

## はじめに

機械や構造物などを設計するためには、それらが使用期間中に破損せずに安全に使用できるように考慮する必要がある。このために、強度設計の方法を与える学問として材料力学は発展してきた。人類は、近年、資源・エネルギー問題、地球環境問題など重要な問題に直面している。このような問題に対しても、省資源・省エネルギーや排気ガスの対策などを行う機械を開発するために材料力学の果たす役割は大きい。このようなマクロな課題の解決から、電子機器で使用される IC チップの熱応力による疲労破壊防止などミクロな要素の開発まで、広範囲の分野にわたり材料力学は重要な役割を果たしている。さらに、食品、生物、医療などの分野においても、健康や安全性を考慮した機械や機器を開発するための基礎を材料力学は担っている。

機械設計や、ものづくりにおいて最も基本的で重要な強度設計に必要な情報を材料力学は提供する。したがって、材料力学は新しい機械を創造するために必須の学問である。安全な機械を設計するためには、機械要素の変形解析と応力解析が必要である。

本書は、著者らが大学での教育・研究および企業における実務経験に基づき、材料力学で重要な基本的な内容をわかりやすく解説するように工夫している。このために、本書では、機械の強度設計に必要な材料の変形特性の評価方法と応力解析の考え方、および強度評価の方法に関する基本事項を 1 章と 2 章で説明している。機械要素の設計で最も重要な、曲げを受けるはりのたわみと応力解析の方法を 3 章、4 章および 5 章で詳しく解説している。回転を伝える軸やコイルばねの設計に必要なねじりの問題は、6 章で取り扱っている。圧力を受ける容器の応力解析の方法を薄肉円管と薄肉球殻について、7 章で紹介している。ひずみエネルギーに関連する定理と応力解析への応用は 8 章で解説している。複雑な荷重が組み合わさって作用する場合の応力解析の方法と、主応

力および最大せん断応力の求め方を9章で説明している。圧縮を受ける細長い部材で大切な座屈などの安定性の問題は、10章で説明している。温度変化を伴う機械要素において重要な熱応力は11章で紹介している。機械要素の強度設計で重要な材料の強度特性を定める破損の法則は12章で説明している。

材料力学の内容を理解し応力を身に付けるためには、演習問題を解くことが大切である。このために、本書では基本的で重要な例題を提示し、その解答も示した。特に、応力の概念を理解し、使用する仮定や法則の成立する範囲や条件を明確にすることは重要である。また、数値計算の例題を解くことにより、応力解析の手法を学び、単位の大切さを理解することができる。したがって、例題を積極的に解いて内容の理解を深めることを勧める。

本書では、機械設計の応力解析において基本的に重要な弾性変形の問題をおもに取り扱っている。しかし、近年、機械の使用条件はますます過酷になっており、目的の条件を達成するために、非弾性変形の解析が重要になっている。このために、本書では機械の破壊の中で最も基本的で重要な疲労を13章で解説している。さらに、エンジンやガスタービンなどの高温機器の設計で重要である材料の高温における強度特性を、14章で説明している。

本書は高専および大学の教科書としてのみでなく、企業の強度設計においても有用である。本書により材料力学の基礎を学び、さらに先進の材料力学を修得し、これらを応用して人類の発展に貢献する有用な機械や構造物を開発できるように、学生および若い技術者の将来の活躍を期待する。

本書の執筆において各著者がおもに担当した章は、つぎのとおりである。松井：1章と2章，竹市：3章，4章および5章，戸伏：6章と14章，稲葉：7章と12章，池田：8章，10章および11章，小野：9章と13章である。この中で、8章，10章および11章の例題の作成には、名古屋大学の仙場淳彦助教にご協力いただいたことを記して感謝の意を表す。

終りに、本書の出版を快諾され種々のご高配をいただいた株式会社コロナ社の各位に深く感謝申し上げる。

2014年2月

著者一同

# 目 次

## 1 応力とひずみ

1.1 材料力学と機械設計	1
1.2 切 断 法	3
1.3 応 力	4
1.3.1 垂 直 応 力	4
1.3.2 せん断応力	5
1.4 ひ ず み	6
1.4.1 垂 直 ひ ず み	7
1.4.2 横ひずみとポアソン比	8
1.4.3 せん断ひずみ	9

## 2 応 力 解 析

2.1 機械材料の変形特性	11
2.2 フックの法則	16
2.3 許容応力と安全率	18
2.4 応 力 集 中	20
引用・参考文献	23

## 3 はりのせん断力と曲げモーメント

3.1 はりの支持と外力	24
--------------	----

3.2	せん断力と曲げモーメント	28
3.3	片持ちはり	30
3.3.1	はりの先端に集中荷重が加わる場合	30
3.3.2	はりの途中に集中荷重が加わる場合	32
3.3.3	分布荷重が加わる場合	33
3.3.4	座標軸のとり方	36
3.4	両端支持はり（単純支持はり）	41
3.4.1	集中荷重が加わる場合	41
3.4.2	複数の集中荷重が加わる場合	43
3.4.3	分布荷重が加わる場合	49
3.4.4	集中モーメントが加わる場合	50
3.5	移動荷重が作用するはり	57
3.6	せん断力と曲げモーメントの関係	61

