

材料力学 (増補)

— 機械設計の基礎 —

工学博士 戸伏 壽昭

博士(工学) 稲葉 忠司

博士(工学) 池田 忠繁

博士(工学) 竹市 嘉紀

博士(工学) 小野 勇一

博士(工学) 松井 良介

共著

コロナ社

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

増補にあたって

本書は多くの大学で材料力学の教科書として使用されてきた。初版では材料力学の基礎に重点を置いて説明したが、機械要素の設計に必要なより多くの課題を解決するための内容を補充するために、増補版ではつぎの項目を追加した。

まず、円形でない断面を持つ棒をねじる場合、横断面は平面を保つことができず、軸方向にもゆがみが生じるため、円形断面の丸軸をねじる場合に用いた仮定は成立せず、解析は複雑になる。6.5節において、楕円形断面と長方形断面を持つ棒について、最大ねじり応力を示す。

つぎに、外径と内径の比が大きい厚肉円筒の場合、応力は半径方向の位置に依存して変化する。7.3節において、厚肉円筒に内圧が作用する場合についての応力分布を示す。

一方、機械では円柱や円筒の形状をした要素が多く使用される。これらの要素の強度を考える場合に必要な円柱座標での応力成分を9.4節において示す。

さらに、機械設計において重要な弾性と塑性、粘弾性、硬さ、残留応力および複合材料、傾斜機能材料、インテリジェント材料、多孔質材料の力学的機能特性について15章において説明する。

なお、追加したこれらの項目の執筆はおもに戸伏と松井が担当した。

増補版が学生および技術者の学習に役立ち、新しい機械の開発に貢献することを期待する。

2020年9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

6.5 円形でない断面を持つ棒のねじり	151
6.5.1 楕円形断面の棒のねじり	152
6.5.2 長方形断面の棒のねじり	152
引用・参考文献	153

7 円筒および球殻

7.1 薄肉円筒	154
7.2 薄肉球殻	157
7.3 厚肉円筒	159

8 ひずみエネルギー

8.1 仕事とひずみエネルギー	161
8.2 引張りと圧縮によるひずみエネルギー	162
8.3 せん断によるひずみエネルギー	163
8.4 一般化力によるひずみエネルギー	164
8.4.1 曲げによるひずみエネルギー	165
8.4.2 ねじりによるひずみエネルギー	166
8.5 相反定理	168
8.6 カスチリアノの定理	171
8.7 衝撃荷重	180

9 組合せ応力

9.1 3次元における応力とひずみ	183
9.1.1 3次元の応力成分	183
9.1.2 応力とひずみの関係	184
9.1.3 3次元問題の2次元化	185

9.2 傾斜面上の応力	188
9.2.1 垂直応力とせん断応力	188
9.2.2 主 応 力	189
9.2.3 主せん断応力	191
9.2.4 モールの応力円	192
9.2.5 曲げとねじりの組合せ	197
9.3 弾性定数間の関係と体積弾性係数	201
9.3.1 弾性定数間の関係	201
9.3.2 体積弾性係数	203
9.4 円柱座標における応力	206

10 柱 の 座 屈

10.1 安定と不安定	207
10.2 座 屈 荷 重	208
10.3 種々の端末条件をもつ柱の座屈	210
10.4 荷重の偏心や初期たわみを有する柱の座屈	215
10.4.1 偏 心 の 影 響	215
10.4.2 初期たわみの影響	217
10.5 座屈の設計公式	219
10.5.1 ゴールドン・ランキンの式	220
10.5.2 テトマイヤーの式	220

11 熱 応 力

11.1 棒 の 熱 応 力	223
11.2 熱応力に関する例題	224

12 破 損 の 法 則

12.1 破 損 基 準	230
12.2 最大主応力説	231
12.3 最大せん断応力説	232
12.4 せん断ひずみエネルギー説	233

13 疲 勞

13.1 $S-N$ 曲 線	239
13.1.1 疲労破壊の過程	239
13.1.2 疲 勞 試 験	241
13.1.3 $S-N$ 曲 線	242
13.1.4 $S-N$ 曲線に影響を及ぼす因子	243
13.2 $\epsilon-N$ 曲 線	247
13.2.1 高サイクル疲労と低サイクル疲労	247
13.2.2 $\epsilon-N$ 曲 線	249
13.3 疲労破壊への破壊力学の適用	250
13.3.1 き裂先端の応力	250
13.3.2 応力拡大係数	252
13.3.3 き裂先端塑性域	253
13.3.4 その他の破壊力学パラメータ	255
13.3.5 疲労き裂進展寿命の評価	256
引用・参考文献	260

