

ま え が き

工学と医学・生物学とが共通・共有する学問・研究の分野を生体医工学などと呼ぶ。バイオメカニクスは、生体医工学の中で最も重要な分野の一つであって、機械系工学と医学・生物学との融合領域である。これは、機械工学の基盤である力学をもとに、生体の“はたらき”や“しくみ”（機能）と“かたち”（構造・形態）を解析したり、その結果を医学・生物学や工学へ応用したりする学問・研究分野である。生体では、からだ全体やその一部、からだ内部の臓器・器官、さらにはこれを構成する組織・細胞などの素材のいずれにも絶えず力が作用するとともに、これらの機能や構造・形態は力の影響を受け、力学的法則の支配下にある。したがって、力学的な観点・立場から生体を取り扱うバイオメカニクスは、医学・生物学にとって非常に重要である。

バイオメカニクスが学問・研究の一分野として認識され始めたのは40～50年前である。著者がこの分野の研究を始めた約40年前には、我が国ではこの分野の名称も内容もほとんど知られていなかった。しかしながら、欧米における急速な発展に伴って、我が国においてもその重要性が、ゆっくりではあるがしだいに認識されるようになってきた。

そして、理工学系や医学系の学部や大学院で、バイオメカニクスあるいは関連する科目の講義が行われ始めるとともに、多くの機械工学系の学科にはこの領域の研究室ができるようになってきた。さらに、一部の国立大学大学院には生体医工学系の専攻や研究科が設置され始めるとともに、生体医工学分野やバイオメカニクス領域の研究者や技術者が急速に増えてきた。

バイオメカニクスが比較的新しく、成熟過程にあったこともあって、かつては講義に使える適当な教科書がなかった。このような状況を考えて、約10年前に「バイオメカニクス（コロナ社刊）」と題する拙著を刊行し、多くの学生

や研究者に利用して頂いてきた。また、その3年前には、「生体機械工学（日本機械学会刊）」が発刊され、バイオメカニクスを基盤とする生体医工学の教育に利用されてきた。

ここ数年の間に、一部の私立大学に生体医工学科や同様な名称の学科が開設されて学部教育も始まり、バイオメカニクスも重要な科目の一つとして学部学生に講じられるようになってきた。上記の書籍「バイオメカニクス」はもともと大学院生や研究者を対象に書かれたものであって、力学を履修した機械工学系学科の高学年の学生には使えるものの、低学年の学部学生や力学を学んでいない学生にはやや難しい内容であった。実際に、著者が所属する大学の生体医工学科では、力学の基礎を十分には学んでいない学生もバイオメカニクスの授業を受けている。バイオメカニクスの概要だけを学ぶにしても、一般力学、材料力学、流体力学などの基礎力学の知識が不可欠であることから、これら力学の基礎的事項を説明したのちに、本題であるバイオメカニクスを取り上げた教科書の必要性を強く感じてきた。これが、本書を刊行した理由である。

本書では、力学の基礎となる一般力学と単位について簡単に説明したのち、章ごとに応用力学の基本である四つの力学、すなわち材料力学、流体力学、熱力学、構造力学に関わる生体の現象や問題について解説している。そして、これまで力学を学んでいない学生にもバイオメカニクスが理解できるように、いずれの章でも最初に各力学の基礎的事項をわかりやすく説明している。また、生体や医療に関わる身近な例をできるだけ多く取り上げ、この領域に興味をもてるように工夫したつもりである。これらの例の多くは上記の書籍「バイオメカニクス」でも取り上げたものであるので、より詳しく学びたい場合にはこの書籍を参考にして欲しい。

本書が、バイオメカニクスの導入的教科書として利用され、この分野の理解と発展のためにいささかなりともお役に立つことになれば幸いである。

2013年2月

林 紘三郎

目 次

1—バイオメカニクスの概要

1.1	バイオメカニクスとは	1
1.2	バイオメカニクスの意義	3
1.3	バイオメカニクスの領域	4
1.4	バイオメカニクスに関連する分野	7
1.5	古い時代のバイオメカニクス	8
1.6	現代におけるバイオメカニクスの発展	15
	参 考 文 献	17