## 4 はりの応力

4.1	曲げ応力	63
4.2	断面モーメントと断面係数	68
4.2.1	図心と断面一次モーメント	69
4.2.2	平行軸の定理	70
4.2.3	直交軸の定理	71
4.2.4	加法定理（減法定理）	72
4.2.5	いろいろな断面形状の断面二次モーメントと断面係数	73
4.3	せん断応力	84
	引用・参考文献	95

## 5 はりのたわみ

5.1	たわみ曲線	96
5.2	片持ちはり	99

5.2.1 集中荷重が加わる場合	99
5.2.2 分布荷重が加わる場合	102
5.3 両端支持はり（単純支持はり）	106
5.3.1 集中荷重が加わる場合	106
5.3.2 分布荷重が加わる場合	108
5.4 不静定はり	112
5.4.1 両端が固定支持されたはり	112
5.4.2 固定支持端と単純支持端を有するはり	117
5.4.3 不静定はりを重ね合わせの原理で考える	123
5.5 平等強さのはり	129

## 6 ね じ り

6.1 丸軸のねじり	135
6.1.1 ねじり応力の分布	135
6.1.2 ねじれ角と軸の強度	137
6.2 中空丸軸のねじり	141
6.3 伝 動 軸	142
6.3.1 ね じ り 応 力	142
6.3.2 設計で考慮する項目	143
6.4 密巻コイルばね	145
6.4.1 ばねの応力	145
6.4.2 ばねの変形	147

## 7 薄肉円筒および薄肉球殻

7.1 薄 肉 円 筒	152
7.2 薄 肉 球 殻	155

## 8 ひずみエネルギー

8.1	仕事とひずみエネルギー	158
8.2	引張りと圧縮によるひずみエネルギー	159
8.3	せん断によるひずみエネルギー	160
8.4	一般化力によるひずみエネルギー	161
8.4.1	曲げによるひずみエネルギー	162
8.4.2	ねじりによるひずみエネルギー	163
8.5	相反定理	165
8.6	カスチリアノの定理	168
8.7	衝撃荷重	177

## 9 組合せ応力

9.1	3次元における応力とひずみ	180
9.1.1	3次元の応力成分	180
9.1.2	応力とひずみの関係	181
9.1.3	3次元問題の2次元化	182
9.2	傾斜面上の応力	185
9.2.1	垂直応力とせん断応力	185
9.2.2	主応力	186
9.2.3	主せん断応力	188
9.2.4	モールの応力円	189
9.2.5	曲げとねじりの組合せ	194
9.3	弾性係数間の関係と体積弾性係数	198
9.3.1	弾性係数間の関係	198
9.3.2	体積弾性係数	200

## 10 柱 の 座 屈

10.1	安定と不安定	203
10.2	座屈荷重	204
10.3	種々の端末条件をもつ柱の座屈	206
10.4	荷重の偏心や初期たわみを有する柱の座屈	211
10.4.1	偏心の影響	211
10.4.2	初期たわみの影響	213
10.5	座屈の設計公式	215
10.5.1	ゴールドン・ランキンの式	216
10.5.2	テトマイヤーの式	216

## 11 熱 応 力

11.1	棒の熱応力	219
11.2	熱応力に関する例題	220

## 12 破 損 の 法 則

12.1	破損基準	226
12.2	最大主応力説	227
12.3	最大せん断応力説	228
12.4	せん断ひずみエネルギー説	229

## 13 疲 勞

13.1	S-N 曲線	235
13.1.1	疲労破壊の過程	235

13.1.2	疲 勞 試 験	237
13.1.3	S-N 曲 線	238
13.1.4	S-N曲線に影響を及ぼす因子	239
13.2	$\varepsilon$ -N 曲 線	243
13.2.1	高サイクル疲労と低サイクル疲労	243
13.2.2	$\varepsilon$ -N 曲 線	245
13.3	疲労破壊への破壊力学の適用	246
13.3.1	き裂先端の応力	246
13.3.2	応力拡大係数	248
13.3.3	き裂先端塑性域	249
13.3.4	その他の破壊力学パラメータ	251
13.3.5	疲労き裂進展寿命の評価	252
	引用・参考文献	256

## 14

## 高温における変形と強度

14.1	高温における変形	257
14.2	ク リ ー プ	258
14.2.1	クリープ変形	258
14.2.2	クリープ変形の構成式	260
14.3	リラクセーション	262
14.4	高 温 強 度	263
	引用・参考文献	264
付	録	265
索	引	268

# 応力とひずみ

材料力学は、機械部品の設計において基礎となる重要な学問である。実際の機械部品において、各要素は外部からさまざまな種類の外力を受ける。また各要素を構成する各種の材料は内部に微小な欠陥を有しており、同一材料内でも微視的にみると機械的特性は一定ではないことが一般的である。このように実際の現象は複雑であるため、材料力学では各種の仮定を設けて単純化して考える。

