機械系コアテキストシリーズ

A-1

材料力学

渋谷陽二・中谷彰宏
共著

コロナ社

機械系コアテキストシリーズ A-1

材　料　力　学

渋谷 陽二・中谷 彰宏
共著

コロナ社

刊行のことば

このたび，新たに機械系の教科書シリーズを刊行することになった。

シリーズ名称は，機械系の学生にとって必要不可欠な内容を含む標準的な大学の教科書作りを目指すとの編集方針を表現する意図で「機械系コアテキストシリーズ」とした。本シリーズの読者対象は我が国の大学の学部生レベルを想定しているが，高等専門学校における機械系の専門教育にも使用していただけるものとなっている。

機械工学は，技術立国を目指してきた明治から昭和初期にかけては力学を中心とした知識体系であったが，高度成長期以降は，コンピュータや情報にも範囲を広げた知識体系となった。その後，地球温暖化対策に代表される環境保全やサステイナビリティに関連する分野が加わることになった。

今日，機械工学には，個別領域における知識基盤の充実に加えて，個別領域をつなぎ，領域融合型イノベーションを生むことが強く求められている。本シリーズは，このような社会からの要請に応えられるような人材育成に資する企画である。

本シリーズは，以下の 5 分野で構成され，学部教育カリキュラムを構成している科目をほぼ網羅できるように刊行を予定している。

A：「材料と構造」分野

B：「運動と振動」分野

C：「エネルギーと流れ」分野

D：「情報と計測・制御」分野

E：「設計と生産・管理」分野

また，各教科書の構成内容および分量は，半期 2 単位，15 週間の 90 分授業を想定し，自己学習支援のための演習問題も各章に配置している。

工学分野の学問内容は，時代とともにつねに深化と拡大を遂げる。その深化と拡大する内容を，社会からの要請を反映しつつ高等教育機関において一定期間内で効率的に教授するには，周期的に教育項目の取捨選択と教育順序の再構成が必要であり，それを反映した教科書作りが必要である。そこで本シリーズでは，各巻の基本となる内容はしっかりと押さえたうえで，将来的な方向性も見据えることを執筆・編集方針とし，時代の流れを反映させるため，目下，教育・研究の第一線で活躍しておられる先生方を執筆者に選び，執筆をお願いしている。

「機械系コアテキストシリーズ」が，多くの機械系の学科で採用され，将来のものづくりやシステム開発にかかわる有為な人材育成に貢献できることを編集委員一同願っている。

2017 年 3 月

編集委員長　金子 成彦

まえがき

本書は，力学と基礎数学（微分積分学，線形代数学）を学んだ学部学生を対象として書かれた，主として機械工学や理論応用力学そして材料科学を学ぶ学生のための材料力学の教科書である。材料力学の学びにより，構造物設計に必要な変形と強度の概念や評価法を修得できるだけでなく，固体力学や材料科学の分野のフロンティアに関わる諸問題への糸口を見出すことができる。前者の学びでは，変形や強度の考え方の道筋が辿(たど)れる知力を身に付けるだけでなく，さまざまな問題を実際に最後まで解くことを通じて，将来ものづくりに携わる技術者としての感性を養うこともできる。また，材料力学には理論応用力学の基礎としての考え方が豊富にあり，後者の学びは数学，物理学のみならず，さまざまな新しい学問体系の礎になる。先人の苦悩やひらめきを知るとともに，工学の今後の有り方の道標をみることができる。

材料力学の対象は多岐にわたり，1 冊の本でそのすべてをカバーすることは困難である。本書では，まず技術者・研究者として実務に携わる前に身に付けておくべき構造健全性の考え方と，構造物を理想化・単純化した上で簡単な数理モデルに置き換え，解を求めるための方法について記述している。理論的に明解な解析法を取り上げ，これを用いた簡単な計算例を示すとともに，実務で使われている解法についても紹介する。有限要素解析をはじめとする高度な数値解析法が日常的に使われている昨今においても，少なくとも問題の概略をつかむ（見通しをよくする）方法が不可欠である。構造物の設計では，全体設計のイメージから詳細部の設計にバックキャストされる。その全体設計では，第一近似的でも迅速にかつ定量的な解を求めることが要求され，そのための唯一

の方法論が材料力学である。

本書の内容は，著者らがここ数年，大阪大学の学部学生を対象に担当してきた材料力学の講義をベースにしている。構造物の設計の考え方については，著者らの経験が多少なりとも生かされていると思う。本書の構成はきわめてオーソドックスであるが，応力とひずみの概念をしっかりと理解した上で，単軸応力状態から多軸応力状態へと展開している。2 章では材料力学の概念を用いた静力学を学び，3 章では応力とひずみの概念，4 章では棒の引張りと圧縮そしてブロックのせん断，5〜8 章ではばりの曲げとたわみ，9 章では棒のねじりについて学ぶ。そして，10 章，11 章では多軸の応力状態を，12 章ではエネルギー法に基づく解の導出を学び，13 章では構造物の安定問題としての柱の座屈を取り上げている。14 章では，それまで学んだ事項に裏付けされた安全な構造物の設計に関する評価法を習得し，構造設計の業務・研究開発に携わるための基礎が出来上がることになる。本書は，前述した二つの学びを内容としており，初学者にも既学者にも対応できる一冊に仕上げている。