2—基 礎 力 学

2.1	質 点 の 力 学	19
2.1.1	ベクトルとスカラー	19
2.1.2	速度と加速度	20
2.1.3	質量と重量	21
2.1.4	ニュートンの運動法則	21
2.1.5	放 物 運 動	22
2.1.6	振 動	26
2.1.7	仕事とエネルギー	30
2.2	剛 体 の 力 学	32
2.2.1	力のつり合い	33

2.2.2	モーメントのつり合い	34
2.2.3	重心	35
2.2.4	剛体の運動	36
2.3	単位	39
	演習問題	43

3 生体組織の構造と組成

3.1	生体硬組織の構造	44
3.2	生体軟組織の構造	47
3.3	細胞の構造	54
	参考文献	56

4 生体組織・細胞の力学特性

4.1	材料・固体力学の基礎	57
4.1.1	応力とひずみ	58
4.1.2	応力とひずみの関係	62
4.1.3	粘弾性モデル	68
4.1.4	薄肉円筒, 薄肉球殻の壁応力	72
4.2	生体組織・細胞の力学試験方法	74
4.2.1	生体組織の力学試験方法	74
4.2.2	細胞の力学試験方法	78
4.3	生体組織力学特性の特徴	81
4.3.1	不均質性	81
4.3.2	異方性	82
4.3.3	非線形大変形	83
4.3.4	非圧縮性	84
4.3.5	粘弾性	85

4.4 生体硬組織の力学特性	85
4.5 生体軟組織の力学特性	87
4.5.1 単軸（1軸）応力-ひずみ関係	87
4.5.2 多軸特性	89
4.6 細胞・生体線維の力学特性	94
参 考 文 献	99
演 習 問 題	101

5 生体における流れ現象

5.1 流体力学の基礎	102
5.1.1 流体の基本的性質	102
5.1.2 圧 力	104
5.1.3 パスカルの原理	106
5.1.4 アルキメデスの原理	108
5.1.5 流 れ の 種 類	109
5.1.6 レイノルズ数	110
5.1.7 連 続 の 式	111
5.1.8 ベルヌーイの定理	112
5.2 生体に関わる流れ	115
5.2.1 血 液	115
5.2.2 血 圧	117
5.2.3 大動脈内の血液流れ	118
5.2.4 動脈内血流のレイノルズ数	120
5.2.5 ベルヌーイの定理の応用—輸液バッグ	121
5.2.6 ポアズイユの法則	122
5.2.7 動脈の壁せん断応力	125
5.2.8 動脈硬化と血流	127
参 考 文 献	131
演 習 問 題	132

6—生体における熱に関わる現象

6.1 熱力学の基礎	134
6.1.1 温度	134
6.1.2 熱	135
6.2 熱力学の法則	140
6.2.1 熱力学の基本的法則	140
6.2.2 気体の状態式	141
6.3 生体の熱と温度	142
6.4 温度・熱が生体に及ぼす影響	144
6.4.1 体温が生体に及ぼす影響	144
6.4.2 温度が細胞に及ぼす影響	145
6.4.3 温度が組織に及ぼす影響	146
参考文献	149
演習問題	149

7—からだの力学

7.1 骨格筋の機能	151
7.2 力の見積もり	152
7.3 リンク機構	153
参考文献	157
演習問題	157
演習問題解答	158
索引	163

1

バイオメカニクスの概要

生体には、からだ全体でもその内部でもつねに力が作用しており、それらの機能や構造は作用する力の影響を受けるとともに、力に対して反応する。また、からだや内臓の多くは運動するので、この点でも生体は力と密接に関わる。

