

はじめに

私たちは高度な治療のためにさまざまな測定機器を使った検査を受け、治療器具や治療材料が体内で用いられている。また、高齢化などの理由で生体本来の機能が衰えると、さまざまな病気や障害を受けやすくなる。さらに、日常生活やスポーツなどでの健康的な活動の中でも身体のさまざまな部位に大きな負荷がかかって、事故のときには身体が負荷に抗しきれないこともある。

本書の主題であるバイオメカニクスは生体の組織や器官の力学を理解するための学問であり、上述のようなさまざまな場面に適用して改善や解決を図る学問でもある。最近では細胞レベルでの力学現象もその範囲とされ、力学環境と遺伝子発現との関係を通じて生体现象への関わりも明らかにされている。

バイオメカニクスを初めて学ぶ方に対しては、生体組織固有の力学的な挙動や性質を力学理論に基づいてどのように解釈すればよいのか、わかりやすく説明した。各章ではまず、ニュートン力学・材料力学・連続体力学の必要な知識を示し、本書一冊で学べるように配慮した。また、途中の計算式もできるだけ省略せずに示すことで、自学自習に利用できるようにした。

これからバイオメカニクスに関わっていく方に対しては、奥深さを感じていただけるように心がけ、数値解析のための取り扱い方も説明に含めた。生体組織の力学的性質の数学的な記述や変形挙動の解析に用いる式の導出については具体例を挙げて丁寧に示した。これは生体組織の力学試験のデータ整理や医療の現場で得られた測定データの深い理解にも大いに役立つはずである。

第1章ではバイオメカニクスとそれに関連する分野や学術雑誌などの情報収集源を紹介した。最近インターネット上で誰でも入手できる学術論文が増えており、各章末の参考文献の欄でもそれについて触れておいた。関心のある読者は実際の研究論文もご覧いただきたい。

第2章では大学1年レベルの物理学の基礎として、力の釣合いと力のモーメ

ントの釣合いの基礎を説明し、運動方程式から宇宙飛行士の無重量状態を導く方法や、身体の各部位にかかる力の大きさを導く方法を示した。

第3章では大学2、3年レベルの材料力学の基礎として、ひずみ、応力、線形弾性材料の応力-ひずみ関係について説明し、その知識を用いて骨の力学について論じた。そのうち、骨の弾性係数や波の伝播の基礎理論については本章のほか4.1.3項や4.4節で詳述した。

第4章では大学4年から大学院レベルの連続体力学の基礎として、運動学的関係式、超弾性体と粘弾性体、ニュートン流体の構成式について説明した。また、応力波が伝播する動的な問題にも取り組めるように、連続体の運動方程式も説明した。続いて、大きなひずみの生じる軟組織の力学特性の特徴を示し、特に、収縮力を発揮する骨格筋、心臓、血管に関して数学的なモデル化の方法を紹介した。また、細胞の力学特性についても研究例を挙げて紹介した。

第5章では物体の変形に関する境界値問題の基礎を説明し、次に軟組織の引張試験などの材料力学試験と超弾性体の構成式との関係を説明した。また、残留応力を考慮した超弾性体の境界値問題の解法や、血管や細胞の実形状を用いた有限要素解析の例を紹介した。

生体の器官・組織・細胞の力学特性を数学的なモデルで表し、計算機シミュレーションによって問題を解決する機会は今後ますます増えるであろう。その基礎となるのが生体組織の形状と内部構造、構成式（応力-ひずみ関係）や力-変位関係、力や変位の境界条件であり、同時に、変形場を支配する力の釣合い式（運動方程式）である。本書がその理解に役立つことを願っている。

最後に、このような出版の機会に恵まれたのは同じ研究分野の方々のご支援と研究室の学生諸君の努力のおかげである。転載の快諾にも深く感謝する。カバーデザインと各章冒頭のイラストは旧友のいとう良一氏にお願いした。また、コロナ社の方々には遅筆の私を完成まで根気よく引っ張っていただき、厚くお礼申し上げる。家族の支えと協力も執筆の原動力であった。

