

# 人体の力学

基礎から学ぶバイオメカニクス

工学博士 松井 剛一 【編著】

理学博士 照井 直人

工学博士 岡本 覚

工学博士 横山 隆

工学博士 田邊 裕治 【共著】

学術博士 坂本 信

歯学博士 千葉 美麗

博士(工学) 小林 公一

コロナ社

〔執筆者一覧〕

まつい ごういち  
松井剛一（筑波大学名誉教授）：1章，2.1～2.2節，2.4～2.5節，7.6節，  
8.5節，9章

てる い なおひと  
照井直人（東京保健医療専門職大学）：5章

おかもと さとる  
岡本 寛（島根大学名誉教授）：2.2節，2.6節，6章，7.1～7.5節，8.1～  
8.4節

よこやま たかし  
横山 隆（岡山理科大学名誉教授）：2.3節

たなべゆうじ  
田邊裕治（新潟大学工学部）：3.1節

さかもと まこと  
坂本 信（新潟大学医学部）：3.2節，4章

ちば みれい  
千葉美麗（東北大学歯学部）：1章

こばやしこういち  
小林公一（新潟大学医学部）：1章，7.6節

（所属は2020年3月現在）

# まえがき

本書は、『人体の力学』という書名が示すとおり、ヒト（人体）の持つ能力・機能について、基礎的な理解と正確な解釈ができるようになることを目指すユニークな教科書である。

近年、バイオエンジニアリング分野における研究が進展し、この分野の優秀な人材育成を社会からも強く要請されている。この要請を実現するためには、学際的境界領域であるバイオメカニクス分野では、医学と工学の連携が重要であり、両者の融和した教育が望まれてきた。

例えばこの分野における教育では、現象・原理の正確な理解が必要であり、工学的見地、主として一般・応用力学（運動・機構学、固体力学、振動力学、流体力学、熱力学）からの人体機能の解釈が有効でかつ重要となる。すなわち、一般・応用力学の知識を習得したうえで、人体の力学的特性について正確な解釈のできる能力を涵養<sup>かんよう</sup>することが大切である。

このような観点に立ち、本書は、人体機能を正確に理解する手段として、力学の知識に基づいた人体の力学的特性とその解釈に重点を置いている。そのため、主要内容は人体機能の力学的説明が可能な部分に限られている。

具体的に本書では、解剖生理学の基礎、一般力学の基礎、運動器系の力学、歯の力学、循環器系の力学、人体の熱力学、人体の運動と制御、ヒトの生体物性、計測技術について、平易に解説している。また、一般力学の基本原則を人体の力学的諸問題に適用し、問題解決へのアプローチを通して正確な理解ができるように配慮している。

本書では、初歩から専門基礎までを学べ、さらに先進的内容を含めた構成とし、一層の学習が望まれる内容は「バイオナビ」、発展が期待される内容は「バイオのタネ」として紹介している。なお、演習問題の解答や紙面の制約により

割愛した項目については、目次で「web 掲載」と示し、コロナ社の web ページ<sup>†</sup>に掲載したので、興味のある読者は是非それらも参照されたい。

本書は、バイオメカニクス分野を学習する学生の教科書として、また、医療、医用、福祉、看護、介護などの分野へ従事を目指す学生、これらの分野で基礎研修を望む実務者・研究者にとっても知識の整理として役立つものと信じている。なお、内容については浅学非才のため誤解と独断のあることを恐れるが、読者の批判、叱正をいただければ著者らの喜びとするところである。

終わりに、本書の執筆にあたり、資料提供をいただいた関係者、および本書中に引用した書物・文献の著者に対して深甚な謝意を表するとともに、本書の出版に尽力をいただいたコロナ社の方々に厚くお礼申し上げます。

2020年3月

著者代表 松井 剛一

本書では原則として国際単位系 (SI) を用いているが、分野によっては工学単位系や CGS 単位系が使用されることもあるので、参考に下の表に SI とそれらとの関係と換算を示す。