本書をまとめるにあたって，大阪大学の平方寛之准教授，垂水竜一准教授，田中展助教，近藤俊之助教に貴重なコメントを頂いた。これらの先生方は，現在大阪大学工学部応用理工学科機械工学科目で行われている材料力学の講義に関係している方々であり，日頃の材料力学教育に対しても謝意を表します。

最後に，本書の執筆に関して大変お世話になりましたコロナ社に深く感謝の意を表します。

2017 年 3 月

渋谷陽二・中谷彰宏

目　次

1 章　材料力学の概念とねらい

1.1　材料力学とは　2
1.2　材料力学を学ぶ意義と部材の力学　3
1.3　材料力学を学び構造設計を行う上での留意点　5

2 章　材料力学の基礎としての静力学

2.1　力とモーメントの釣合い　8
2.2　荷重と支持点　10
　2.2.1　荷重の分類と図示方法　10
　2.2.2　支持方法の分類と図示方法　12
2.3　切断法と釣合いによる反力と内力　14
2.4　反力の計算　16
　2.4.1　単純支持はり　16
　2.4.2　固定はり　19
2.5　軸線を基準にした内力の分類（せん断力図，軸方向力図，曲げモーメント図）　21
　2.5.1　切断法による内力の同定　21
　2.5.2　せん断力　22
　2.5.3　軸方向力　24
　2.5.4　曲げモーメント　24
　2.5.5　内力の分布　25
演習問題　31

3 章 応力とひずみ

3.1 応力の定義 34
3.2 テンソルとしての応力 35
3.3 釣合いを表す微分方程式 37
3.4 ひずみの定義 38
3.5 テンソルとしてのひずみ 40
3.6 材料特性とフックの法則 42
3.7 ひずみエネルギー 49
3.8 剛性 51
演習問題 52

4 章 棒の引張りと圧縮およびブロックのせん断

4.1 棒の引張・圧縮応力 55
4.2 平均せん断応力 57
4.3 単軸応力状態の例題 58
4.4 軸力を受ける棒の不静定問題 64
4.5 熱応力 73
4.5.1 熱ひずみ 73
4.5.2 熱応力 74
4.6 衝撃応力 75
4.7 サン・ブナンの原理と応力集中 77
演習問題 81

5 章 はりの曲げ応力

5.1 曲げの公式 85
5.2 断面二次モーメント 90
5.2.1 面積，図心，断面モーメント 90
5.2.2 断面二次モーメントを求めるための軸の平行移動 91
5.2.3 断面係数と断面二次半径 93
5.2.4 各種断面形状 93
5.3 一様強さのはり 96

5.4　組合せはり　98
5.5　はりの非対称曲げ　99
5.5.1　断面相乗モーメント, 慣性主軸, 主断面二次モーメント　100
5.5.2　非対称荷重を受けるはり　102
演習問題　105

6 章　はりのたわみ

6.1　たわみの方程式　108
6.2　種々のはりのたわみ　110
6.2.1　直接積分を用いる方法（直接積分法）　110
6.2.2　たわみの基礎式を用いる方法　117
6.2.3　重ね合せの原理を用いる方法　118
6.2.4　特異関数を用いる方法　119
6.3　モーメント面積法　121
6.3.1　モーメント面積法とは　121
6.3.2　静定はりへのモーメント面積法の応用　124
演習問題　127

7 章　はりのせん断応力

7.1　せん断応力の公式　130
7.1.1　長方形断面　132
7.1.2　円形断面　133
7.2　せん断中心　134
7.3　せん断力によるはりのたわみ　135
演習問題　137

8 章　複雑なはりの問題

8.1　不静定はり　140
8.1.1　直接積分を用いる方法（直接積分法）　141
8.1.2　重ね合せの原理を用いる方法　144
8.1.3　モーメント面積法を用いる方法　145
8.1.4　連続はり　149

8.1.5 はりの極限荷重 155
8.2 曲 り は り 157
8.2.1 曲 げ 応 力 157
8.2.2 断 面 係 数 161
演 習 問 題 162

9 章 ね じ り

9.1 ねじりの公式 165
9.1.1 中実円断面の軸 165
9.1.2 中空円断面の軸 167
9.2 円形断面を有する軸のねじれ角 168
9.2.1 ね じ れ 角 168
9.2.2 断面寸法が変化する場合 168
9.2.3 伝 動 軸 169
9.3 種々のねじり問題 171
9.3.1 重ね合せの原理を用いる方法 171
9.3.2 分布モーメントが作用する問題 171
9.4 不 静 定 問 題 172
9.5 曲げとねじりの組合せ 173
9.5.1 組 合 せ 荷 重 173
9.5.2 コ イ ル ば ね 176
9.6 円形でない断面のねじり 179
9.6.1 円形でない断面の中実部材のねじり 179
9.6.2 プラントルの薄膜相似 180
9.6.3 薄肉管のねじり 181
演 習 問 題 182