14 高温における変形と強度

14.1	高温における変形	261
14.2	クリープ	262
14.2.1	クリープ変形	262
14.2.2	クリープ変形の構成式	264
14.3	リラクセーション	266
14.4	高温強度	267
	引用・参考文献	268

15 機械材料の力学的性質

15.1	弾性と塑性	269
15.2	粘弾性	272
15.3	硬さ	274
15.4	残留応力	275
15.5	力学的機能材料の性質	275
15.5.1	複合材料	275
15.5.2	傾斜機能材料	276
15.5.3	インテリジェント材料	277
15.5.4	多孔質材料	277
	引用・参考文献	278
付	録	279
索	引	282

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** (strength of materials) 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。

(1) **均質性** 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。

(2) **等方性** 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。

(3) **微小変形** 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。

(4) **重ね合わせの原理** 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える。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**（method of section）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

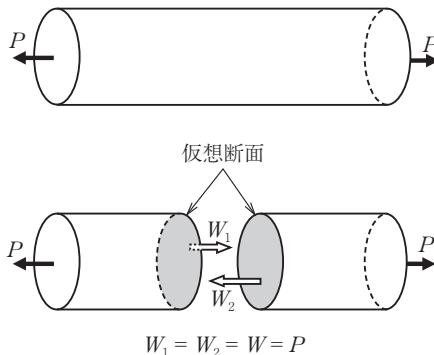


図 1.1 引張荷重が作用する丸棒

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 [m²] で割ることによって求められる。よって応力の単位は [N/m²] (= [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/mm²] (= [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) σ 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 τ 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。

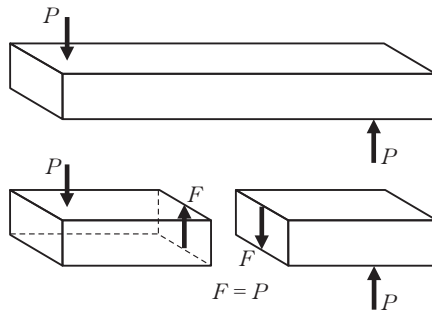


図1.2 せん断荷重が作用する角棒

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。

索 引

【あ】	オイラー・ベルヌーイの仮定 63 応 力 4 応力緩和 261, 266, 272 応力-ひずみ線図 12, 248, 270, 271 応力-ひずみ曲線 14, 15, 261 応力解析 11 応力拡大係数 252 応力拡大係数範囲 257 応力緩和 261, 266 応力集中 20, 243 応力集中係数 20, 246 応力振幅 241, 243 応力幅 241 応力比 242 応力腐食割れ 268	片振り 242, 257 片持ちはり 26, 30, 99, 173 カップアンドコーン型破壊 15 加法定理 73 ガラス繊維強化プラスチック 276 環境強度 268 完全焼なまし銅 248 緩和時間 273
【い】	一様断面 68 一端固定他端回転 210 一端固定他端自由 210 一般化フックの法則 185 移動荷重 57 異方性材料 2 入込み 239 インテリジェント材料 277	【き】
【う】	【か】	機械設計 2, 19 機械要素 19 危険断面 68 境界条件 208 強度設計 11 共役せん断応力 184 極限強さ 13 極断面係数 137, 141 曲率半径 65 許容応力 18 切欠き感度係数 246 切欠き係数 245 き 裂 250 — の開閉口挙動 259 — の基本変形様式 250 き裂開口変位 255 き裂進展寿命 258 き裂進展速度 257 き裂先端 251 き裂先端開口変位 256 き裂長さ 253, 258 均 質 2
【え】	開口型 250 回転支持 25 外 乱 207 外 力 1 下限界応力拡大係数範囲 258 加工硬化 13, 270 下降伏点 13 重ね合わせの原理 3, 46, 123, 271 荷 重 1 荷重-伸び線図 12 カスチリアノの定理 172 加速クリープ 263 硬 さ 274	ウェブ 76 薄肉円筒 154 薄肉球殻 157
【お】	永久ひずみ 13 影響係数 169 エネルギー解放率 256 円周方向応力 154, 157, 160, 206 延性材料 15, 196, 230, 236 円柱座標 206	オイラーの公式 209, 213

【く】

繰返し変動荷重 2
 クリープ 262, 273
 クリープ曲線 262
 クリープ限度 263
 クリープ破断 263
 クリープ破断曲線 264
 クリープひずみ 261
 クリープひずみ速度 264
 クリープ変形の構成式 264