バイオメカニクスは、力学をもとに生体のはたらき（機能や動作）とかたち（形態や構造）を解析したり、その結果を医学・生物学や工学などの種々の問題の解決や、新しい手法や技術の開発などに応用する融合的な学問、研究領域である。本章では、バイオメカニクスの概要、意義、領域、歴史などについて述べる。

1.1 バイオメカニクスとは

筋力トレーニングをすると筋肉が厚くなる。あまり大きな力が作用すると骨折する。骨折したとき、かつては骨折部をギブスで完全に固定して、骨がつながるまで力をかけないようにしていたが、いまでは治療後の早い時期から運動して、骨に積極的に力を作用させる。また、家庭でも簡単に測ることができる血圧は、血管や心臓の中の血液の圧力であり、圧力はその字が示すとおり力である。これらはいずれも力がからんだ話であり、力は我々のからだと密接に関係するとともに、大きな影響を与えることを示している。

力を考えに入れて、生体のかたち（形態、構造）とはたらき（動作、機能）を調べたり、得られた結果を応用する分野を**バイオメカニクス** (biomechanics) と呼んでいる。この名前は、生物、生命を意味する「バイオ (bio)」

と、力学を表す「メカニクス (mechanics)」とを組み合わせで作られている。

バイオメカニクスが日本に紹介されたのちしばらくの間は、生物力学^{1)†} や生体力学²⁾ などの日本語名に訳して使われたが、その後は英語をそのまま読んで「バイオメカニクス」が広く使われている^{3)~5)}。「バイオメカニクス」を見出し語として収録している国語辞典は見当たらないようであるが、「Biomechanics」を見出し語に取り上げている英和辞典 (例：リーダーズ英和辞典 [研究社]) や欧米の辞書は多い。

力学はその字が示すとおり、力 (ちから) を扱う学問であり、一見すると生物、生体からは非常に遠い感じがする。理科は物理 (学)、化学、生物 (学)、地学などに分類されており、力学が中心である「物理 (学)」と力学からは遠い「生物 (学)」とはほとんど関連がない分野のように見られてきた。

しかしながら、始めに述べたように生体にはいろいろな力が作用しており、そのはたらきの多くは力と密接に関係することから、生物にとって力学は非常に重要なのである。最も身近にある一般的で代表的な力は重力である。ふだんはあまり意識しないけれど、地上で生活する我々のからだにはつねに重力が働いている。また、重力の他にも、からだ全体やからだの各部にはいろいろな力が作用している。そして、生体の形や構造、サイズには重力を含むいろいろな力が大きな影響を与えているし、そのはたらき、機能は作用する力と密接な関係にある。

それでは、バイオメカニクスの分野で使われる力学とは何を指すのだろうか？ 力学には、見方、考え方によっていくつかの分け方がある。例えば、基礎力学 (basic mechanics, fundamental mechanics) と応用力学 (applied mechanics) や、理論力学 (theoretical mechanics) と実験力学 (experimental mechanics) などに分けることができる。また、動きがあるかないかによって、静力学 (statics)、動力学 (dynamics)、運動学 (kinematics) に分けることもできる。

† 肩付き数字は章末の参考文献番号を表す。

さらに、取り扱う対象によって、材料や固体を扱う**材料力学** (strength of materials) あるいは**固体力学** (solid mechanics), 流れを扱う**流体力学** (fluid mechanics), 熱に関係する**熱力学** (thermodynamics), いろいろな材料や部品 (部材) が組み合わさったもの (構造物, 構造体) を対象とする**構造力学** (structural mechanics) などにも分けることができる。工学や工業ではこのように分類される力学が広く使われている。特に, 総合工学として我々の生活にとって非常に重要な機械工学は, これら四つの力学を基礎としている。これと同様に, これら四つの力学はバイオメカニクスの基盤になっている。

1.2 バイオメカニクスの意義

バイオメカニクスは, 力学を使ってからだ全体やからだの一部のかたちとはたらきを調べ, 得られた結果を応用する分野である。力学をもとに生体の構造や機能を正しく理解すれば, いきもの (生命体) の本質に迫ることができるし, 病気のメカニズムを明らかにするための大きな助けになる。さらに, 病気を予防するためのヒントを得ることもできる。