応力とひずみには、どちらも引張り（または圧縮）とせん断の2種類がある。機械要素が受ける外力の種類や変形の様式によって、これらを適切に使い分けられることが大切である。本章では、材料力学を学ぶうえで基本となる応力とひずみの考え方について述べる。

## 1.1 材料力学と機械設計

機械部品や構造物を設計する場合、使用中にその部材に加わる力や使用される温度などの環境から“壊れないか”、“どの部位がどの程度変形するか”が問題となる。これらの問題に対して解を導く学問が材料力学であり、機械設計技術者にとって重要な知識であるといえる。

機械部品などを設計する際、各要素に加えられるさまざまな種類や大きさの**外力** (external force) を考える必要がある。これらの外力をまとめて**荷重** (load) という。使用中に作用する荷重に対して各要素が十分な強さを有し、決して破断しないよう設計しなければならない。

機械部品の要素に加わる荷重には、作用の形式によって大きく2種類に分類

## 2 1. 応力とひずみ

される。一点に集中して作用する**集中荷重** (concentrated load) と、ある面積や長さにならって作用する**分布荷重** (distributed load) である。分布荷重の中でも特に、荷重の作用範囲内で大きさが一定なものを**等分布荷重** (uniformly-distributed load) とよんで区別する。

荷重はまた、作用する大きさの変化によっても分類できる。荷重が作用する期間中、その荷重が徐々に変動するか、まったく変動しない荷重を**静荷重** (static load) という。例えば置かれている本の自重が机の上に加わっているような場合がこれに当たる。これに対して、地震によって建物が受ける荷重のように、短期間で大きさが急激に変化するような荷重を**変動荷重** (dynamic load) とよぶ。さらに、ある期間にわたって繰返し生じる荷重を**繰返し変動荷重** (repeated load) という。

機械設計では、上述の荷重に加えて材料の力学的性質も考慮する必要がある。実際の材料では、品質保証上の許容範囲内であっても微視的な欠陥や成分の微小なばらつきによって、力学的特性に若干の違いが現れたり、局所的に特性が異なったりしていることはごく普通である。これらを個々に考慮して問題を解こうとすれば、その解法は著しく複雑になる。そこで材料力学では単純化のために以下の仮定を用いることを前提とする。

- ・材料全体にわたって欠陥が存在せず、均一な組織から構成されており、局所的な力学的性質に差異が現れないと考える。このような性質を**均質** (homogeneous) という。
- ・一般的には、組織や繊維の配向などのために方向によって材料の力学的性質が異なる（このような材料を**異方性材料** (anisotropic material) とよぶ）が、あらゆる方向について力学的性質が等しいと考える。このような材料を**等方性材料** (isotropic material) という。
- ・物体が外力によって変形する場合、その変形量は物体自身の寸法に比べてきわめて小さいと考える。
- ・数種類の外力が物体に同時に作用した場合の弾性変形は、これらの外力が個々に作用した場合の変形を加えたものに等しく、作用する順序や期間と

は独立であると考え、これを**重ね合わせの原理** (principle of superposition) という。

材料力学の諸問題は一般的に以上の仮定の上に成り立つために、実際の状態と正確に一致するものではないことに注意が必要である。しかしながら、これらの仮定を適切に行ったうえで解析した結果に対しては、実用上の精度は十分保証できる。

## 1.2 切 断 法

物体に外力が作用しその物体が変形している場合、その物体の内部には外力に対して形や寸法を回復しようとする力が働く。この力が外力と釣り合うことによって変形した形状が保たれる。仮にこの内部の力が外力と釣り合うことができない場合、この物体は破壊に至ることになる。外力を受ける物体を仮想的に分割し、その分割面に発生している内部の力を**内力** (internal force) とよぶ。このように、ある物体を仮想的に分割し、分割した部分と作用する力とモーメントの釣り合いから内力を求める方法を切断法という。材料力学ではこの方法を用いて**自由物体線図** (free body diagram) を描き、内力を求める。

いま図 1.1 のように、丸棒に外力  $P$  が作用しており釣り合っている (すな

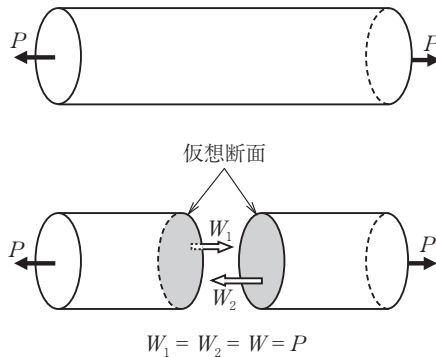


図 1.1 引張荷重が作用する丸棒

## 4 1. 応力とひずみ

わち静止している) 場合を考える。つぎに、この丸棒を仮想断面において二つの要素に分割することを考える。それぞれの断面には、図 1.1 のように  $W_1$ 、 $W_2$  の内力が発生していると考えられることができる。このとき、仮想断面に作用する内力  $W_1$ 、 $W_2$  は作用反作用の関係から、たがいに逆向きで等しい大きさとなる。このように仮想断面を考え、そこに作用する内力の大きさに基づいて各部位の材料選択や形状を決定していくことが機械設計において重要であり、材料力学における基本の考え方となる。この一連の方法を適切に使用することが材料力学の諸問題を効率的に解くためのポイントとなる。

