問題	86

## 5. 多軸応力場での応力とひずみ

5.1 三次元場での応力の定義	87
〔1〕応力テンソルの定義	87 / 〔2〕外力と表面力の関係 89
(コラム) テンソルについて	90
5.2 工学ひずみ	90
〔1〕工学ひずみの定義	91 / 〔2〕せん断ひずみの意味 91
5.3 一般化されたフックの法則	93
〔1〕三次元場での応力-ひずみ関係	93 / 〔2〕体積ひずみ 94
5.4 平面応力と平面ひずみ	95
〔1〕二次元近似	95 / 〔2〕平面応力近似 96 / 〔3〕平面ひずみ近似 96

5.5 内圧を受ける薄肉円筒 .....	97
薄肉円筒の問題 97	
(コラム) 内圧と外圧を受ける薄肉円筒の応力 .....	99
5.6 焼きばめ問題 .....	99
銅管と銅管の焼きばめ 99	
5.7 応力の座標変換と主応力 .....	101
〔1〕主応力 101 / 〔2〕主せん断応力 103 / 〔3〕モールの応力円 104	
5.8 ロゼットゲージによる応力測定 .....	105
ロゼットゲージ 105	
5.9 多軸応力状態での降伏条件 .....	107
二つの降伏条件 107	
(コラム) 寸法効果 .....	108
5章のまとめ .....	109
演習問題 .....	109

## 6. 応力集中

6.1 円孔の応力集中 .....	111
〔1〕円孔縁での応力分布 111 / 〔2〕応力集中率 112 / 〔3〕円孔縁での 応力成分 113 / 〔4〕有限要素法による応力集中の解析例 114 / 〔5〕二つの円孔の干渉 115	
6.2 応力集中のいくつかの例 .....	115
〔1〕四角形の孔による応力集中 116 / 〔2〕隅部の応力集中 116 / 〔3〕だ円孔の応力集中 117	
6.3 応力集中の原因 .....	118
応力集中源の発生 118	
6.4 応力集中による破損の例 .....	120
〔1〕日本航空 123 便の墜落事故 120 / 〔2〕アロハ航空の飛行機上部剥離 事故 120 / 〔3〕もんじゅの温度計ケースの破損事故 121 / 〔4〕ドイツ	

	の高速鉄道の脱線事故 121 / 〔5〕 米国ミネアポリスの橋崩落事故 121
	〔コラム〕 新聞を読んで材料力学を…………… 122
6.5	応力集中の緩和…………… 122
	隅部の応力集中の緩和 122
6.6	応力集中を考慮した設計…………… 123
	〔1〕 切り欠き係数 $\beta$ 124 / 〔2〕 $\alpha$ と $\beta$ の関係 124 / 〔3〕 応力集中部の監視 124
	〔コラム〕 身近な応力集中の例…………… 125
6章	のまとめ…………… 125
<b>7. コンピュータによるシミュレーション…有限要素法</b>	
7.1	有限要素法とは…………… 126
	〔1〕 コンピュータによる解析 126 / 〔2〕 理論と実現方法 128 / 〔3〕 実行環境と有限要素法ソフトウェア 129 / 〔4〕 有限要素法の適用範囲 130 / 〔5〕 CAE システム 131
	〔コラム〕 有限要素法は自然現象をどこまで表現できるでしょうか…………… 132
7.2	有限要素法による解析…………… 133
	解析作業の流れ 133
7.3	モデル作成 / メッシュ生成 / 境界条件とサンブナンの原理…………… 134
	〔1〕 モデル作成 134 / 〔2〕 メッシュ生成 134 / 〔3〕 境界条件設定 135
7.4	境界条件にまつわる大切なポイント…………… 137
	〔1〕 剛体変位と剛体回転 137 / 〔2〕 対称境界条件 138 / 〔3〕 4分の1対称, 8分の1対称 139 / 〔4〕 接触問題の扱い方 139
7.5	解析 / 可視化 / 適切な解析結果の見方とその検討…………… 140
	〔1〕 解析 140 / 〔2〕 可視化 141 / 〔3〕 適切な解析結果の見方とその検討 141
	〔コラム〕 有限要素法の達人になる近道は? …………… 144
7.6	いくつかの失敗事例の紹介…………… 145