10 章 応力とひずみの変換

10.1 応 力 の 変 換 185
10.2 主応力，最大せん断応力 186
10.3 モールの応力円 190
10.3.1 モールの応力円の定義 190

10.3.2　モールの応力円の描き方　192
10.3.3　三軸応力状態でのモールの応力円　194
10.4　ひずみの変換　195
10.5　モールのひずみ円　199
10.6　ひずみの計測（ロゼット解析）　202
演　習　問　題　204

11 章　回転対称殻に作用する軸対称な応力

11.1　薄肉回転対称殻の釣合い式　207
11.2　内圧を受ける薄肉円筒　210
11.3　内圧を受ける薄肉球殻　211
11.4　内外圧を受ける厚肉円筒　213
11.5　内外圧を受ける厚肉球殻　216
11.6　焼　ば　め　217
演　習　問　題　219

12 章　エネルギー法

12.1　弾性ひずみエネルギー　222
12.1.1　ひずみエネルギー密度　222
12.1.2　コンプリメンタリーひずみエネルギー密度　223
12.1.3　フックの法則と弾性ひずみエネルギー　225
12.1.4　ひずみエネルギーとコンプリメンタリーひずみエネルギー　226
12.2　カスチリアーノの定理　235
12.2.1　カスチリアーノの定理の応用　237
12.2.2　外力が作用していない点へのカスチリアーノの定理の応用　241
12.3　相　反　定　理　242
12.4　不 静 定 問 題　244
12.4.1　カスチリアーノの定理による解法　244
12.4.2　最小仕事の原理による解法　245
12.4.3　単位荷重の定理による解法　246

12.4.4 変位が与えられる問題 248
12.4.5 ラーメン構造 250
演習問題 251

13章 柱の座屈

13.1 はり柱の支配微分方程式 255
13.2 柱の安定性 258
13.3 オイラーの座屈 260
13.4 エネルギー法による座屈方程式の導出 264
13.5 種々の境界条件におけるオイラーの座屈 267
13.6 柱の座屈強度と設計 274
13.6.1 座屈強度の実験式 274
13.6.2 偏心荷重を受ける柱の座屈応力 276
演習問題 277

14章 材料の破損条件と強度設計

14.1 許容応力と安全率 280
14.2 延性破壊と脆性破壊 281
14.3 疲労破壊 283
14.4 クリープ（高温破壊） 285
14.5 衝撃破壊 287
14.6 破損則 288
14.6.1 最大せん断応力説（トレスカの条件） 288
14.6.2 最大せん断ひずみエネルギー説（ミーゼスの条件） 291
14.6.3 最大主応力説（ランキンの条件） 293
14.6.4 実験値との比較とその他の説 294
演習問題 296

引用・参考文献 298
演習問題解答 300
索引 329

1章 材料力学の概念とねらい

◆本章のテーマ

本章では，材料力学とはどのような学問で，何を学ばなければならないかについて述べる。材料力学は，形状が極端に簡単化された部材を対象にするので，詳細な構造設計のためではなく，構造全体を俯瞰する実学として位置付けられる。そのため，おのずとその適用には制限があるが，材料や構造の強度や変形の考え方を学び，剛体ではなく変形可能なものの力学挙動を理解するには最適である。そして，構造設計を行う上で重要な強度，剛性，破壊という概念について学ぶ。

◆本章の構成（キーワード）

1.1　材料力学とは
　　材料の強さ，材料に関わる力学，部材

1.2　材料力学を学ぶ意義と部材の力学
　　連続体力学，板の構造力学

1.3　材料力学を学び構造設計を行う上での留意点
　　強度，剛性，破壊

◆本章を学ぶと以下の内容をマスターできます

☞　材料力学で学ぶべきこと

☞　固体力学の枠組みの中での材料力学の位置付け

☞　強度，剛性，破壊の概念

1.1 材料力学とは

Strength of Materials か，Mechanics of Materials か

材料力学の日本語名の語源となっている英語名は，上記の Strength of Materials や Mechanics of Materials とよくいわれる。前者は「**材料の強さ**」であり，後者は「**材料に関わる力学**」と直訳される。材料力学という日本語名にどちらが適切かという問題はさておき，両者とも重要な観点であり，材料力学の研究分野の根源になっていることに違いはない。