### 1.3 応力

物体が外力を受けて変形している場合、その物体の仮想断面に生じる単位面積当たりの内力を**応力** (stress) という。例えば直径の異なる丸棒に等しい引張りの荷重を与えたとき、仮想断面に生じる内力は等しくなるが、直径の小さい丸棒の方に生じる単位面積当たりの負荷は大きくなる。つまり、外力の大きさだけでは物体が受ける単位面積当たりの負荷の大きさを評価することができない。そこで、このような単位面積当たりの負荷の大きさの違いを評価するために応力を用いる。

応力は垂直応力とせん断応力に大別できる。いずれの応力も荷重 (= 内力) [N] を断面積 [m<sup>2</sup>] で割ることによって求められる。よって応力の単位は [N/m<sup>2</sup>] (= [Pa]) となるが、材料力学で扱う材料の場合、応力の数値が大きいため、[N/mm<sup>2</sup>] (= [MPa]) で表すことが多い。

#### 1.3.1 垂直応力

図 1.1 でみたように、丸棒に外力が作用する場合を考える。この棒の仮想断面には、この面に垂直な内力  $W$  (軸力) が生じる。このとき、この棒には**垂直応力** (normal stress)  $\sigma$  が作用し、その大きさは

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

で表すことができる。ここで、 $A$ は仮想断面の断面積を表す。つまり、垂直応力は、仮想断面において単位面積当たりどれだけの力で引っ張られているか（圧縮されているか）を表す物理量である。通常、垂直応力は引張りを正、圧縮を負の値にとる。

### 1.3.2 せん断応力

図1.2のように、物体の二つの面にたがいに逆向きの外力 $P$ が作用する場合を考える。この場合、図1.2のように、仮想断面（外力と平行にとる）にはこれに平行な内力 $F$ が発生する。この内力 $F$ をせん断力（shearing force）とよび、仮想断面の断面積 $A$ で割ることでせん断応力（shearing stress）を求めることができる。すなわち、せん断応力 $\tau$ は

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1.2)$$

で表される。せん断応力の例は、はさみで切断されている紙や、人間がぶら下がっている鉄棒など、日常でも随所に見られる。

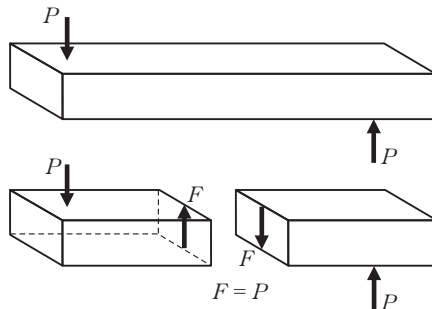


図1.2 せん断荷重が作用する角棒

**例題1.1** 直径10 mmの丸棒に引張りの垂直荷重1 kNが加わっている。この丸棒に生じる垂直応力を求めよ。

## 6 1. 応力とひずみ

**解答** 垂直応力は式(1.1)より求められる。丸棒の断面積  $A$  は直径を  $d$  とおくと

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

で求まる。よって  $\sigma$  は

$$\sigma = \frac{W}{A} = \frac{W}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4W}{\pi d^2} = \frac{4 \times 1000 \text{ N}}{\pi \times (10 \text{ mm})^2} = 12.7 \text{ N/mm}^2 = 12.7 \text{ MPa}$$

となる。

**例題 1.2** 図 1.3 のような直径 8 mm のリベットに、15 kN のせん断力が作用している。このときリベットに生じるせん断応力はいくらか。

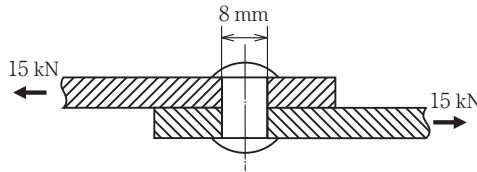


図 1.3 せん断力が作用するリベット

**解答** この場合、せん断を受ける面はリベットの横断面である。したがって、リベットの直径を  $d$  とおくと、せん断応力は式(1.2)より

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4F}{\pi d^2} = \frac{4 \times (15 \times 10^3) \text{ N}}{\pi \times (8 \text{ mm})^2} = 298 \text{ N/mm}^2 = 298 \text{ MPa}$$

となる。

## 1.4 ひずみ

いま、図 1.1 のような丸棒の引張りについてもう一度考える。この丸棒は外力が加わる前と比較して長さが増加する。このような材料の変形量を**伸び**(elongation)とよぶ。いま、長さが異なる 2 本の丸棒に同じ荷重を負荷した場合、伸びの量は長い棒の方が大きくなる。このため、物体の変形量を一般化し