7章のまとめ	146
演習問題	146

## 8. 機器の保守・管理

8.1 破壊の力学	147
〔1〕材料の破壊過程 147 / 〔2〕破壊力学 148	
8.2 き裂先端の応力と応力拡大係数	149
〔1〕き裂にかかる力のモード 149 / 〔2〕応力拡大係数 150	
8.3 破壊条件と破壊靱性	151
〔1〕脆性破壊と延性破壊 151 / 〔2〕脆性破壊の破壊条件 151	
(コラム) 破壊はいつでも悪者でしょうか	152
8.4 機器の保守・管理の手順	153
機器の保守・管理に必要な技術	153
8.5 応力拡大係数の求め方	154
〔1〕引張りを受ける帯板のき裂 155 / 〔2〕さまざまなき裂の応力拡大係数 155	
8.6 破壊靱性値の求め方	158
〔1〕破壊靱性値の板厚依存性 158 / 〔2〕破壊靱性試験法の概略 158	
8.7 疲労き裂進展予測	160
パリス則によるき裂進展予測	160
8.8 フラクトグラフィ	163
いくつかの破面形態	163
(コラム) さらに進んで学ぶには	165
8章のまとめ	165
参 考 文 献	166
演習問題解答	167
索 引	175

# 1



## 応力とひずみ

材料の強度をどのように表現するのか，機械の設計のときに何を目安に形状，寸法を決定するのか，そういったことが材料力学の課題です。それらは，「応力」と「ひずみ」という二つのパラメータを用いて評価，判断されます。本章では，応力とひずみの定義，それらの関係について，詳しく説明します。

### 1.1 垂直応力と垂直ひずみ

応力とひずみは大きく分けて二つに分類できます。そのうち，垂直成分（垂直応力と垂直ひずみ）は，最も広く使用されるものです（もう一つは1.2節参照）。詳しくは5章で定義しますが，ここでは直感的に理解できるよう，簡単に説明します。まず，これらをきちんと理解しましょう。

#### 〔1〕 垂直応力

図1.1に示すように，ある直方体に対して，断面に垂直な方向に力 $P$ が外部から加えられている場合を考えます。このとき，この直方体の内部には，こ

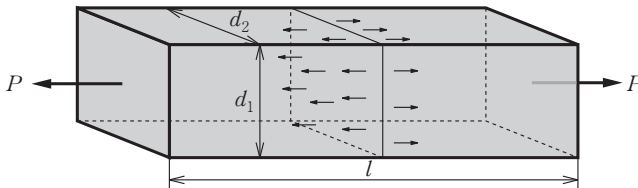


図1.1 垂直な力 $P$ が作用する直方体

## 2 1. 応力とひずみ

の外力<sup>†1</sup>とつり合うような内力<sup>†2</sup>が発生します。

任意の断面（断面積  $A$  とする）で考えれば、この断面には、左右両側から作用 - 反作用の法則<sup>†3</sup>により、同じ力が断面に垂直に作用しているはずで、この力は断面内に均一に分布すると考えられますから、その力の大きさは

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1.1)$$

で定義されます。これを垂直応力（normal stress）と呼び、これを表す記号には一般的にギリシャ文字の  $\sigma$ （シグマ）が用いられます。

構造物や材料が外力を受けるとき、内部にはこのような応力<sup>†4</sup>が生じます。応力の単位は SI 単位系<sup>†5</sup>で MPa で表されます。表 1.1 は、ほかの単位系との換算表です。

いま、図 1.2 のように、断面積が  $10 \text{ mm}^2$  の棒 A に  $100 \text{ N}$ <sup>†6</sup> の力が、断面積

表 1.1 力と応力の単位換算表

力	N	kgf	lb (ポンド)
	1	0.101 97	0.225
	9.807	1	2.205
	4.448	0.453 6	1
応力	MPa	kgf/mm <sup>2</sup>	psi
	1	0.101 97	145
	9.807	1	1 421.99
	0.006 89	0.000 703	1

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ MN/m}^2 = 1 \text{ N/mm}^2, \quad 1 \text{ psi} = 1 \text{ lb/inch}^2$$