材料の強さを知り，その特性を引き出すように設計された構造の強さと変形の理解は，素材–加工–組立の一貫したものづくりの過程と連動した関係にある。そのような意味では，上記の二つの英語名は同義語といえる。材料創成だけでは意味がなく，その材料が健全に使用され，**部材**（member；構造物の持つ機能を保証するために，外荷重に対して構造を維持する基本構成要素を部材といい，三次元の材料（バルク）から，板厚が他の寸法より十分小さな二次元的材料である面内の曲率が 0 の**板** (plate) や 0 でない**殻** (shell)，そして一つの寸法が他よりも十分大きな一次元的材料の**はり** (beam) や**棒** (bar) などが対象となる）の組合せによって機能を持つ構造物が具現化されることで，その使命を果たすことができる。そのような部材を用いて設計する過程の公理的存在が，材料力学であるといっても過言ではない。

材料の内部構造を対象にする場合，あるいは材料を部材化した，はり，棒，板，殻などを対象にする場合，それらの部材を組み合わせ，複合化・構造化することにより出来上がる構造体を対象にする場合など，階層的な設計の段階で，研究者・技術者にとって幅広く興味深いトピックスが材料力学にある。したがって，基礎学問としての材料力学は，脈々と機械工学の根幹をなし，安全で安心なものづくりを担う産業分野の根底にあるといえる。

1.2　材料力学を学ぶ意義と部材の力学

図 1.1 に示すように，18 世紀のベルヌーイ† (1700～1782) についで，オイラー (1707～1783)，コーシー (1789～1857) やナビエ (1785～1836)，ポアソン (1781～1840)，ヤング (1773～1829) などの先人により**連続体力学** (continuous mechanics) の理論構築が大きく進展し，弾性力学や流体力学への分化と発展につながった。連続体力学と同様に，**解析力学** (analytical dynamics) や**量子力学** (quantum mechanics) に大きく貢献した代表的な研究者の年譜を見ると，その特徴が見えてくる。ニュートンからラグランジュ，そしてハミルトンにより発展した解析力学は 3 世代間でバトンを渡すように学問分野が深化した一方，量

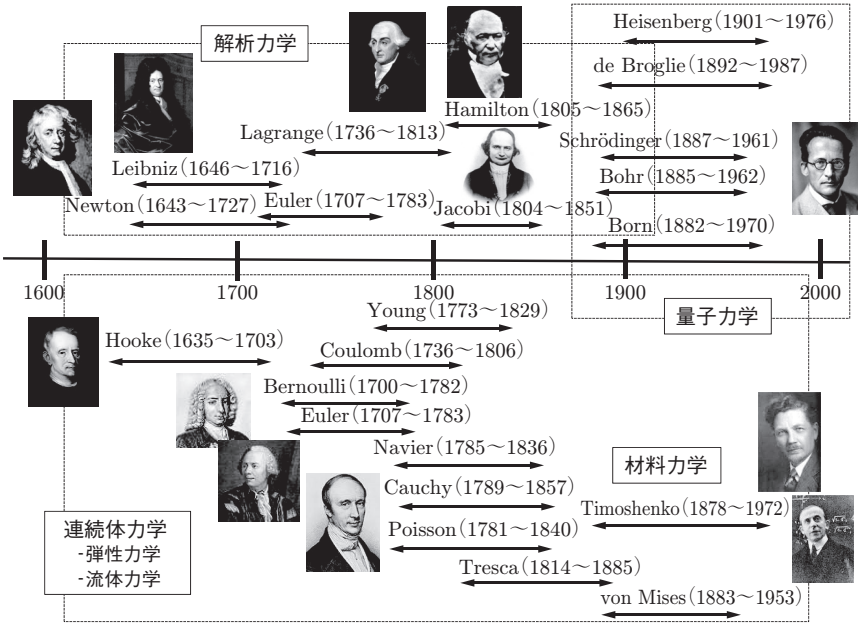

図 1.1　力学の系譜 (図中の写真は Wikipedia (https://www.wikipedia.org) より)

† ベルヌーイ (Bernoulli) 家には，自然科学に大きく貢献した三人のベルヌーイがいる。Nikolaus Bernoulli の子供として，Jacob Bernoulli (1654～1705) はベルヌーイ数や等周問題，Johann Bernoulli (1667～1748) は等時曲線，最速降下線，実体振り子の問題で有名である。そして，Johann の子供の Daniel Bernoulli (1700～1782) は流体力学の発展に大きく貢献した。

子力学は天才群が短期間に集中して相乗的に発展・深化した背景が見える。とりわけ，連続体力学は 4 世紀以上の長い歴史の過程で学術の拡がりと深みが増してきた。しかし，テンソル代数学の数学を基礎として記述可能な連続体力学は，機械設計の現場への適用に簡便さが欠ける。したがって，形状を簡単化し，その結果本来はテンソルとして 6 成分を持つ応力やひずみを 1 個のスカラーとして表現する。そして，理論を公式化することによって，実用性を格段に高めた学問が**材料力学**（strength of materials または mechanics of materials）である。簡便化の過程で用いた仮定により，おのずとその適用範囲が存在することになる。その適用範囲を十分に理解した上で，材料力学を駆使し，機械構造物の設計を行うことになる。