で考えるための指標を導入することが重要となる。この指標を**ひずみ** (strain) といい、変形量 (伸び) を元の長さで割って求める。ひずみも応力同様、垂直ひずみとせん断ひずみに大別される。つぎにこれらについて具体的に述べる。

### 1.4.1 垂 直 ひ ず み

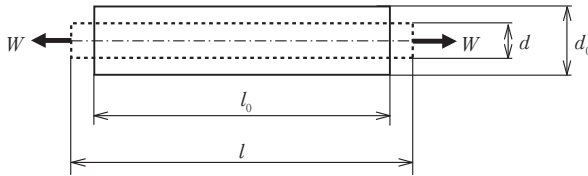
材料の軸方向に荷重が作用した場合に発生する伸びを、変形前の長さで割って求めたひずみを**垂直ひずみ** (normal strain) または**縦ひずみ** (longitudinal strain) といい、記号  $\varepsilon$  で表す。図 1.4 は、引張りと圧縮の場合のひずみを示したものである。変形前の長さ  $l_0$  の丸棒が引張りの荷重によって長さ  $l$  に変形した場合、伸び (圧縮の場合は縮み)  $\lambda$  は以下ようになる。

$$\lambda = l - l_0 \tag{1.3}$$

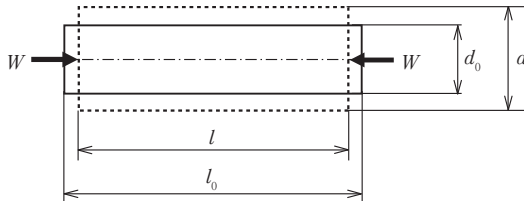
よって、垂直ひずみは

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\lambda}{l_0} \tag{1.4}$$

で表される。 $\varepsilon$  は長さの比であり無次元量であるが、100 倍してパーセントで表すことも多い。



(a) 引張り



(b) 圧縮

図 1.4 引張り・圧縮荷重によって変形した丸棒の形状

**例題 1.3** 長さ 3 m の丸棒が引張り荷重を受けて 0.5 mm 伸びた。この丸棒に生じる垂直ひずみを求めよ。

**解答** 垂直ひずみは式 (1.4) より求められる。したがって

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{l_0} = \frac{0.5 \text{ mm}}{3 \text{ m}} = \frac{0.5 \text{ mm}}{3000 \text{ mm}} = 1.67 \times 10^{-4} = 1.67 \times 10^{-2} \%$$

となる。

### 1.4.2 横ひずみとポアソン比

1.3 節で示したように、材料に引張荷重を加えると、軸方向には伸び  $\lambda$  が発生する。一方、図 1.4 に示すように、軸方向に対して  $90^\circ$  の方向（すなわち幅方向）には縮み  $\lambda'$  が生じて、断面寸法が減少する。この断面の寸法変化を表す指標が**横ひずみ** (lateral strain) である。幅  $b_0$  の材料に引張荷重を与え、幅が  $b$  に変化した場合、横ひずみ  $\varepsilon'$  は以下の式で求められる。

$$\varepsilon' = \frac{b - b_0}{b_0} = \frac{\lambda'}{b_0} \quad (1.5)$$

また、材料が図 1.1 や図 1.4 に示した丸棒のように円形断面を有する場合、式 (1.5) は変形前後の直径  $d_0$  および  $d$  を用いてつぎのように求められる。

$$\varepsilon' = \frac{d - d_0}{d_0} = \frac{\lambda'}{d_0} \quad (1.6)$$

なお、断面方向に縮みが生じるのは、この面に圧縮応力が作用しているためではないことに注意が必要である。垂直ひずみと横ひずみの比は材料固有であることが知られている。この比  $\nu$  を**ポアソン比** (Poisson's ratio) とよび、以下の式で表す。

$$\nu = -\frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \quad (1.7)$$

式 (1.7) のように、通常  $\nu$  は正の値で表す。 $\nu$  の値の範囲は  $0 \leq \nu \leq 0.5$  であり、多くの金属材料の  $\nu$  は約 0.3 であることが実験によって明らかにされている。代表的な金属材料の  $\nu$  の値は、巻末の“付表 6”を参照されたい。

**例題 1.4** 長さ 1 m, 直径 100 mm の丸棒に引張荷重を加えたところ, 0.5 mm 伸びた。この材料のポアソン比が 0.3 である場合, 変形後の直径はどれだけ変化するか求めよ。

**解答** ポアソン比の定義式 (1.7) に式 (1.4), 式 (1.6) を代入すると次式を得る。

$$\nu = -\frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = -\frac{\frac{\lambda'}{d_0}}{\frac{\lambda}{l_0}} = -\frac{\lambda' l_0}{\lambda d_0}$$

これを  $\lambda'$  について整理すると

$$\lambda' = -\frac{\lambda d_0 \nu}{l_0}$$

となる。したがって

$$\lambda' = -\frac{0.5 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 0.3}{1000 \text{ mm}} = -1.50 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