また, 手術後など病気の治療のあとに病床に長くとどまる場合や, 微小重力や無重力にさらされる場合など, からだに作用する力が少なくなったりなくなったときに, からだがどのような反応するのかを知ることができる。一方では, 運動などによってからだに大きな力が作用する場合など, 力に対するからだの反応を知ることでもできるし, 適度な運動とは何かを知ることでもできる。さらには, 医学診断と治療, 健康の維持, 体力の強化などにも役立つ。

また, 生体は非常に長い時間をかけて自然淘汰と進化を繰り返しながら, 現在の形や機能をもつように改良され, 完成された一種の機械である。このようにうまく作られている生体の構造と機能に関する正しい知識は, 新しい工学・工業技術の開発に大いに役立つのではないかと考えられている。

1.3 バイオメカニクスの領域

バイオメカニクスの分野は非常に広いが、取り扱う対象によってつぎの四つに分けることができる。

- (1) 生体を構成する素材（コラーゲンなどのタンパク質や細胞など）、組織（皮膚や骨など）、器官（心臓や関節など）などの構造と機能を対象とするバイオメカニクス
- (2) 生体組織などにはあまり深くは立ち入らないで、例えば腕や下肢などヒトのからだの一部や、からだ全体の力学的仕組みを対象とするバイオメカニクス
- (3) 体育やスポーツ、作業などを対象として、ヒトの運動や動作などを取り扱うバイオメカニクス
- (4) 動物の運動や、植物のかたちや構造など、広く動物や植物を対象とするバイオメカニクス

これらのうち主として（1）はからだの内部の、（3）はヒトのからだ全体のバイオメカニクスで、（2）はこれら二つの間と見ることができる。また、（1）は生命科学や基礎医学、臨床医学と密接に関係し、（2）は福祉工学やリハビリテーション、ロボット工学などと強く関係する。（3）はスポーツバイオメカニクスや人間工学と呼ばれる分野に入る。これら三つは互いに密に連携するとよいと考えられるが、実際には国内でも国外でもそれぞれの分野で学会や研究者が異なり、お互いの間の連携は非常に少ない。

本書では、主として（1）の立場のバイオメカニクスを取り上げる。すなわち、本書で扱うバイオメカニクスは、おもに生体分子、細胞、組織、器官、あるいはからだ全体のはたらき（機能）とかたち（構造）を力学的観点から解析するとともに、得られる知識・知見を医学診断、治療、予防、ならびに産業上や社会的な諸問題の解決に応用することをめざす学問・研究領域である。

このような立場のバイオメカニクスは、下記の項目に分けることができる。

各項目のあとに例をあげており、それらのうちのいくつかについては後の章で詳しく説明する。

(A) 基礎バイオメカニクス

- a) 材料力学，固体力学を基礎とするバイオメカニクスで，固体バイオメカニクス (biosolid mechanics) と呼ばれることがある。細胞やコラーゲン線維などの生体素材や，皮膚や骨，血管などの生体組織の力学的（機械的）性質や構造，植物の葉や幹のかたちや構造などを対象とする。
- ・動脈硬化を起こした血管は本当に硬いのか？
 - ・ティッシュエンジニアリング (tissue engineering) によって体外で培養細胞から作られた組織の強さは大丈夫？
 - ・1 mm の 1/100 の (10 μm) という小さいサイズである細胞の力学的性質
- b) 流体力学と関係するバイオメカニクスで，生理流体力学 (physiological flow dynamics) や流体バイオメカニクス (biofluid mechanics) と呼ばれることがある。血液の流れを扱う分野は特に血液流体力学や血行力学 (hemodynamics) と呼ばれる。血液や呼吸気，尿や胃腸内の食物，関節液などの流れや，魚類の遊泳，鳥類や昆虫の飛行，植物の種（たね）の移動など
- ・動脈硬化の発症には流体力学が密接に関係
 - ・イルカが高速で海中を泳げるのはなぜ？
- c) 熱力学に関係するバイオメカニクスで，生体における熱の発生と移動，生体組織に対する温度の影響，細胞や組織の冷凍，酸素や物質の交換と代謝など
- ・ヒトの平熱はなぜ 37 $^{\circ}\text{C}$ ？
 - ・細胞や組織を冷凍保存するのに最適な冷却速度
- d) 脊椎（脊柱）や関節，心臓や肺，聴覚器官や眼球，脳など，いくつかの素材・組織から構成される構造物・構造体のバイオメカニクス