このような学術分野の流れを考えると，材料力学には二面性がある。一つは実学としての簡便さ，もう一つは連続体力学に通じる学術の深みである。両者を同時に学ぶことは，初学者にはかなり困難であるが，そのことを意識しながら学習することが肝要である。本書は，極力その両面を意識した内容としているが，専門分野の科目として，連続体力学，弾性力学，塑性力学，構造力学，粘弾性力学など，一連の固体力学の分野を学び終えることで，これらの集大成ができることになる。

三次元的材料のバルクを対象とした連続体力学から，さまざまな力学体系が派生してきた歴史があるが，その中で二次元的部材（板）の構造力学の進展を示したのが**図 1.2** である。直交している弦の振動としてモデル化したオイラーに始まり，ベルヌーイ，ナビエを経て板の線形理論としての枠組みが構築された。その後，面内の膜応力との連成を経て，板の大たわみの非線形基礎方程式がフォン・カルマン (1881～1963) により理論化され，板理論が出来上がったことになる。オイラーから辿(たど)れば 150 年ほどの時を経て構築されたことになる。その後，**有限要素法** (finite element method; FEM) の数値解法と計算機の発達と相まって，計算構造力学として進展し，現在に至っている。このように部材の力学には，形状が簡略化されるがゆえに，より高度な理論を導く裕度が与えられる。板理論では，幾何学的な非線形性（大たわみ）といった複雑ではあるが，より高精度な強度や変形の予測を可能にしている。

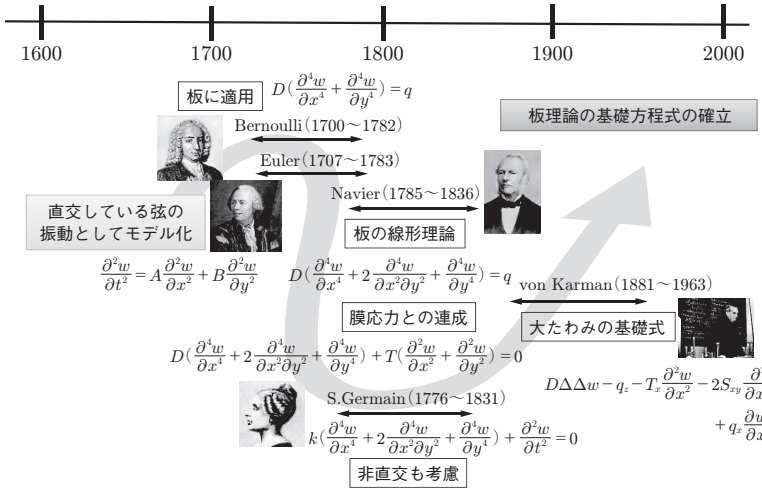

図 1.2　板の部材力学の進展（図中の写真は Wikipedia (https://www.wikipedia.org) より）

1.3　材料力学を学び構造設計を行う上での留意点

〔**1**〕 **強　　度**　構造物が壊れることなく，安全に健全性を維持できる指標として，**応力** (stress) という概念を用いる。材料力学では，実学としての簡便さのために，主として単一成分の応力が部材に作用する問題を取り扱う。しかし，複雑な境界を持つ実構造物に，複雑な荷重が作用した場合には一つの応力値だけではなく，6 個の成分を持つ量としての応力が作用する。前者を**単軸応力** (uniaxial stress)，後者を**多軸応力** (multiaxial stress) という。本書では，通常の材料力学の教科書と同様に，主として前者の応力状態を学ぶことになるが，多軸応力状態が本質であることを記憶に留めておいてほしい。その応力を評価することにより，構造物にどれくらいの外力が負荷できるかを見極めることができる。**強度** (strength) という言葉には，部材を形づくる材料が負荷に対して本質的に持つ抵抗の限界値という意味と，機能を持つ安全な構造物を設計するときに予測する応力値という意味がある。前者は与えられるものであり，後者は与えるものであるが，両者が一致するように目指すことが望ましい。