†1 外力：材料や構造などに外から加えられる力

†2 内力：物体内に作用している力

†3 作用 - 反作用の法則：一方が受ける力と他方が受ける力は、つねに、向きが反対で大きさが等しい、という法則

†4 応力：物体に外力が加わることにより、その物体内部に生じる単位面積当りの力

†5 SI 単位系：国際単位系。従来の MKS 単位系（メートル [m]、キログラム [kg]、秒 [s]）を用い、この三つの組合せでさまざまな量の単位を表現していた）を拡張したもので、1960 年に国際度量衡総会で採択されました。SI は、フランス語の Le Systeme International d'Unites の頭文字の略称です。

†6 N：ニュートン。力の大きさを表す単位。1 kg の質量を持つ物体に、 $1 \text{ m/s}^2$  の加速度を生じさせる力の大きさが 1 N です。

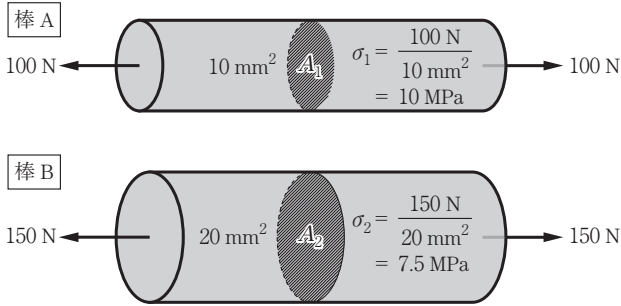


図 1.2 力学的に厳しいのはどちら？

20 mm<sup>2</sup> の棒 B に 150 N の力が作用しているときを考えてみましょう。

棒 B に作用する力のほうが大きいですが、内部に生じる応力を比較すれば、棒 A には 10 N/mm<sup>2</sup> = 10 MPa の応力が、棒 B には 7.5 N/mm<sup>2</sup> = 7.5 MPa の応力が生じていることになり、棒 A のほうが力学的には厳しい状態にあることとなります。

このように、作用する外力が大きくても、それが作用している構造物の断面積が大きければ、内部に生じる応力は小さいこととなります。すなわち、構造物へ作用する外力の厳しさは、力の絶対量ではなく、それによって内部に生じる応力で判断されるわけです。

## 〔2〕 垂直ひずみ

力を受けた構造物は変形します。図 1.1 に示した直方体は、図 1.3 のように、長さ、高さ、厚さのすべてが変化します。例えば、長さの変化量を考えてみれば、同じ力が作用したとき、長さが 2 m の棒は長さが 1 m の棒の 2 倍伸びるであろうことは容易に理解できます。

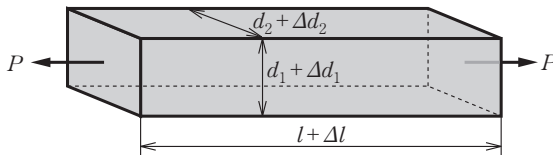


図 1.3 力を受けた直方体の変形

#### 4 1. 応力とひずみ

したがって、棒に生じた変形の程度を知るには、元の長さに対してどれだけ伸びたかを知ることが必要となります。すなわち、伸びを元の長さで割った量を調べることになります。これが**垂直ひずみ**です。

図 1.3 の直方体に対しては、三つのひずみ  $\varepsilon_l$ ,  $\varepsilon_{d1}$ ,  $\varepsilon_{d2}$  が次式のように定義されます。

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l}, \quad \varepsilon_{d1} = \frac{\Delta d_1}{d_1}, \quad \varepsilon_{d2} = \frac{\Delta d_2}{d_2} \quad (1.2)$$

垂直ひずみは元の長さの変化を示すものであり、垂直応力の作用によって生じるものです。これを表す記号には、ギリシャ文字の  $\varepsilon$  (イプシロン) が用いられます。

応力は作用する外力の大きさを、ひずみはそれによって生じる変形を、それぞれ元の形状によらず一般的に表現できる量ですから、材料力学の最も基本的なパラメータとして使われます。一般に、材料の強度評価、構造・機器の設計などは、このパラメータを用いて行われます。

### 1.2 せん断応力とせん断ひずみ

もう一つの応力とひずみは、せん断成分 (せん断応力とせん断ひずみ) です。垂直成分との違いを確認しましょう。軸のねじりなどでは、主としてこのせん断応力とせん断ひずみを考えます。