2012年3月

目 次

1. バイオメカニクスへの誘い

| | | |
|-------|------------------|----|
| 1.1 | バイオメカニクスの対象分野 | 2 |
| 1.1.1 | バイオメカニクスとは何か | 2 |
| 1.1.2 | バイオメカニクスの適用例 | 3 |
| 1.2 | 生体材料や医療・福祉機器の開発 | 7 |
| 1.3 | 人体の階層構造 | 7 |
| 1.4 | バイオメカニクスの関連分野 | 8 |
| 1.5 | バイオメカニクスに関する情報収集 | 10 |
| 1.5.1 | バイオメカニクス関連の学会 | 10 |
| 1.5.2 | バイオメカニクス関連の学術雑誌 | 10 |
| | 参考文献 | 11 |

2. ニュートン力学と筋骨格系の力学への応用

| | | |
|-------|---------------------|----|
| 2.1 | ニュートン力学の基礎 | 14 |
| 2.1.1 | ベクトル, 内積と外積 | 14 |
| 2.1.2 | 慣性の法則と慣性系 | 16 |
| 2.1.3 | 位置ベクトルと速度ベクトル | 16 |
| 2.1.4 | 質点の運動方程式 | 17 |
| 2.1.5 | 一定角速度での回転運動 | 19 |
| 2.1.6 | 力のモーメント | 22 |
| 2.2 | 種々の運動における無重量状態 | 24 |
| 2.2.1 | 自由落下運動と放物線運動での無重量状態 | 24 |
| 2.2.2 | 円運動をする宇宙船での無重量状態 | 25 |

| | |
|--------------------------|----|
| 2.3 筋骨格系への応用 | 27 |
| 2.3.1 床に立つ人の力の釣合い | 27 |
| 2.3.2 身体各部位での力の釣合い | 29 |
| 参考文献 | 33 |

3. 材料力学と骨の力学への応用

| | |
|---|----|
| 3.1 材料力学の基礎 | 36 |
| 3.1.1 物理法則と構成法則 | 36 |
| 3.1.2 ひずみ | 37 |
| 3.1.3 応力 | 39 |
| 3.1.4 応力成分とひずみ成分 | 42 |
| 3.1.5 主応力と最大せん断応力 | 45 |
| 3.1.6 応力-ひずみ線図 | 52 |
| 3.1.7 単軸および多軸応力状態での等方線形弾性体の応力-ひずみ関係 | 53 |
| 3.1.8 異方線形弾性体の応力-ひずみ関係 | 58 |
| 3.2 骨への応用 | 65 |
| 参考文献 | 70 |

4. 連続体力学と軟組織・細胞の力学への応用

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 4.1 テンソルの数学的基礎 | 73 |
| 4.1.1 ベクトル | 73 |
| 4.1.2 2階のテンソル | 75 |
| 4.1.3 直角座標系の回転と斜方向の応力-ひずみ関係 | 84 |
| 4.2 連続体力学の基礎 | 92 |
| 4.2.1 運動学 | 92 |
| 4.2.2 各種の応力テンソル | 108 |
| 4.3 構成式 | 114 |
| 4.3.1 線形弾性体 | 115 |
| 4.3.2 超弾性体 | 115 |
| 4.3.3 線形粘弾性体 | 130 |

| | | |
|-------|------------------------|-----|
| 4.3.4 | ニュートン流体 | 136 |
| 4.4 | 連続体の運動方程式と線形弾性体内の波の伝播 | 138 |
| 4.4.1 | 連続体の運動方程式 | 138 |
| 4.4.2 | ナビエの方程式 | 139 |
| 4.4.3 | 等方線形弾性体を伝播する波 | 142 |
| 4.4.4 | 直交異方線形弾性体を伝播する波 | 145 |
| 4.5 | 軟組織への応用 | 147 |
| 4.5.1 | 軟組織の特徴と力学的性質 | 147 |
| 4.5.2 | 骨格筋 | 149 |
| 4.5.3 | 心臓 | 158 |
| 4.5.4 | 血管 | 162 |
| 4.5.5 | 衝撃を受けた軟組織の動的応答 | 174 |
| 4.6 | 細胞への応用 | 175 |
| 4.6.1 | 細胞の力学的特徴 | 175 |
| 4.6.2 | 基質変形下でのアクチンストレスファイバの配向 | 176 |
| 4.6.3 | 細胞の力学特性の測定とモデル化 | 179 |
| | 参考文献 | 181 |