〔**2**〕 **剛　　性**　構造物に外力が作用すると**変形** (deformation) をする。

索　　引

【あ】

圧縮応力
compressive stress *35*

圧縮力
compression *21*

厚肉回転対称殻
thick shell of revolution *213*

安全率
safety factor *281*

【い】

板
plate *2, 207*

一様変形
uniform deformation *45*

一般化されたフックの法則
generalized Hooke's law *47, 226*

移動支持
sliding support *13*

【う】

上降伏点
upper yield point *44*

ヴェーラー曲線
Wöhler curve *284*

薄肉回転対称殻
thin shell of revolution *207*

【え】

永久ひずみ
permanent strain *44*

影響係数
influence factor *242*

液圧バルジ試験
hydraulic bulge test *189*

エリクセン試験
Erichsen test *189*

エンゲッサーの第一定理
Engesser's first theorem *237*

延性材料
ductile material *280*

延性–脆性遷移温度
ductile-brittle transition temperature *287*

延性破壊
ductile fracture *281*

【お】

オイラーの方程式
Euler's equation *266*

応力緩和
relaxation *285*

応力集中係数
stress concentration factor *79*

応力振幅
stress amplitude *283*

応力テンソル
stress tensor *36*

応力範囲
stress range *284*

応力比
stress ratio *284*

【か】

回転支持
pin support *13*

外部仕事
external work *49*

外　力
external force *8*

殻
shell *2, 207*

加工硬化
work hardening *45*

加工軟化
work softening *45*

重ね合せの原理
principle of superposition *18, 66, 119*

カスチリアーノの定理
Castigliano's theorem *237*

加速クリープ
accelerating creep *286*

片振り疲労試験
pulsating fatigue test *284*

片持はり
cantilever *19*

慣性主軸
principal axis of inertia *102*

【き】

ギガサイクル疲労
gigacycle fatigue *284*

基準状態
reference state *222*

基準強さ
reference strength *280*

強　度
strength *5*

極限荷重
ultimate load *156*

局所性の仮定
hypothesis of locality *222*

局所変形
localized deformation *44*

極断面係数
polar section modulus *167*

許容応力
allowable stress *280*

【く】

偶　力
couple 11

屈服座屈
limit-point buckling 277

くびれ
necking 44

組合せはり
composite beam 98

クラペイロン
——の三連モーメントの式
Clapeylon's 3 moments equation 153
——の定理
Clapayron's theorem 230

クリープ
creep 285

クリープ限度
creep limit 286

【け】

限界荷重
critical load 260

検証と妥当性確認
V&V, verification and validation 281

【こ】

高サイクル疲労
high cycle fatigue 284

公称応力
nominal stress 35

公称ひずみ
nominal strain 39

剛　性
rigidity, stiffness 6, 51

構成式
constitutive equation 42, 140

剛性マトリクス
stiffness matrix 242

構造材料
structural material 6

拘束はり
restrained beam 19

降伏応力
yield stress 44

降伏点
yield point 44

合　力
resultant force 21

固定支持
fixed support 13

固定はり
fixed beam 19

コンプライアンスマトリクス
compliance matrix 242

コンプリメンタリー仮想仕事の原理
principle of complementary virtual work 246

コンプリメンタリーひずみエネルギー
complementary strain energy 227

コンプリメンタリーひずみエネルギー密度
complementary strain energy densigy 225

【さ】

最小仕事の原理
principle of least work 237, 246

最大主応力説
maximum principal stress theory 293

最大主ひずみ説
maximum principal strain theory 295

最大せん断応力
maximum shear stress 188

最大せん断応力説
maximum shear stress theory 289

最大せん断ひずみ
maximum shear strain 201

最大せん断ひずみエネルギー説
maximum shear strain energy theory 292

細長比
slenderness ratio 273

座　屈
buckling 260

座屈応力
buckling stress 273

座屈荷重
buckling load 260

座屈方程式
buckling equation 267

座屈モード
buckling mode 268

サン・ブナンの原理
St. Venant's principle 78

サン・ブナンの条件
St. Venant criterion 295

【し】

支圧応力
bearing stress 58

軸
shaft 9

軸　線
midline 9

軸方向力
axial force 21

軸方向力図
axial force diagram 25

仕　事
work 49

システム同定
system identification 140

自然ひずみ
natural strain 39

下降伏点
lower yield point 44

絞　り
reduction 45
シャルピー試験
Charpy test 287
自由体図
free-body diagram 14
集中荷重
concentrated force 10
主応力
principal stress 187
主応力軸
principal axis of stress 187
主応力面
principal plane of stress 187
主断面二次モーメント
principal moment of inertia of area 102
主ひずみ
principal strain 200
準静的な負荷
quasi-static load 76
純曲げ
pure bending 86
衝撃応力
impact stress 76
衝撃荷重
impact load 76
状態量
state quantity 223
冗長度
degree of redundancy 140
除　荷
unloading 44
初期不整
initial imperfection 264
初　生
embryo 284
靱　性
toughness 287
真ひずみ
true strain 39

【す】

垂直応力
normal stress 34
垂直ひずみ
normal strain 39
図　心
centroid 90
ストライエーション
striation 283
すべり系
slip system 288
すべり方向
slip direction 288
すべり面
slip plane 288

【せ】

静水圧
hydrostatic pressure 48
脆性材料
brittle material 55, 280
脆性破壊
brittle fracture 282
静　定
determinate 9
正のせん断対角線
positive shear diagonal 190
セカント公式
secant formula for column 276
設計応力
design stress 280
切断法
method of section 15
遷移クリープ
transient creep 286
線形弾性体
linear elastic body 225
線形累積損傷則
linear cumulative damage law 285
線　素
line element 40
せん断応力
shear stress 35
せん断剛性
shear rigidity 51
せん断弾性係数
shearing modulus 45
せん断中心
shear center 135
せん断ひずみ
shear strain 40
せん断流
shear flow 135, 181
せん断力
shear force 21
せん断力図
shearing force diagram 25
線ひずみ
linear strain 39
線膨張係数
coefficient of thermal expansion 73
全面降伏状態
fully plastic state 155