6 1. バイオメカニクスの概要

- ・ 生体関節はなぜ摩擦係数が低く、なめらかに動くのか？
 - ・ 心臓が血液を送り出すポンプ機能
 - ・ 自動車衝突による脳の損傷
- e) 作用する力に対する細胞，生体組織，臓器の反応 (response) と適応 (adaptation)，これらに伴って生じる再構築 (remodeling) など
- ・ 力が加わると組織が大きくなる (肥厚) メカニズム
 - ・ 宇宙空間で骨の量や強度が減少する現象
 - ・ 細胞における力の感知とその情報の伝達

(B) バイオメカニクスの医学応用

- a) 血圧や血流，関節機能などの解析，動脈硬化や高血圧，心不全などのメカニズムの解析，これらに関連する測定・診断装置の開発など
- ・ 関節機能の計測や動脈硬化診断の基礎理論
 - ・ 心臓血管系の数学モデルの作成と計算シミュレーション
- b) 骨折や腱・靭帯損傷などの治療法の開発，補助循環法，人工呼吸法，リハビリテーション技術の開発など
- ・ 組織移植による損傷腱・靭帯の治療
 - ・ 創傷 (そうしょう，切り傷) を手術糸で縫合 (ほうごう) するときの最適な締め付け力
 - ・ 脳障害によって麻痺 (まひ) したからだのリハビリテーション
- c) 人工心臓や人工血管，人工関節や人工靭帯，人工肺や透析装置 (人工腎臓) などの人工臓器や，これらに使用するバイオマテリアル (医用材料, biomaterial) の開発
- ・ 生体組織と接合する人工臓器や材料に必要な力学的性質
 - ・ 人工関節を移植した患者における力学的問題 (ゆるみや摩耗)
- d) 義肢や義足などの補装具，介助ロボットや車椅子などの福祉機器，歩行訓練装置などのリハビリテーション機器の開発など
- ・ 生体と義肢・義足の最適な接合法

索引

	【あ】				
		応力	42, 58	【く】	
		応力緩和	69	偶力	34
アクチン	54	応力緩和試験	75	屈筋	152
アクチンフィラメント	55	応力-ひずみ関係	67	くびれ	67
圧縮試験	75	応力-ひずみ曲線	63	クランク機構	154
圧縮性流体	103	オステオン	46	クリーブ	69
厚肉円筒	72	重さ	21	クリーブ試験	75
圧力	42, 105	温度	134	クリンパパターン	52
圧力-ひずみ弾性係数	92	【か】		【け】	
圧力ヘッド	113	階層構造	48	ゲージ圧	106
アテローマ	128	外弾性板	50	血圧	42
アルキメデスの原理	109	外皮	50	血管コンプライアンス	92
安全係数	66	外膜	50	血管内皮細胞	47, 56
安全率	66	海面骨	45	血管平滑筋細胞	56
【い】		核	55	結合織	48
位置エネルギー	31	角加速度	36	結合組織	47
位置ヘッド	113	核心温	142	血漿	116
異方性	47, 83	角速度	28	血小板	56, 116
【う】		華氏温度	135	ケルビン温度	135
薄肉円管	72	加速度	20	腱	52
薄肉円筒	72	ガリレオ(・ガリレイ)	10	原核細胞	54
薄肉球殻	73	カロリー	135	原子間力顕微鏡	80
腕の長さ	34	慣性の法則	21	懸濁液	116
運動エネルギー	31	慣性モーメント	37	【こ】	
運動の法則	21	カンチレバー	78	公称応力	59
【え】		【き】		恒常性	134
永久ひずみ	67	気圧	42	公称ひずみ	60
エネルギー	31	気化熱	138	構造力学	3
エネルギー保存則	31	基質	48	硬組織	44
エラスチン	47	基礎代謝基準値	143	剛体	32, 151
エラスチン線維	49	基礎代謝量	143	降伏応力	65
延性材料	67	許容応力	65	降伏現象	65
【お】		キロワット時	41	降伏点	65
		均質材料	82	国際単位系	39
横紋筋	53			固体力学	3, 58