5. 生体の材料力学における境界値問題の解法

| | | |
|-------|--------------------------|-----|
| 5.1 | 応力・ひずみ解析のための境界値問題の基礎 | 188 |
| 5.1.1 | 境界値問題の種類 | 188 |
| 5.1.2 | 境界値問題の三要素 | 188 |
| 5.2 | 単純な条件での材料力学試験と境界値問題の解法 | 190 |
| 5.2.1 | 非圧縮条件 | 190 |
| 5.2.2 | 単軸引張試験 | 190 |
| 5.2.3 | 二軸引張試験 | 193 |
| 5.3 | 血管壁の材料力学試験による材料特性の同定 | 193 |
| 5.3.1 | 単軸引張試験による材料特性の同定 | 194 |
| 5.3.2 | 内圧負荷試験による材料特性の同定 | 196 |
| 5.4 | 曲率と力の釣合いを用いた血管の接線方向応力の解析 | 203 |

| | |
|---------------------------|-----|
| 5.5 実形状モデルによる有限要素解析 | 205 |
| 5.5.1 粥腫の生じた頸動脈 | 206 |
| 5.5.2 基質に接着した内皮細胞 | 207 |
| 5.5.3 有限要素解析での基本事項 | 209 |
| 参 考 文 献 | 211 |
| | |
| 索 引 | 213 |

1

バイオメカニクスへの誘い

本章ではバイオメカニクスの意味や適用例を示し，力学の利用の仕方を紹介する。また，読者がより深く学べるように参考文献や学術雑誌を紹介し，インターネットで入手できる雑誌も併せて示す。



1.1 バイオメカニクスの対象分野

1.1.1 バイオメカニクスとは何か

バイオメカニクス (biomechanics) は生体に力が作用して起こる現象を取り扱う学問のことで、生体力学ともいう。バイオメカニクスは**力学** (mechanics) の一分野であり、力学の諸法則を適用して考える。しかし、生体の現象から力学的な現象だけを切り離して扱うのが難しい場合も多く、その場合には力学以外の学問分野まで広げて考える必要がある。バイオメカニクスでは私たち人間だけでなく動植物をはじめとしてあらゆる生物を対象とし、一個体から組織、細胞、遺伝子までさまざまな階層レベルを扱う。

作用する力には身体の中で働く力（筋肉が収縮する力や血液が血管を広げる圧力など）と身体の外から働く力（身体各部に働く重力や床が足裏を押し返す力など）がある。力に関する生体の性質を明らかにすることで、健康管理や体力増進、病気や怪我の診断・治療、予防の支援、医療・健康・福祉のための機器の開発や、車の安全装置のように人と触れる製品の設計、人工関節のような生体代替材料の開発など、さまざまな場面でバイオメカニクスが役に立つ。

これまでの書物に示されたバイオメカニクスの定義を以下に紹介する。

- ・ Y. C. Fung (1981)¹⁾ : “Biomechanics is mechanics applied to biology.” (3 部作¹⁾⁻³⁾ のうちの最初の著作の first edition での定義)
- ・ 林紘三郎 (1997)⁴⁾, (2000)⁵⁾ : 「生体の構造 (かたち) と機能 (はたらき) を力学的に解析したり, その結果を応用する分野」
- ・ 立石哲也 (2010)⁶⁾ : 「生体の外部または内部に作用する力とその力によって生じたさまざまな現象を解析する科学と技術」
- ・ Nordin and Frankel (1980)⁷⁾ : “Biomechanics uses laws of physics and engineering concepts to describe motion undergone by the various body segments and the forces acting on these body parts during normal daily activities.”