【そ】

相当ねじりモーメント
equivalent torsion moment 175
相当曲げモーメント
equivalent bending moment 175
相反定理
ベッチの——
Betti's reciprocal theorem 243
マクスウェルの——
Maxwell's reciprocal theorem 244
塑　性
plasticity 44

塑性関節
plastic hinge 156
塑性座屈
plastic buckling 274
塑性ヒンジ
plastic hinge 156
塑性崩壊
plastically collapse 156

【た】

第一期クリープ
primary creep 286
第一主不変量
first principal invariant of stress tensor 192
第二期クリープ
secondary creep 286
第三期クリープ
tertiary creep 286
対称曲げ
symmetrical bending 85
対数ひずみ
logarithmic strain 39
体積弾性率
bulk modulus 49
体積ひずみ
volumetric strain 48
体積力
body force 64
多軸応力
multiaxial stress 5, 37
縦弾性係数
elastic modulus 43
縦ひずみ
longitudinal strain 45
ダ・ランベールの原理
D'Alembert principle 15, 233
たわみ
deflection 108
——の方程式
equation of deflection 110
たわみ角
deflection angle 109
たわみ曲線
deflection curve 108
たわみ性マトリクス
flexibility matrix 242
単位荷重の定理
theorem of unit load 247
弾・完全塑性
elastic-perfectly plastic property 71, 155
単軸応力
uniaxial stress 5, 37
単純支持
simple support 13
単純支持はり
simply supported beam 16
弾　性
elasticity 44
弾性曲線
elastic curve 108
弾性係数
elastic modulus 43
弾性限
elastic limit 43
弾性座屈
elastic buckling 274
弾性ひずみエネルギー
elastic strain energy 49
弾性床
elastic foundation 14
短　柱
short column 261
段付き棒
stepped bar 58
端末条件係数
fixity coefficient 273
断面一次モーメント
moment of area 90
断面係数
section modulus 90, 93
曲りはりの——
section modulus of curved beam 161
断面相乗モーメント
product of inertia area 100
断面二次極モーメント
polar moment of inertia of area 166
断面二次半径
radius of gyration of area 93
断面二次モーメント
moment of inertia of area 89, 90

【ち】

中間柱
intermediate column 274
中立軸
neutral axis 9, 86
中立面
neutral plane 9, 86
超関数
distribution 120
超高サイクル疲労
gigacycle fatigue 284
長　柱
long column 261
直角ロゼット
rectangular rosette 203

【つ】

釣合い式
equilibrium equation 38

【て】

低サイクル疲労
low cycle fatigue 284
定常クリープ
steady-state creep 286
ディラックのデルタ関数
Dirac delta function 120

ディンプルパターン
dimple pattern 282
適合条件式
compatibility condition 42
テーパ
taper 168
デルタ・ロゼット
delta rosette 204

【と】

等角ロゼット
equiangular rosette 204
動荷重
dynamic load 233
等価曲げ剛性
equivalent bending rigidity 99
動的荷重
dynamic load 76
動負荷係数
dynamic load factor 235
等分布荷重
uniformly distributed load 11
等変分布荷重
linearly distributed load 11
等方性
isotropy 226
特異関数
singularity function 120
飛移り座屈
snap buckling 274
トラス構造
truss structure 60
トレスカの条件
Tresca yield criterion 289

【な】

内部仕事
internal work 49

【ね】

ねじり剛性
torsional rigidity 51, 167
ねじりの応力関数
torsional stress function 180
ねじりモーメント線図
torsion moment diagram 168, 171
ねじれ角
twist angle 165
熱応力
thermal stress 74

【の】

ノートン則
Norton's creep law 286

【は】

破　壊
fracture 6
破壊靱性
fracture toughness 288
薄膜相似
membrane analogy 181
柱
column 10
破　損
failure 280
は　り
beam 2, 9
一様強さの——
beam of uniform strength 96
張出はり
overhanging beam 21
はり柱
beam-column 255
反　力
reaction force, reaction 8

【ひ】

非圧縮性
incompressibility 47
ひずみエネルギー
strain energy 226
ひずみエネルギー密度
strain energy density 222
ひずみ速度感受性指数
strain-rate sensitivity exponent 286
ひずみテンソル
strain tensor 41
ひずみロゼット
strain rosette 203
非線形弾性
nonlinear elasticity 44
引張剛性
tensile rigidity 51
引張強さ
tensile strength 44
引張力
tension 22
比ねじれ角
specific twist angle 165
標点距離
gage distance 38
表面力
surface traction 34, 64
比例限
proportional limit 43
比例負荷
proportional loading 225, 291
疲労限
fatigue limit 284
疲労試験
fatigue test 283
疲労破壊
fatigue fracture 283
ヒンジ
hinge 19
ピン支持
pin support 13