骨格筋	53	伸筋	152	潜熱	138
骨格筋細胞	56	心筋	53	全ヘッド	113
骨芽細胞	56	心筋細胞	56		
骨幹	45	靱帯	52	【そ】	
骨幹端	45	伸長比	59	層状骨	45
骨細胞	56	振動数	29	層流	110
骨粗鬆症	87	心のう膜	87	速筋	152
骨りょう	45	真の応力	59	速筋線維	152
コラーゲン	47	真のひずみ	60	速度	20
コラーゲン線維	46, 48	振幅	28	速度プロファイル	103
コラーゲン線維束	48	深部体温	142	速度ヘッド	113
コラーゲン分子	48			塑性域	65
【さ】		【す】		【た】	
再構築	127	随意筋	53	大変形	67
細線維	48	水銀柱	106	大変形理論	84
細胞	47, 54	水柱	106	対流	139
細胞間物質	47	垂直応力	58	耐力	65
細胞骨格	55	水頭	113	(レオナルド・)ダ・ビンチ	
細胞膜	55	スカラー	19		9
材料力学	3, 58	ステイフネスパラメータ	94	単振動	28
作用点	34	ストークスの式	123	弾性域	63
作用反作用の法則	22	ストレスファイバ	55	弾性係数	63
残留ひずみ	67	ずり速度	104	単振り子	29
【し】		【せ】		【ち】	
仕事	30, 40	静圧	112	力の作用線	34
仕事率	32, 41	脆性材料	67	力の多角形	33
脂質二重層	55	生体恒常性	134	遅筋	152
膝蓋腱	52	静粘性係数	103	遅筋線維	152
質点	32	生理学	8	ち密骨	45
質量	21, 39	赤血球	56, 116	柱状骨	45
シャルルの法則	141	摂氏温度	135	中膜	50
周期	29	絶対圧	106	直腸温	142
重心	35	絶対温度	135		
自由落下運動	20, 22, 23	線維	48	【て】	
重量	21, 39	線維芽細胞	47	定常流	110
重力加速度	20	繊維強化プラスチック	82	電力	41
重力単位系	39	線維束	48	電力量	41
じゅく状硬化	128	せん断	60		
ジュール	40	せん断応力	61	【と】	
状態方程式	142	せん断速度	104	動圧	112
小胞体	55	せん断弾性係数	65	糖タンパク質	55
真核細胞	54	せん断ひずみ	61	動粘性係数	110
		せん断力	60		

等方性 47,83
 動脈硬化 127
 動脈壁 50
 動力 32,41
 トライボロジー 8
 トリチェリの実験 105
 トリチェリの真空 105
 トリチェリの定理 114
 トルク 62
 トロポエラスチン 49
 トロポコラーゲン 48

【な】

内弾性板 50
 内 膜 50
 流れせん断応力 104
 軟組織 44

【に】

ニュートン(単位) 40
 (アイザック・)ニュートン 21
 ——の運動方程式 22
 ——の粘性法則 104
 ニュートン流体 104

【ね】

ねじり荷重 62
 熱 135
 熱エネルギー 135
 熱伝導 139
 熱伝導率 139
 熱放射 139
 熱容量 138
 熱力学 3,134
 ——の第一法則 140
 ——の第二法則 140
 熱 量 40
 粘 性 103
 粘性係数 103
 粘弾性 68
 粘弾性体 85