#### 〔1〕せん断応力

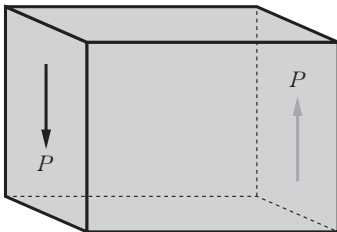


図 1.4 面内に作用するせん断力

図 1.4 のように、力が (考えている断面に垂直でなく) 面内に作用することもあります。これを**せん断力**と呼びます。これも垂直応力と同様、内部に内力を生じ、それによって**せん断応力** (shear stress) が発生します。

せん断力  $P$  が作用する断面（断面積  $A$ ）内での、単位面積当りの値

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (1.3)$$

がせん断応力であり、ギリシャ文字の  $\tau$  (タウ) で表されます。

## 〔2〕 せん断ひずみ

せん断応力により、図 1.4 の直方体は図 1.5 のように変形するものと考えられます。このとき、直方体の変形量は、長さ方向ではなく、垂直方向に生じます。これをせん断変形と呼びます。

この変形量も、元の長さ  $l$  に比例することは明らかでしょう。したがって変形の程度を表すには、ここでも変形量を元の長さで割った「単位長さ当りの変形量」

$$\gamma = \frac{\Delta l}{l} \quad (1.4)$$

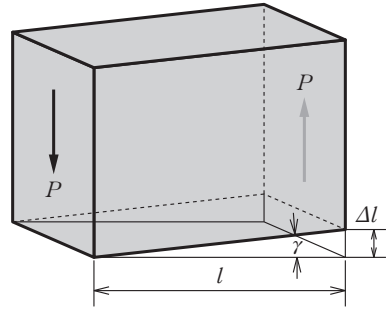


図 1.5 せん断力により変形した直方体

を示す必要があることとなります。これをせん断ひずみ (shear strain) と呼び、その記号にはギリシャ文字の  $\gamma$  (ガンマ) が用いられます。

せん断ひずみは、物体の体積変化をもたらさず、形状変化のみを生じるものです。図 1.5 に示したように、変形前は直角であった直方体の角部が、変形後は直角から少し角度を減少させています。この角度減少量は、 $\Delta l \leq l$  とすれば、せん断ひずみと同じになります。すなわち、物体の内部に直角の交線を描いておいたとき、変形によりその交線が直角から減少した角度量をせん断ひずみであると定義することもできます。これは直感的に理解しやすく、現在では工学ひずみとして広く利用されているものです。

垂直ひずみやせん断ひずみは無次元量です。金属などでは一般にこのひずみはきわめて小さい量であり、 $10^{-6}$  から  $10^{-4}$  程度のオーダーの量です。

### 1.3 応力とひずみの関係

応力とひずみは密接に関係しています。応力が、ある限界値（降伏応力<sup>†</sup>）以下なら、応力とひずみの間には簡単な比例関係が成立することが知られています。これはフックの法則として知られているものです。

#### 〔1〕 垂直ひずみと垂直応力の関係

図 1.1 を再度見てください。ここで生じた垂直ひずみと垂直応力の間には、次式の関係が成立することがわかっています。

$$\varepsilon_l = \frac{\sigma}{E}, \quad \varepsilon_{d1} = \varepsilon_{d2} = -\nu\varepsilon_l = -\frac{\nu}{E}\sigma \quad (1.5)$$

ここで、 $E$  と  $\nu$ （ニュー）は比例定数です。この値は材料ごとに異なります。また、この関係式は弾性状態で成立しますので、これらの比例定数を**弾性定数**または**材料定数**と呼びます。

$E$  は、図 1.1 において、長さ方向に作用した垂直応力と、その同じ方向へ生じた垂直ひずみを直接に関係づける定数であり、**縦弾性係数**または**ヤング率**（Young's modulus）と呼ばれます。

$\nu$  は、長さ方向の垂直ひずみと、それに対して直角方向の垂直ひずみとの間の比例関係を表す定数で、**ポアソン比**（Poisson's ratio）と呼ばれます。

一般に、引張りに対しては、棒は長さが伸びるとともに幅や高さは小さくなり、圧縮力のときはその逆になります。式 (1.5) に負の記号がついているのは、 $\varepsilon_l$  と  $\varepsilon_{d1}$ 、 $\varepsilon_{d2}$  との正負の符号が逆になるからです。