となり, 直径は  $1.5 \times 10^{-2} \text{ mm}$  小さくなる。

### 1.4.3 せん断ひずみ

高さ  $l$  の物体にせん断力  $F$  が作用した結果, 図 1.5 のように変形した場合を考える。このとき, 上の面は変形前の位置から  $\lambda_s$  だけずれることになる。このようなずれの大きさを表すのがせん断ひずみ (shearing strain)  $\gamma$  であり, 以下の式で求める。

$$\gamma = \frac{\lambda_s}{l} = \tan \phi \quad (1.8)$$

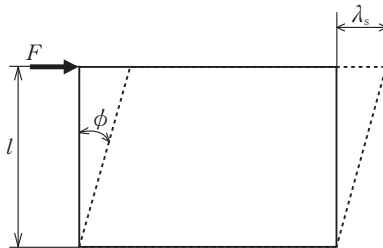


図 1.5 せん断力によって変形した物体

ここで、 $\phi$  は変形前の形状からのずれ角を表す。弾性変形のように変形量が小さい場合は  $\phi$  も小さくなるため、 $\tan \phi = \phi$  から

$$\lambda_s = l\phi \quad (1.9)$$

と考えることができる。よって

$$\phi = \frac{\lambda_s}{l} \quad (1.10)$$

となり、その結果式 (1.8) は

$$\gamma = \phi \text{ [rad]} \quad (1.11)$$

と表すこともできる。

# 索 引

	<p><b>【あ】</b></p> <p>圧縮 5, 7</p> <p>圧縮残留応力 243, 255</p> <p>圧縮強さ 227</p> <p>安全率 19</p> <p>安定な釣合い 203</p> <p><b>【い】</b></p> <p>一様断面 68</p> <p>一端固定他端回転 206</p> <p>一端固定他端自由 206</p> <p>一般化フックの法則 182</p> <p>移動荷重 57</p> <p>異方性材料 2</p> <p>入込み 235</p> <p><b>【う】</b></p> <p>ウェブ 76</p> <p>薄肉円筒 152</p> <p>薄肉球殻 155</p> <p><b>【え】</b></p> <p>永久ひずみ 13</p> <p>影響係数 166</p> <p>エネルギー解放率 252</p> <p>円周方向応力 152, 155</p> <p>延性材料 15, 193, 226, 232</p> <p><b>【お】</b></p> <p>オイラーの公式 205, 209</p> <p>オイラー・バルヌーイの仮定 63</p> <p>応力 4</p> <p>応力-ひずみ線図 12</p>	<p>応力-ひずみ曲線 14, 15, 257</p> <p>応力解析 11</p> <p>応力拡大係数 248</p> <p>応力拡大係数範囲 253</p> <p>応力緩和 257, 262</p> <p>応力集中 20, 239</p> <p>応力集中係数 20, 242</p> <p>応力振幅 237, 239</p> <p>応力幅 237</p> <p>応力比 238</p> <p>応力腐食割れ 264</p> <p><b>【か】</b></p> <p>開口型 246</p> <p>回転支持 25</p> <p>外乱 203</p> <p>外力 1</p> <p>下限界応力拡大係数範囲 254</p> <p>加工硬化 13</p> <p>下降伏点 13</p> <p>重ね合わせの原理 3, 46, 123</p> <p>荷重 1</p> <p>荷重-伸び線図 12</p> <p>カスチリアノの定理 169</p> <p>加速クリープ 259</p> <p>片振り 238, 253</p> <p>片持ちはり 26, 30, 99, 170</p> <p>カップアンドコーン型破壊 15</p> <p>加法定理 73</p> <p>環境強度 264</p>	<p>完全焼なまし銅 244</p> <p><b>【き】</b></p> <p>機械設計 2</p> <p>危険断面 68</p> <p>境界条件 204</p> <p>強度設計 11</p> <p>共役せん断応力 181</p> <p>極限強さ 13</p> <p>極断面係数 137, 141</p> <p>曲率半径 65</p> <p>許容応力 18</p> <p>切欠き感度係数 242</p> <p>切欠き係数 241</p> <p>き裂 246</p> <p>——の開閉口挙動 255</p> <p>——の基本変形様式 246</p> <p>き裂開口変位 251</p> <p>き裂進展寿命 254</p> <p>き裂進展速度 253</p> <p>き裂先端 247</p> <p>き裂先端開口変位 252</p> <p>き裂長さ 249, 254</p> <p>均質 2</p> <p><b>【く】</b></p> <p>繰返し変動荷重 2</p> <p>クリープ 258</p> <p>クリープ曲線 258</p> <p>クリープ限度 259</p> <p>クリープ破断 259</p> <p>クリープ破断曲線 260</p> <p>クリープひずみ 257</p> <p>クリープひずみ速度 260</p> <p>クリープ変形の構成式 260</p>
--	--	--	---