【け】

傾斜機能材料 276
 形状記憶合金 277
 形状記憶ポリマー 277
 形状係数 246
 ゲルパー 244
 減法定理 73

【こ】

剛性 271
 構成式 271
 コイルばね 145
 高温 261
 高温強度 267
 高サイクル疲労 247, 249
 公称応力 12
 公称ひずみ 12
 降伏 13, 230, 236, 269
 降伏応力 13, 244, 269, 270
 降伏条件 231, 270
 固定支持 25
 固定支持端 117
 固定はり 26
 ゴールドン・ランキン の式 220

【さ】

最小応力 241
 最大圧縮応力 68

最大応力 241
 最大主応力説 231, 236
 最大せん断応力 191
 最大せん断応力説 232, 236
 最大せん断応力面 196
 最大せん断力線図 59
 最大引張応力 68
 最大曲げモーメント 43
 最大曲げモーメント線図 59
 再負荷 13
 材料試験 11
 材料定数 17
 材料力学 1
 座屈 208
 座屈応力 212
 座屈荷重 209
 散逸仕事 270
 残存すべり帯 240
 三点曲げ試験 43
 3要素標準線形模型 273
 残留応力 275

【し】

時間硬化則 265
 軸 135
 軸線 24
 軸方向応力 154, 206
 軸力 4
 試験環境 247
 室温 261
 修正グッドマン 244
 集中荷重 2, 26, 41, 99, 106, 114, 120
 集中モーメント 27, 50
 自由物体線図 3
 主応力 190, 234
 主応力面 190
 主軸 190
 主せん断応力 191
 主せん断応力面 191
 主ひずみ 191, 234

純せん断応力状態 202
 純せん断 (純粋せん断) 195
 純曲げ 48
 ショア硬さ試験 274
 小規模降伏条件 253
 衝撃荷重 177
 上降伏点 13
 除荷 13
 初期たわみ 215
 ショットピーニング 247, 275
 真応力 13
 靱性 272
 真ひずみ 14

【す】

垂直応力 4, 188
 垂直ひずみ 7
 図心 69
 ストライエーション 258
 スパン 26
 すべり線 239
 すべり帯 239
 ずれ 9
 スマート材料 277
 寸法効果 246

【せ】

静荷重 2
 脆性材料 15, 196, 230
 静定はり 28
 静的な荷重 177
 切断法 3, 29
 繊維強化プラスチック 276
 遷移クリープ 262
 遷移疲労寿命 249
 線形破壊力学 250
 せん断応力 5, 29, 84, 188
 せん断弾性係数 17
 全弾性ひずみエネルギー 234
 せん断ひずみ 9

せん断ひずみエネルギー	233, 236	単純支持はり	26, 41, 106	伝動軸	142
せん断ひずみエネルギー説	233	弾性	13, 269	【と】	
せん断力	5, 28, 61	弾性限度	13	等クリープひずみ曲線	264
せん断力影響線	59	弾性体	162, 171, 180	等分布荷重	2, 27
せん断力線図	31	弾性定数	17, 201	等方性材料	2
線膨張係数	223	弾性ひずみ	13, 249, 271	トラス構造	213
【そ】		弾性ひずみエネルギー	161, 162, 180, 233	トルク	135
相当ねじりモーメント	200	弾性不安定	207	トレスカ	232
相当曲げモーメント	199	弾性不安定現象	208	【な】	
塑性	13, 269	弾性変形	161, 180, 269	内部応力	275
塑性域寸法	253, 254, 255	炭素繊維強化プラスチック	276	内力	3, 4
塑性ひずみ	13, 249	端末条件	210	軟鋼	12, 15, 196, 271
塑性疲労試験	248	断面一次モーメント	67, 69	【ね】	
塑性変形	230, 259	断面係数	68	ねじり	135, 197
ゾーダーベルグ	244	断面二次極モーメント	71, 137, 141	ねじり応力	136, 196, 197, 206, 236
【た】		断面二次半径	212	ねじり剛性	137
第1期クリープ	262	断面二次モーメント	67	ねじり試験	195
第1段階	240	断面モーメント	68	ねじりモーメント	135, 197
第2期クリープ	263	【ち】		ねじれ角	137
第II段階	240	遅延時間	273	熱応力	223, 267
第3期クリープ	263	知的材料	277	熱疲労	267
耐久限度	243	中空軸	141	熱ラチェットイング	268
耐久限度線図	245	鋳鉄	14, 15, 196	粘弾性	272
対称面	63	中立軸	65	【の】	
対数ひずみ	14	中立面	65	伸び	6
体積弾性係数	204	直交軸の定理	72	ノルトン則	265
体積ひずみ	204, 234	【つ】		【は】	
体積変化	233	突出し	235	バウシinger効果	270
耐力	15	突出しはり	52	破壊	196, 230
多孔質材料	277	【て】		破壊力学	250
縦弾性係数	16, 201	低サイクル疲労	247, 249	破壊力学パラメータ	255
縦ひずみ	7	定常クリープ	263, 265	柱	208
たわみ	96, 173	鉄鋼材料	242	—の座屈	207
たわみ角	96, 173	テトマイヤーの式	221	破損	230
たわみ曲線	96, 208	伝達動力	143	破損基準	231
—の基礎式	99				
単純支持	25				