【ふ】

フィッシュアイ
fish eye 285

負　荷
loading 44

負荷経路
loading path 222

負荷履歴
loading history 222

部　材
member 2

不静定
外的に——
externally indeterminate 9, 68
内的に——
internally indeterminate 71

不静定内力
statically indeterminate force 141

不静定反力
statically indeterminate reaction 141

不静定問題
statically indeterminate problem 140

フックの法則
Hooke's law 43
一般化された——
generalized Hooke's law 47, 226

物体点
material point 222

物体力
body force 64

分岐点
bifurcation point 260

分岐モード
bifurcation mode 262

分布荷重
distributed load 11

【へ】

平均応力
mean stress 48, 283

平衡方程式
equilibrium equation 38

平面応力状態
plane stress condition 185

平面ひずみ状態
plane strain condition 195

へき開段
cleavage step 283

へき開ファセット
cleavage facet 283

ベッチの相反定理
Betti's reciprocal theorem 243

ヘビサイドの階段関数
Heaviside step function 119

ベルヌーイ・オイラーの仮説
Bernoulli-Euler's hypothesis 86

変　位
displacement 38

変　形
deformation 5, 223

【ほ】

ポアソン比
Poisson's ratio 45, 226

棒
bar 2, 9

崩壊機構
collapse mechanism 156

【ま】

曲りはり
curved beam 30, 157
——の断面係数
section modulus of curved beam 161

マクスウェルの相反定理
Maxwell's reciprocal theorem 244

曲げ応力
bending stress 89

曲げ剛性
bending rigidity 51, 89

曲げモーメント
bending moment 22

曲げモーメント図
bending moment diagram 25

マコーレーの括弧
Macauley brackets 119

真直はり
straight beam 24, 86, 108

真直棒
straight bar 55

【み】

ミーゼスの条件
Mises yield criterion 292

密巻コイルばね
close coiled helical spring 176

【も】

モーメント面積法
moment–area method 121

モール・クーロンの条件
Mohr-Coulumn criterion 295

モールの応力円
Mohr's stress circle 190

モールの慣性円
Mohr's inertia circle 102

モールの破損則
Mohr theory of rupture 295

【や】

焼ばめ圧力
shrink fit pressure 218

焼ばめ代
shrink fit tolerance 218
ヤング率
Young's modulus 43

【ゆ】

有効長さ係数
effective length coefficient 272
ゆがみ
warping 179

【よ】

横荷重
lateral force 16
横弾性係数
modulus of transverse elasticity 45
横ひずみ
lateral strain 45

【ら】

ラーメの定数
Lamé's constant 49
ランキンの条件
Rankin criterion 293
ランプ関数
ramp function 119

【り】

リバーパターン
river pattern 283
両振り疲労試験
alternating fatigue test 284
履　歴
history 222

【る】

ルジャンドル変換
Legendre transformation 225

【れ】

連続体の場の方程式
field equation of continua 42
連続はり
continuous beam 20, 149

【ろ】

ローラ支持
sliding support 13

【B】

BMD 25

【D】

DBTT 287

【S】

SFD 25
S-N 曲線
S-N diagram 284

【数字】

0.2%耐力
0.2% offset yield strength 44
一軸応力
uniaxial stress 37
二軸応力
biaxial stress 37
三軸応力
triaxial stress 37
三点曲げ
three-point bending 29
四点曲げ試験
four-point bending test 29
45° ロゼット
45-degree strain rosette 203
60° ロゼット
60-degree rosette 204

—— 著 者 略 歴 ——

渋谷　陽二（しぶたに　ようじ）
1981年　大阪大学工学部機械工学科卒業
1983年　大阪大学大学院工学研究科修士課程修了（機械工学専攻）
1983年　株式会社東芝 重電技術研究所
1988年　大阪大学助手
1992年　博士（工学）（大阪大学）
1995年　神戸大学助教授
1998年　大阪大学助教授
1999年　大阪大学教授
現在に至る

中谷　彰宏（なかたに　あきひろ）
1988年　大阪大学工学部機械工学科卒業
1990年　大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了（機械工学専攻）
1993年　大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了（機械工学専攻），博士（工学）
1993年　大阪大学助手
1995年　大阪大学講師
1997年　大阪大学助教授
2004年　大阪大学教授
現在に至る

材　料　力　学

Mechanics of Materials

© Yoji Shibutani, Akihiro Nakatani 2017

2017 年 6 月 16 日　初版第 1 刷発行

検印省略

著　　者　渋　谷　陽　二
　　中　谷　彰　宏
発 行 者　株式会社　コ ロ ナ 社
　　代 表 者　牛 来 真 也
印 刷 所　三 美 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　http://www.coronasha.co.jp

ISBN 978–4–339–04531–4　C3353　Printed in Japan　（柏原）

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 03-3513-6969，FAX 03-3513-6979，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。