【の】

脳硬膜 87
 伸 び 67

【は】

バイオトライボロジー 8
 バイオニクス 8
 バイオミメティクス 8
 バイオメカニクス 1
 バイオメカニズム 7
 バイオレオロジー 7
 拍動流 116
 (ゴットヒルフ・)ハーゲン 124
 ハーゲン・ポアズイユの法則 15,124
 破骨細胞 56
 パスカル 42
 ——の原理 107
 破断点 67
 破断ひずみ 67
 白血球 56,116
 ばね定数 27
 ハバース管 46
 ハバース骨 45
 (ウイリアム・)ハーベイ 13
 馬 力 41
 パワー 32

【ひ】

非圧縮性 84
 非圧縮性流体 103
 皮質骨 45
 比 重 102
 微小ひずみ 63
 微小ひずみ理論 63,83
 ヒステリシス現象 69
 ひずみ 60
 非線形 84
 引張り荷重 58
 引張り強度 67
 引張り試験 74
 非定常流 110

非ニュートン流体 104
 比 熱 136
 比熱容量 136
 標準気圧 105

【ふ】

フィブリル 48
 不可逆過程 140
 不均質 47
 不均質材料 82
 複合材料 82
 輻 射 139
 不随意筋 53
 (ロバート・)フック 13
 ——の法則 13,27,63
 プラーク 127
 フーリエの法則 139
 振り子の等時性 12,29,30
 浮 力 108
 プレコンディショニング 70

【へ】

平滑筋 53
 平滑筋細胞 47
 壁田周方向応力 91
 壁せん断応力 91,95,125
 ベクトル 19
 ヘッド 113
 ヘマトクリット 116
 ヘモレオロジー 7
 (ダニエル・)ベルヌーイ 112
 ——の定理 112
 ベンチュリ管 114

【ほ】

(ジャン・)ポアズイユ 15
 ——の法則 14,124
 ポアソン数 64
 ポアソン比 64
 ボイル・シャルルの法則 142
 ボイルの法則 141
 法線応力 58
 放物運動 22
 放物線 24,26

ホメオスタシス	134			流 体	102
【ま】		【ゆ】		流体力学	3,102
マイクロピペット	78	融解熱	138	流 量	112
曲げ荷重	62	有限変形理論	67,84	リラクゼーション	69
【み】		【よ】		リラクゼーション試験	75
ミオシン	54	横弾性係数	65	臨界レイノルズ数	111
密 度	102	【ら】		リンク機構	154
ミトコンドリア	55	落体の法則	11,23	リン脂質	55
脈 波	93	ラプラスの式	73	【れ】	
脈波伝ば速度	93	ランゲル線	89	レイノルズ数	110
【も】		乱 流	110	レオロジー	7
モーメント	34,62	【り】		連続体の力学	57
【や】		力学的エネルギー保存則	31	連続の式	112
(トーマス・)ヤング	14	理想気体	142	【わ】	
ヤング率	14,63	リモデリング	127	(ジェームズ・)ワット	41
		流 線	109	ワット(単位)	41

【欧文】		<i>in vitro</i>	76	PS	42
AFM	80	<i>in vivo</i>	76	SI	39
FRP	82	Kelvin モデル	71	SI 接頭語	43
HP	42	Maxwell モデル	71	Toe region	89
		Pa	42	Voigt モデル	71

— 著者略歴 —

1970年 京都大学大学院博士課程（機械工学専攻）修了，工学博士
2005年 大阪大学名誉教授，岡山理科大学工学部生体医工学科教授
現在に至る

バイオメカニクス入門

Biomechanics—An Introduction

© Kozaburo Hayashi 2013

2013年 4月15日 初版第1刷発行

検印省略

著者 林 絃三郎
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 978-4-339-07233-4

(高橋) (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