破断	14, 230	疲労破壊	239, 250	曲げモーメント影響線	59
破断繰返し数	243			曲げモーメント線図	31
ハニカム構造	277	【ふ】		マックスウェルの相反定理	170
ばね指数	146	不安定な釣合い	207	マックスウェル模型	272
ばね定数	148	不安定破壊	258	真直はり	24
ばねの応力	145	フォークト・ケルビン模型	273	丸 軸	135
ばねの変形	147			——のねじり試験	197
はり	24	複合材料	275	マンソン・コフィン則	249
パリス則	258	腐食疲労	268		
半径方向応力	152, 160, 206	不静定はり	28, 112, 123	【み】	
		不静定問題	139	ミーゼス	233
【ひ】		フックの法則	16, 64, 136, 148, 162	——の降伏条件	236, 254
比強度	276	フランジ	76, 181	密巻きコイルばね	146
ヒステリシスループ	248	ブリネル硬さ試験	274	【め】	
ひずみ	7	分岐点	209	面外せん断型	250, 251
ひずみエネルギー	161, 162, 269	分布荷重	2, 27, 33, 49, 61, 102, 108, 112, 117	【も】	
ひずみ硬化	13, 248			モードⅠ	250
ひずみ硬化則	265	【へ】		モードⅡ	250
ひずみ速度	261	平均応力	234, 241, 243	モードⅢ	251
ひずみ軟化	248	平行軸の定理	71	モールの応力円	193
ビッカース硬さ試験	274	平面応力	186, 251	【や】	
引張り	5, 7	平面ひずみ	186, 251	ヤング率	16
引張荷重	8	ベッチの相反定理	171	【ゆ】	
引張試験	11	変形応力	261	有効応力拡大係数範囲	259
引張強さ	13, 231, 243, 244	変形特性	11, 261	有効長さ	212
非定常クリープ	265	偏 心	215	有効細長比	212
非鉄金属	242	変動荷重	2	【よ】	
比ねじれ角	137	【ほ】		溶融温度	261
標点距離	12, 14	ポアソン比	8, 201	横荷重	24
平等強さのはり	129	補正係数	252	横弾性係数	17, 137, 201
表面仕上げ	243	細長比	212	横ひずみ	8
表面の仕上げ状態	246	ポテンシャルエネルギー	161	四点曲げ試験	48
比例限度	13	【ま】		【ら】	
疲 労	239	曲げ応力	63, 66, 197, 236	ラーソン・ミラー法	264
疲労強度	247	曲げ剛性	67, 173, 208, 217		
疲労き裂	240	曲げ試験	43		
疲労き裂進展寿命	250, 256	曲げモーメント	29, 61, 197		
疲労限度	243				
疲労限度線図	245				
疲労試験	241				

ラチェットひずみ	268	両振り	242		
ランキン	231	リラクセーション	266	【れ】	
		リラクセーション曲線	267	冷間加工	247
【り】		履歴依存	248, 270	冷間加工銅	248
力学的性質	2, 269	臨界荷重	208	連続はり	26
両端回転	210	臨界値	258		
両端固定	210			【ろ】	
両端支持はり	26, 41, 106			ロックウェル硬さ試験	274
◆					
COD	255	H形鋼	93	J積分	256, 259
CTOD	256	I形鋼	93	S-N曲線	242, 243

— 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
2017年 愛知工業大学名誉教授

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
2017年 中部大学教授
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
2016年 鳥取大学教授
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)
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), 博士 (工学)
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 (増補) — 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

2020年11月5日 初版第6刷発行 (増補)

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
製本所	有限会社 愛千製本所

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 <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04668-7 C3053 Printed in Japan

(大井)



JCOPY

<出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構 (電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp) の許諾を得てください。

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います。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いません。落丁・乱丁はお取替えいたします。