#### 〔2〕 代表的な材料定数

ヤング率は応力と同じ次元を持ち、ポアソン比は無次元量です。代表的な金属材料である鉄のヤング率とポアソン比は記憶しておくとか何とかと便利です。ヤング率は約 200 ~ 210 GPa、ポアソン比は約 0.3 と覚えておくとよいでしょう。

---

<sup>†</sup> 降伏応力：1.4 節参照

表 1.2 いくつかの金属の材料定数

金 属	$E$ [GPa]	$\nu$	$G$ [GPa]
鉄	205.9	0.3 ~ 0.33	79.2
アルミニウム	70.6	0.3	27.3
銅	122.6	0.3	47.1
亜鉛	98.1	0.33 ~ 0.4	29.5
金	79.4	0.19	27.5

1 GPa =  $10^3$  MPa

いくつかの金属の材料定数を表 1.2 に示しておきます。

〔3〕 せん断応力とせん断ひずみの関係

せん断応力とせん断ひずみの間にも比例関係があり、次式で表されます。

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \tag{1.6}$$

この  $G$  も材料定数であり、せん断弾性係数と呼ばれています。この定数値も、表 1.2 に示しています。

〔4〕 変形量の計算

図 1.6 のような直方体の変形を調べてみましょう。図に示す寸法の角柱に、 $P = 20\,000$  N の力が作用していたものとし、材質は鉄であるとしましょう。

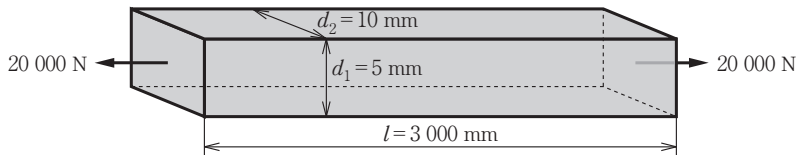


図 1.6 荷重  $P = 20\,000$  N を受ける角柱

この角柱に発生する垂直応力  $\sigma$  と垂直ひずみ  $\varepsilon$  は

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{20\,000 \text{ N}}{5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}} = 400 \text{ MPa} \\ \varepsilon &= \frac{\sigma}{E} = \frac{400 \text{ MPa}}{200 \text{ GPa}} = \frac{400}{200 \times 1\,000} = 0.002 \end{aligned} \right\} \tag{1.7}$$



## 8 1. 応力とひずみ

と計算できます。すると、長さの変化と幅、高さの変化はそれぞれ、次式のように計算することができます。

$$\Delta l = \varepsilon l = 0.002 \times 3\,000 \text{ [mm]} = 6 \text{ mm} \quad (1.8)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta d_1 &= -\nu \varepsilon d_1 = -0.3 \times 0.002 \times 5 \text{ [mm]} = -0.003 \text{ mm} \\ \Delta d_2 &= -\nu \varepsilon d_2 = -0.3 \times 0.002 \times 10 \text{ [mm]} = -0.006 \text{ mm} \end{aligned} \right\} (1.9)$$

### 〔コラム〕 材料力学は微小変形だけを扱う？

ここでの計算結果からわかるように、長さや幅の変化はとても小さな量です。金属の変形は、普通このような小さな変形しかしません。材料力学はそうした微小な変形を前提にしています。

しかし近年では、超塑性材料といって、元の長さの10倍以上に伸びるような材料も使われるようになってきています。そのような材料の力学は、別に考えなければなりません。

## 1.4 応力－ひずみ線図

材料の強さ＝強度も、やはり応力とひずみで表現されます。材料が外力を受けてどのような応答をするかを知るには、材料試験を行う必要があります。その結果得られるのが、応力－ひずみ線図です。

### 〔1〕 材料強度の試験

材料強度の最も基本的なデータは、静的な引張り負荷を受けたときの材料の応答です。このための材料試験の代表的な試験片形状は、**図 1.7**に示すようなものです。こうした形状はJIS（日本工業規格）により規格化されています。