- ・ Chaffin and Andersson (1991)⁸⁾ : “Occupational biomechanics can be defined as the study of the physical interaction of workers with their tools, machines, and materials so as to enhance the worker’s performance, while minimizing the risk of musculoskeletal disorders.”
- ・ Chaffin, *et al.* (2006)⁹⁾ : “Occupational biomechanics can be defined as the science concerned with the mechanical behavior and limitations of the musculoskeletal system and component tissues when a person performs an exertion in industry.”

上の前半の三つの定義は本書と同じ立場に立つ。2番目の定義では材料力学的な観点と応用の大切さがうかがえる。後半の三つは筋骨格系を対象とした研究分野での定義で、Fungの定義の一領域でもある。後半2番目の定義はChaffinらが**職場の肉体的な作業におけるバイオメカニクス** (occupational biomechanics) を定義したもので、人が取り扱う機器・道具類との相互作用に着目するとともに筋骨格系の障害も考慮している。後半3番目の定義では人体の細部にまで関心が広がっているようにうかがえる。

本書では広汎なバイオメカニクスの分野のうち、身体各部に作用する力の大きさや生体を構成する固体要素（器官や組織）の変形挙動と応力状態を知るために次の三つの力学理論を用いる。一つ目はニュートン力学の理論で、自由物体線図を描いて力の釣合いや力のモーメント（トルク）の釣合いに関する式を立て、物体に働く力を求める。二つ目は骨のような硬い物体に対する力学理論で、微小変形を前提とした材料力学の理論を適用して考え、応力やひずみの状態を明らかにする。三つ目は骨格筋のように柔らかな物体に対する力学理論で、連続体力学の理論を使って物体が大きく変形したときに生じる応力やひずみの状態を知る。

1.1.2 バイオメカニクスの適用例

力学をどんなところで利用できるのか、本書で説明する順序に合わせて紹介する。

〔1〕 **重力の大きさと無重量状態** 地上では人々は重力に抗して生活しているが、宇宙船の中では宇宙飛行士の身体が浮いている光景を目にする。航空機でも実験で自由落下状態を作り出すと、乗組員の身体が床から離れて浮き上がり、無重量状態（無重力状態）になる。ばねばかり式の体重計を床において人が乗れば、地上ではいつもの体重が量れるが、無重量状態では測定値がゼロとなる。

地上での重力加速度と自由落下や宇宙船での無重量状態については2.2節で説明する。無重量状態は人にとって単なる力の問題だけでなく、長い間いれば筋肉が萎縮し、骨量が減少するなど異常をきたす。

〔2〕 **身体に加わる力の軽減と動作や機器の改善** 日常の重力場で人がさまざまな活動をするすると身体の各部位には大きな力が働き、腰痛などの筋骨格系の障害を招くことがある。また、同じ姿勢で寝たきりになると褥瘡（床ずれ）に至る。そのため、身体への過度な力学的負荷は避けたい。

車椅子で日常生活を送る場合は無理のない力で操作して快適に活動したい。スポーツでは力を要領よく発揮して、球を遠くまで飛ばしたり、速く泳いだりしたい。装着するウェアや義肢が人の運動に大きく関与する場合もある。

物や動作には力学的観点から工夫を施せば改善できる余地がある。それに応えるには、対象とする系の力の釣合いを考えて解き、改善の可能性を検討すればよい。力の釣合いに関する力学の基礎は2.1節で説明し、身体に適用した例を2.3節で説明する。褥瘡の問題のように生体組織の変形を伴う場合は4章の連続体力学が関係する。4.5節で生体軟組織の力学特性を説明し、実形状の境界値問題については5.1節や5.5節で説明する。

〔3〕 **骨の力学的な健全性の評価** 建物から柱や梁を取り除くと建物は重みに耐えられなくなって壊れる。骨も同じように柱や梁に相当するものが減れば骨折につながる。高齢者にとって骨折は、寝たきりの生活から体力の低下や他の疾患の併発につながるきっかけとなる。そこで、骨密度を調べて骨折の危険性を推定する考えが生まれた。