		三点曲げ試験	43	寸法効果	242
<b>【け】</b>		<b>【し】</b>		<b>【せ】</b>	
形状係数	242	時間硬化則	261	静荷重	2
ゲルバー	240	軸	135	脆性材料	15, 193, 226
減法定理	73	軸線	24	静定はり	28
<b>【こ】</b>		軸方向応力	152	切断法	3, 29
コイルばね	145	軸力	4	遷移クリープ	258
高温	257	試験環境	243	遷移疲労寿命	245
高温強度	263	室温	257	線形破壊力学	246
高サイクル疲労	243, 245	修正グッドマン	240	せん断応力	5, 29, 84, 185
公称応力	12	集中荷重		せん断弾性係数	17
公称ひずみ	12	2, 26, 41, 99, 106, 114, 120		全弾性ひずみエネルギー	230
降伏	13, 226, 232	集中モーメント	27, 50	せん断ひずみ	9
降伏応力	13, 240	自由物体線図	3	せん断ひずみエネルギー	229, 232
降伏条件	227	主応力	187, 230	せん断ひずみエネルギー説	229
固定支持	25	主応力面	187	せん断力	5, 28, 61
固定支持端	117	主軸	187	せん断力影響線	59
固定はり	26	主せん断応力	188	せん断力線図	31
ゴールドン・ランキン の式	216	主せん断応力面	188	線膨張係数	219
<b>【さ】</b>		主ひずみ	188, 230	<b>【そ】</b>	
最小応力	237	純せん断応力状態	199	相当ねじりモーメント	197
最大圧縮応力	68	純せん断 (純粹せん断)	192	相当曲げモーメント	196
最大応力	237	純曲げ	48	塑性	13
最大主応力説	227, 232	小規模降伏条件	249	塑性域寸法	249, 250, 251
最大せん断応力	188	上降伏点	13	塑性ひずみ	13, 245
最大せん断応力説	228, 232	除荷	13	塑性疲労試験	244
最大せん断応力面	193	初期たわみ	211	塑性変形	226, 255
最大せん断力線図	59	ショットピーニング	243	ゾーダーベルグ	240
最大引張応力	68	真応力	13	<b>【た】</b>	
最大曲げモーメント	43	真ひずみ	14	第1期クリープ	258
最大曲げモーメント線図	59	<b>【す】</b>		第I段階	236
再負荷	13	垂直応力	4, 185	第2期クリープ	259
材料試験	11	垂直ひずみ	7	第II段階	236
材料定数	17	図心	69	第3期クリープ	259
座屈	204	ストライエイション	254	耐久限度	239
座屈応力	208	スパン	26	耐久限度線図	241
座屈荷重	205	すべり線	235		
残存すべり帯	236	すべり帯	235		
		ずれ	9		

対称面	63
対数ひずみ	14
体積弾性係数	201
体積ひずみ	201, 230
体積変化	229
耐力	15
縦弾性係数	16, 198
縦ひずみ	7
たわみ	96, 170
たわみ角	96, 170
たわみ曲線	96, 204
——の基礎式	99
単純支持	25
単純支持はり	26, 41, 106
弾性	13
弾性限度	13
弾性体	159, 168, 177
弾性定数	17
弾性ひずみ	13, 245
弾性ひずみエネルギー	158, 159, 177, 229
弾性不安定	203
弾性不安定現象	204
弾性変形	158, 177
端末条件	206
断面一次モーメント	67, 69
断面係数	68
断面二次極モーメント	71, 137, 141
断面二次半径	208
断面二次モーメント	67
断面モーメント	68

## 【ち】

中空軸	141
鑄鉄	14, 15, 193
中立軸	65
中立面	65
直交軸の定理	72

## 【つ】

突出し	235
突出しはり	52

## 【て】

低サイクル疲労	243, 245
定常クリープ	259, 261
鉄鋼材料	238
テトマイヤーの式	217
伝達動力	143
伝動軸	142

## 【と】

等クリープひずみ曲線	260
等分布荷重	2, 27
等方性材料	2
トラス構造	209
トルク	135
トレスカ	228

## 【な】

内力	3, 4
軟鋼	193

## 【ね】

ねじり	135
ねじり応力	136
ねじり剛性	137
ねじり試験	193
ねじりモーメント	135
ねじれ角	137
熱応力	219, 263
熱疲労	263
熱ラチェットイング	264

## 【の】

伸び	6
ノルトン則	261

## 【は】

破壊	193, 226
破壊力学	246
破壊力学パラメータ	251
柱	204
——の座屈	203
破損	226
破損基準	227
破断	14, 226
破断繰返し数	239
ばね指数	146
ばね定数	148
ばねの応力	145
ばねの変形	147
はり	24
パリス則	254
半径方向応力	152

## 【ひ】

ヒステリシスループ	244
ひずみ	7
ひずみエネルギー	158, 159
ひずみ硬化	13
ひずみ硬化則	261
ひずみ速度	257
引張り	5, 7
引張荷重	8
引張試験	11
引張強さ	13, 227, 240
非定常クリープ	261
非鉄金属	238
比ねじれ角	137
標点距離	12, 14
平等強さのはり	129
表面仕上げ	239
表面の仕上げ状態	242
比例限度	13
疲労	235
疲労強度	243
疲労き裂	236