表 SI, 工学単位系 (重力単位系), CGS 単位系の関係と換算

量	SI (m·kg·s)	工学単位系 (m·kgf·s)	CGS 単位系 (cm·g·s)
長さ	1 m	1 m	1 cm = 10 <sup>-2</sup> m
時間	1 s	1 s	1 s
質量	1 kg	1 kgf·m <sup>-1</sup> ·s <sup>2</sup> = 1 g <sub>0</sub> kg	1 g = 10 <sup>-3</sup> kg
力	1 N (= kg·m·s <sup>-2</sup> )	1 kgf = 1 g <sub>0</sub> N	1 dyn (= g·cm/s <sup>2</sup> ) = 10 <sup>-5</sup> N
圧力, 応力	1 Pa (= N·m <sup>-2</sup> )	1 kgf/m <sup>2</sup> = 1 g <sub>0</sub> N/m <sup>2</sup> 1 mmHg = 133.32 Pa	10 dyn/cm <sup>2</sup> (= g/(cm·s <sup>2</sup> )) = 0.1 Pa
仕事, エネルギー	1 J (= N·m)	1 kgf·m = 1 g <sub>0</sub> J 1 cal = 4.1868 J	1 erg (= g·cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) = 10 <sup>-7</sup> J
仕事率, 動力	1 W (= J·s <sup>-1</sup> )	1 kgf·m/s = 1 g <sub>0</sub> W	1 erg/s (= g·cm <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ) = 10 <sup>-7</sup> W

ここで、 $g_0 = 9.80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  (標準重力加速度) である。

<sup>†</sup> <https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339072464/>

# 目 次

## 第 1 章 人体の構造と機能

1.1 組成と構成	1
1.1.1 人体の全体像	1
1.1.2 細胞・組織・器官・個体	2
1.1.3 タンパク質と遺伝子	6
1.1.4 構成元素	8
1.2 器官機能と構造	9
1.2.1 運動機能 —運動器系— (骨格系, 筋系, 神経系)	9
1.2.2 生命維持機能 —消化器系, 泌尿器系, 呼吸器系, 脈管系—	12
1.2.3 制御・調節機能 —神経系, 内分泌系—	14
1.2.4 感覚・センサ機能 —受容器 (感覚器), 末梢神経系, 中枢神経系—	17
1.2.5 生殖機能 —生殖器系—	17
1.2.6 器官機能のまとめ	17


## 第 2 章 運動学・力学の基礎

2.1 一般力学	19
2.1.1 はじめに	19
2.1.2 物質・物体の基礎的性質	19
2.1.3 物体の運動学的・力学的取扱いの基本	20
2.1.4 静力学 (力とモーメントのつり合い)	23
2.1.5 動力学	28
2.2 運動・機構学の基礎	33
2.2.1 ヒトの動きと機構	33
2.2.2 点と形 (物体) の動きの表現	33
2.2.3 座標変換	37

2.2.4 機構学の基礎 —リンク機構—	39
バイオナビ2.1 各種機構	☞ web 掲載
2.3 固体力学の基礎	44
2.3.1 力学および荷重の分類	44
2.3.2 応力の種類	45
2.3.3 ひずみの種類	47
2.3.4 応力-ひずみ関係	49
2.3.5 材料の引張応力-ひずみ関係	52
2.3.6 線形粘弾性体の理論 (一部 web 掲載)	55
2.4 振動力学の基礎	59
2.4.1 振動と波動の分類	59
2.4.2 調和振動の表示	60
2.4.3 調和振動の合成と分解	62
2.4.4 振動系の基本要素と自由度	63
2.4.5 等価系	64
2.4.6 固有角振動数 —非減衰自由振動—	65
2.4.7 1自由度系の振動	67
2.4.8 連続体 (分布定数系) の振動: 波動	73
2.4.9 不規則振動	75
2.5 流体力学の基礎	76
2.5.1 流体の基本特性	76
2.5.2 流体の静力学	84
2.5.3 流体の動力学	86
2.5.4 流れの力学的相似と無次元量	91
2.5.5 流体から受ける力	☞ web 掲載
バイオナビ2.2 特殊な流れ	☞ web 掲載
2.6 熱力学の基礎	93
2.6.1 熱とエネルギー	93
2.6.2 可逆変化と不可逆変化	97
2.6.3 熱力学の第1法則	98
2.6.4 熱力学の第2法則	100
2.6.5 内部エネルギーとエンタルピー	100
2.6.6 理想気体の状態変化	102