二重エネルギーエックス線吸収測定法（dual-energy X-ray Absorptiometry）：

DXA or DEXA) を用いた測定方法では、2種類の X 線を照射し、骨（水酸化アパタイト $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ として存在する無機質成分）と他の組織の吸収率の差から**骨密度**（bone mineral density：BMD）を算出し、骨粗鬆症などで骨量が低下していないか診断する¹⁰⁾。骨密度そのものは力学的強度ではなく、縦弾性係数と関連づけたりして、骨の力学的強度面での安全性を推定する^{11), 12)}。

線形弾性体の応力-ひずみ関係については3.1節で説明し、骨の力学特性については3.2節で説明する。また、骨密度と超音波で測定する波の伝播速度から骨の弾性係数を見積もるための力学理論は4.4節で説明する。

〔4〕 **超音波画像法、磁気共鳴撮像法、コンピュータ断層撮影法** 医療現場では身体の機能や形態を測定する技術を駆使して診断や治療を行っている。特に出血や痛みを伴わずに計測する方法があり、**非侵襲的**（あるいは無侵襲的、非観血的）計測（測定）（noninvasive measurement）と呼ばれる。

上の三つの画像撮影法は臓器や脊柱などの形態や構造を画像化して調べるのに用いられる。**超音波画像法**（ultrasonic imaging）は心臓のように動いている臓器のリアルタイム計測に優れ、小さな弁の動きも見える。**磁気共鳴撮像法**（**核磁気共鳴撮像法**，magnetic resonance imaging：MRI）は超音波画像法に比べて鮮明な画像を取得できるが、原理的にリアルタイムの画像取得は不可能であり、心臓の場合には心電図で同期させて心周期の同一位相で撮像する。

コンピュータ断層撮影法（computed tomography：CT）では、X線などで撮影した多数の断層画像を用いてコンピュータ上で三次元形状を構築して可視化する。このような形状データはバイオメカニクスにおいて臓器の変形に関する境界値問題を解く上で貴重な情報である。このような画像の境界値問題での利用については5.1節や5.5節で説明する。

〔5〕 **生体組織の力学特性の評価** 超音波エコーやMRIによる画像情報は形状や運動に関する情報を提供するが、力学特性そのものに関する情報は提供しない。正常な組織と異常な組織を力学特性の違いを利用して判別できれば有益である。軟組織の弾性に関する情報を得るため、たとえば**エラストグラフィ**（elastography）という手法が考えられている¹³⁾⁻¹⁵⁾。磁気共鳴エラストグ

ラファイでは外部から低周波（50～100 Hz）のせん断波（横波）を軟組織に伝播させて周期的変位を生じさせ、磁気共鳴断層撮影装置で組織の横弾性係数を測定する¹⁴⁾。波の伝播は4.4節で説明する。

手術の際に体内に挿入する器具と組織との間の力学的な相互作用は術者にとって重要な因子である。血管手術ではカテーテルの挿入やステントの留置などがなされ、消化器系では検査・手術に内視鏡が挿入されたりする。血管などの軟組織の力学的挙動とその理解に必要な連続体力学は4章で説明する。

〔6〕 **傷害・疾病の予防と安全設計** 自動車乗員の安全設計のため、ダミーと呼ばれる人の代わりとなる人形や包帯を巻いた屍体を車に乗せて実験を行ったり、コンピュータ上で人体モデル（有限要素モデル）を作成して、数値シミュレーションを行ったりしている¹⁶⁾⁻¹⁹⁾。この結果を、自動車の安全装置（エアバッグやシートベルト）などの設計に生かす。また、歩行者や自転車に乗った人が自動車にはねられた場合についても研究が行われ、自動車の前面部の設計に生かされている。