疲労き裂進展寿命 246, 252  
 疲労限度 239  
 疲労限度線図 241  
 疲労試験 237  
 疲労破壊 235, 246

【ふ】

不安定な釣合い 203  
 不安定破壊 254  
 腐食疲労 264  
 不静定はり 28, 112, 123  
 不静定問題 139  
 フックの法則 16, 64, 148, 159  
 フランジ 76, 178  
 分岐点 205  
 分布荷重 2, 27, 33, 49, 61, 102, 108, 112, 117

【へ】

平均応力 230, 237, 239  
 平行軸の定理 71  
 平面応力 183, 247  
 平面ひずみ 183, 247  
 ベッチの相反定理 168  
 変形応力 257  
 変形特性 11  
 偏心 211  
 変動荷重 2

【ほ】

ポアソン比 8, 198  
 補正係数 248  
 細長比 208

ポテンシャルエネルギー 158

【ま】

曲げ応力 63, 66  
 曲げ剛性 67, 170, 204, 213  
 曲げ試験 43  
 曲げモーメント 29, 61  
 曲げモーメント影響線 59  
 曲げモーメント線図 31  
 マックスウェルの相反定理 167  
 真直はり 24  
 丸軸 135  
 —のねじり試験 194  
 マンソン・コフィン則 245

【み】

ミーゼス 229  
 —の降伏条件 232, 250  
 密巻きコイルばね 146

【め】

面外せん断型 247, 246

【も】

モードⅠ 246  
 モードⅡ 246  
 モードⅢ 247  
 モールの応力円 190

【や】

ヤング率 16

【ゆ】

有効応力拡大係数範囲 255  
 有効長さ 208  
 有効細長比 208

【よ】

溶融温度 257  
 横荷重 24  
 横弾性係数 17, 198  
 横ひずみ 8  
 四点曲げ試験 48

【ら】

ラチェットひずみ 264  
 ランキン 227

【り】

力学的性質 2  
 両端回転 206  
 両端固定 206  
 両端支持はり 26, 41, 106  
 両振り 238  
 リラクセーション 262  
 リラクセーション曲線 263  
 臨界荷重 204  
 臨界値 254

【れ】

冷間加工 243  
 冷間加工鋼 244  
 連続はり 26

COD 251  
 CTOD 252

H形鋼 93  
 I形鋼 93

J積分 252, 255  
 S-N曲線 238, 239

— 著者略歴 —

**戸伏 壽昭** (とぶし ひさあき)

1969年 九州工業大学工学部機械工学科卒業  
1974年 名古屋大学大学院工学研究科博士課程単位取得退学 (機械工学専攻)  
1975年 愛知工業大学講師  
1976年 工学博士 (名古屋大学)  
1979年 愛知工業大学助教授  
1991年 愛知工業大学教授  
現在に至る

**池田 忠繁** (いけだ ただしげ)

1988年 名古屋大学工学部航空学科卒業  
1990年 名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了 (航空工学専攻)  
1993年 名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程単位取得退学 (航空工学専攻)  
1993年 通商産業省工業技術院機械技術研究所勤務  
1994年 博士 (工学) (名古屋大学)  
1995年 名古屋大学講師  
1998年 名古屋大学助教授  
2007年 名古屋大学准教授  
現在に至る

**小野 勇一** (おの ゆういち)

1995年 鳥取大学工学部機械工学科卒業  
1997年 鳥取大学大学院工学研究科博士前期課程修了  
1997年 三菱重工業株式会社勤務  
2000年 鳥取大学助手  
2006年 博士 (工学) (鳥取大学)  
2011年 鳥取大学准教授  
現在に至る

**稲葉 忠司** (いなば ただし)

1991年 三重大学大学院工学研究科修士課程修了 (機械材料工学専攻)  
1991年 美和ロック株式会社勤務  
1995年 三重大学助手  
2000年 博士 (工学) (三重大学)  
2001年 三重大学助教授  
2009年 三重大学教授  
現在に至る

**竹市 嘉紀** (たけいち よしのり)

1993年 名古屋工業大学工学部生産システム工学科卒業  
1997年 名古屋工業大学大学院工学研究科博士後期課程修了 (生産システム工学専攻)  
博士 (工学) (名古屋工業大学)  
1997年 豊橋技術科学大学助手  
2003年 豊橋技術科学大学講師  
2009年 豊橋技術科学大学准教授  
現在に至る

**松井 良介** (まつい りょうすけ)

2009年 広島大学大学院工学研究科博士課程後期修了 (機械システム工学専攻)  
2009年 博士 (工学) (広島大学)  
2009年 株式会社ブリヂストン勤務  
2012年 愛知工業大学講師  
2014年 愛知工業大学准教授  
現在に至る

# 材 料 力 学

— 機械設計の基礎 —

Strength of Materials — Fundamentals of Mechanical Design —

© Tobushi, Inaba, Ikeda, Takeichi, Ono, Matsui 2014

2014年4月30日 初版第1刷発行



検印省略

著 者	戸 伏 壽 昭 稲 葉 忠 司 池 田 忠 繁 竹 市 嘉 紀 小 野 勇 一 松 井 良 介
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 978-4-339-04635-9

(高橋)

(製本：グリーン)

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