**静的引張り試験機**の概略図も、**図 1.7**に示しておきます。試験片を固定するチャック部は剛性の高い上下の板に固定されます。この板が、ねじを切った柱の回転につれて上下に移動して、試験片に引張り力や圧縮力を与える構造になっています。

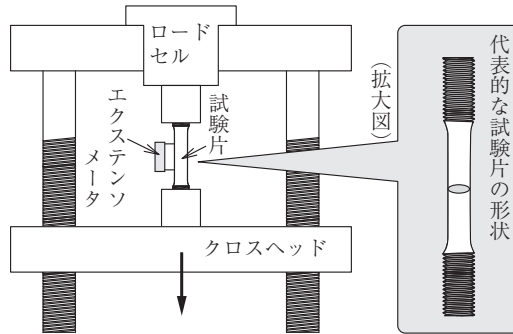


図 1.7 代表的な試験片形状と静的引張り試験機

〔2〕 応力-ひずみ線図

試験片の伸びは、平行部に取り付けた伸び計（エクステンソメータ）で測定し、作用する荷重はロードセルにより計測されます。この伸びを横軸に、荷重を縦軸にとって、両者の関係を示せば、**荷重-変位線図**が得られます。この荷重-変位線図から**応力-ひずみ線図**（stress-strain curve）を描くには、荷重を試験片断面積で割り、変位を試験片平行部の長さで割ればよいことはわかりますね。軟鋼の典型的な応力-ひずみ線図は、**図 1.8**のようになります。

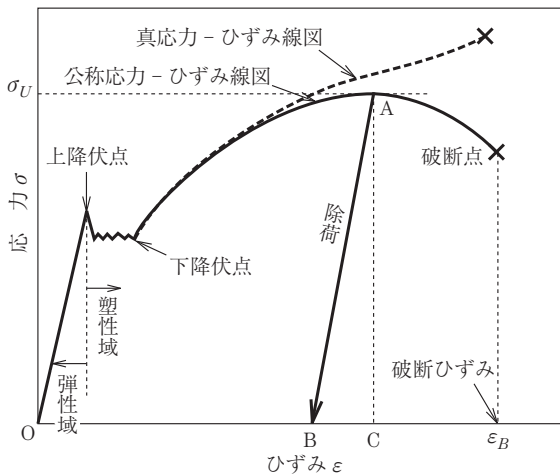


図 1.8 軟鋼の応力-ひずみ線図

# 索 引

<b>【あ】</b>	上降伏点	10	軸 力
安全率		19	仕事率
	<b>【き】</b>		——の単位
<b>【い】</b>	幾何学的非線形	131	下降伏点
一般化されたフックの法則	基準強さ	18, 21	縦主軸
	境界要素法	129	集中荷重
移動支点	許容応力	18	自由表面
異方性	切り欠き係数	124	周方向応力
	き 裂	148	主応力
<b>【え】</b>			主応力面
円錐形コイルばね	<b>【く】</b>		主せん断応力
延性材料	クリープ	19	主せん断応力面
延性破壊	クリープひずみ	19	初期欠陥
円筒形コイルばね			<b>【す】</b>
	<b>【こ】</b>		垂直応力
<b>【お】</b>	工学ひずみ	5, 91	垂直ひずみ
応 力	剛体回転	138	スカラ
応力拡大係数	剛体変位	137	ストライエーション
応力拡大係数範囲	降伏応力	10	寸法効果
応力集中	降伏条件	107	
応力集中度	固定支点	40	<b>【せ】</b>
応力テンソル	コンタ図	141	脆性材料
応力-ひずみ線図	コンピュータグラフィックス	128	脆性破壊
			静 的
<b>【か】</b>	<b>【さ】</b>		節 点
回転移動	材料定数	6	せん断応力
回転支点	作用-反作用の法則	2	せん断弾性係数
外 力	三点曲げ試験片	158	せん断ひずみ
加工硬化	サンブナンの原理	136	せん断変形
重ね合わせの原理			せん断力
重ね板ばね	<b>【し】</b>		せん断力線図
荷重-変位線図	軸	73	
片持はり	軸方向応力	97	