インパクト・バイオメカニクス分野の傷害の問題については文献¹⁸⁾⁻²⁰⁾が参考になる。4.5節では衝撃を受けて脳や血管が傷害を受ける事例を紹介する。

疾病については〔2〕の床ずれ、〔3〕の骨粗鬆症の例のほか、動脈硬化や動脈瘤では内的因子である組織の変性や形状変化と外的因子である高血圧や血流の関与について力学的観点から研究されている。境界値問題と実形状の有限要素解析については5.1節と5.5節で説明する。

〔7〕 **リモデリングとその効果的利用** 生体組織は環境に応じて組織が成長したり吸収されたりする。これをリモデリング（再構築, remodeling）と呼ぶ。たとえばエキスパンダなどを利用して筋力トレーニングを続けると筋肉が肥大する。逆に、寝たきりであれば筋肉は萎縮し、骨突起部で軟組織の圧迫が増して褥瘡にもつながる。また、歯列の矯正では、ワイヤで歯に張力を加えると、歯根を囲う歯槽骨の一方の側に吸収、反対側に成長が起こり、歯が移動する。正常な状態にある組織の力学特性は3.2節や4.5節で説明する。

索 引

| | | |
|--|---|---|
| | 擬似ひずみエネルギー関数 174 | —の第1運動法則 137 |
| 【あ】 アクチンフィラメント 150, 175 圧縮 37, 126, 128 圧力 113 アルマンジのひずみ 100 | 擬似不変量 125 基準配置 93 基底 73 擬標 73 逆 80 吸収 69 境界条件 188 キルヒホッフの応力 111 筋線維 150 | 骨密度 5, 68 コラーゲン 65, 166 コリオリの力 20 |
| 【い】 位相速度 143 一般化フックの法則 55 異方性 58 | 【く】 クリープ 134 グリーンのひずみ 99 クロネッカーのデルタ 74 | 【さ】 最大せん断応力 50 作用反作用の法則 27 サルコメア 150, 156, 161 残留応力 109, 168, 197 |
| 【う】 運動の第一法則 16 運動の第二法則 17 運動方程式 17 | 【け】 形状関数 209 ケイリー・ハミルトンの式 82 ケルビン・フォークトモデル 131 | 【し】 収縮速度 154 重心 24 自由物体線図 30 重力加速度 24 重力定数 25 主応力 47 縮約 81 純せん断 108 除荷配置 109 真応力 41, 109 |
| 【え】 エラスチン 166 遠心力 20 | 現在配置 93 | 【す】 垂直応力 40, 42 垂直ひずみ 37, 44 スケーリング 69 ストレスファイバ 176 スピンテンソル 106 |
| 【お】 応力緩和 134, 166 応力-ひずみ線図 52 応力ベクトル 109 | 【こ】 工学ひずみ 38, 44 膠原線維 147, 165 公称応力 41, 112 公称ひずみ 38 構成式 37, 114, 188 構造テンソル 125 交代記号 74 勾配 83 興奮収縮連関 161 コーシー —の応力 109 —の公式 109 | 【せ】 静水圧 57 成長 69 跡 81 せん断応力 40, 42 せん断弾性係数 54 せん断ひずみ 38, 44 |
| 【か】 外積 15, 74 回転テンソル 96 外力 17, 30, 39 ガウスの積分点 210 慣性系 16 緩和関数 134 | 【き】 幾何学的形状 188 | |

— 著者略歴 —

- 1984年 名古屋大学工学部機械学科卒業
1989年 名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程単位取得退学
(機械工学専攻)
1989年 名古屋大学助手
1990年 工学博士(名古屋大学)
1994年 名古屋大学講師
2001年 九州工業大学助教授
2007年 九州工業大学准教授
2008年 九州工業大学教授
現在に至る

力学の基礎とバイオメカニクス

Fundamental Mechanics and Biomechanics

© Hiroshi Yamada 2012

2012年4月23日 初版第1刷発行

★

検印省略

著者 ^{やま}山 ^だ田 ^{ひろし}宏
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 新日本印刷株式会社

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 978-4-339-07230-3 (安達) (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