<b>【そ】</b>		<b>【に】</b>		ブーリアン演算	134
塑性ひずみ	10, 11	肉盛溶接	122	プレプロセッシング	134
<b>【た】</b>		二次元近似	95	分布荷重	39
体積ひずみ	94	<b>【ね】</b>		<b>【へ】</b>	
縦弾性係数	6	ねじり角	74	平行移動	137
たわみ	64	ねじりモーメント	74	平面応力近似	96
たわみ角	64	熱応力	36	平面ひずみ近似	96
たわみ曲線	64	熱ひずみ	36	平面ひずみ破壊力学	158
単純支持はり	40	熱膨張率	36	ベクトル	90
弾性定数	6	<b>【は】</b>		偏微分方程式	128
弾性ひずみ	11	破壊靱性	152	<b>【ほ】</b>	
弾塑性破壊	151	破壊靱性値	158	ポアソン比	6
断面一次モーメント	61	破壊力学	118	ポストプロセッシング	134
断面係数	58	破断ひずみ	11	骨組み構造	31
断面二次モーメント	58, 61, 75	はり	38	<b>【ま】</b>	
<b>【ち】</b>		馬力	81	曲げ応力	55
中空丸軸	76	パリス則	160	曲げ剛性	58
中実丸軸	73	半径方向応力	97	曲げモーメント	41
中立軸	56	汎用コード	131	曲げモーメント線図	43
中立面	56	<b>【ひ】</b>		マトリックス	90
<b>【て】</b>		光弾性法	17	<b>【み】</b>	
定常	131	ひずみゲージ	15	ミーゼス	107
ディンプル	164	引張り試験機	8	ミーゼス応力	107
転位	17	引張り強さ	11	ミルシート	12
転位論	17	非定常	131	<b>【め】</b>	
伝動軸	80	比ねじり角	74	メインプロセッシング	134
<b>【と】</b>		非破壊検査	154	メッシュ	127
動的	131	平等強さのはり	70	メッシュ生成	134
等方性	131	疲労	20	<b>【も】</b>	
トルク	74	疲労限	21	モードⅠ	150
トレスカ	107	ピン接合	31	モードⅢ	150
<b>【な】</b>		<b>【ふ】</b>		モードⅡ	150
内力	2	不均質性	21	モーメント荷重	39
		複合材料	31	モールの応力円	104
		フラクトグラフィ	154		

<p><b>【や】</b></p> <p>焼きばめ 100 ヤング率 6</p> <p><b>【ゆ】</b></p> <p>有限差分法 129 有限要素法 114</p>	<p><b>【よ】</b></p> <p>要素 127</p> <p><b>【ら】</b></p> <p>らせん角 74</p>	<p><b>【り】</b></p> <p>離散化 129 リバーパターン 164</p> <p><b>【ろ】</b></p> <p>ロゼットゲージ 106</p>
---	--	---

---

<p><b>【数字】</b></p> <p>0.2% 耐力 12</p> <p><b>【B】</b></p> <p>B. M. D. 43</p>	<p><b>【C】</b></p> <p>CT 試験片 158</p> <p><b>【H】</b></p> <p>HP 81</p>	<p><b>【S】</b></p> <p>S. F. D. 43 SI 単位系 2 S-N線図 20</p>
---	--	--

— 著者略歴 —

**菊池 正紀** (さくち まさのり)  
1971年 東京大学工学部精密機械工学科卒業  
1973年 東京大学工学系大学院修士課程修了  
(精密機械工学専攻)  
1976年 東京大学工学系大学院博士課程修了  
(精密機械工学専攻)  
工学博士  
東京大学助手  
1978年 東京理科大学講師  
1980年 Gergia 工科大学博士研究員  
(1981年まで)  
1985年 東京理科大学助教授  
1992年 東京理科大学教授  
現在に至る

**和田 義孝** (わだ よしたか)  
1993年 東京理科大学工学部機械工学科卒業  
1995年 東京理科大学大学院理工学研究科  
修士課程修了 (機械工学専攻)  
1997年 東京大学大学院工学系研究科中退  
東京大学大学院工学系研究科助手  
博士 (工学) (東京大学)  
2000年 高度情報科学技術研究機構研究員  
2002年 諏訪東京理科大学講師  
2006年 諏訪東京理科大学助教授  
2007年 諏訪東京理科大学准教授  
2010年 Virginia Tech 客員教授  
2012年 近畿大学准教授  
現在に至る

図でよくわかる材料力学

Introduction to Strength of Materials for Engineers

© Masanori Kikuchi, Yoshitaka Wada 2014

2014年4月25日 初版第1刷発行



検印省略

著者 菊池 正紀  
和田 義孝  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 萩原印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

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

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04636-6

(柏原) (製本: 愛千製本所)

Printed in Japan



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

落丁・乱丁本はお取替えいたします