2.6.7 伝熱の基礎	103
バイオのタネ 2.1 食品のエネルギー	106
演習問題	107

### 第3章 運動器系の力学

3.1 骨・軟骨のバイオメカニクス	109
3.1.1 下肢骨格の解剖学	109
3.1.2 股関節の解剖学	109
3.1.3 下肢の静力学	115
3.1.4 緻密骨の破壊	117
3.1.5 軟骨と変形性関節症	123
3.2 関節の力学モデル	126
バイオナビ 3.1 関節運動の生体内測定法	132
バイオナビ 3.2 3次元運動学  web掲載	
演習問題	134

### 第4章 歯の力学

4.1 歯硬組織の力学的特性	135
4.2 歯	135
4.3 歯の力学的特性	137
4.3.1 象牙質の圧縮特性	137
4.3.2 エナメル質の圧縮特性	138
4.3.3 象牙質およびエナメル質の引張特性と曲げ特性	139
バイオのタネ 4.1 歯根破折とは？	141
演習問題	141

## 第5章 循環器系の力学



5.1 力学的特徴	142
5.2 血液と血管の物性	142
5.3 血流の力学	147
5.3.1 血流の保存則	147
5.3.2 層流と乱流	148
5.3.3 ずり応力	149
5.3.4 血流の性質	150
バイオナビ5.1 血流測定方法	151
5.4 血圧と血流量	152
5.4.1 血圧と血流量の関係	152
5.4.2 血圧と血流の相互特性	153
5.4.3 血圧測定	155
5.4.4 血管物性の変化 —血管弾性と動脈硬化—	157
5.5 心臓のポンプ機能	158
5.6 肺循環	164
演習問題	165

## 第6章 人体の熱力学

6.1 体温調節のメカニズム	166
6.2 エネルギー代謝	168
6.3 熱収支 —熱エネルギーのつり合い—	169
6.4 組織内の熱移動	171
バイオのタネ6.1 熱による健康障害	174
演習問題	175



## 第7章 歩行運動の力学と制御

7.1 歩行の力学	176
7.1.1 筋(肉)の力学的特性	176
7.1.2 運動力学的諸量	177
7.2 歩行の運動学	177
7.3 歩行の運動力学	180
7.3.1 床反力	181
7.3.2 体節間の力とモーメント	182
7.4 歩行の力学的エネルギー	185
7.4.1 力学的エネルギーと力学的仕事	185
7.4.2 直立二足歩行のエネルギー	185
7.5 歩行運動のモデル化とシミュレーション	186
バイオのタネ7.1 身体機能を改善・補助・拡張・再生する「ロボットスーツ HAL <sup>®</sup> 」  web掲載	
バイオナビ7.1 モーションキャプチャーシステム  web掲載	
7.6 介護の力学	188
7.6.1 介護とは	188
7.6.2 介護動作とてこの原理	188
7.6.3 腰痛発生のメカニズムと腰痛予防	189
7.6.4 動作姿勢の力学モデル	191
演習問題	193

## 第8章 人体の機能と限界 (生体物性：外界環境からの影響)

8.1 人体の電気的特性	194
8.1.1 人体の電気現象	194
8.1.2 受動的電気特性	194
8.1.3 能動的電気特性	197
8.2 人体の磁気特性	200

8.3 人体の光特性 .....	201
8.4 人体への放射線の影響 .....	203
8.4.1 放射線の種類と性質 .....	203
8.4.2 人体組織における放射線の作用と障害 .....	204
バイオのタネ 8.1 気圧や振動の影響 .....	205
8.5 人体への流体の影響 .....	206
8.5.1 流体から受ける力 .....	206
8.5.2 雪崩の影響 .....	207
演習問題 .....	209

## 第9章 計測技術の基礎

9.1 計測の基本 .....	210
9.2 計測する量と誤差 .....	210
9.2.1 計測する量 .....	210
9.2.2 計測の要請と条件 .....	211
9.2.3 測定誤差 .....	211
9.2.4 計測の不確かさ .....	214
9.3 国際単位系 (SI) .....	216
9.4 MRI 計測  web掲載	
参考・引用文献 .....	218
演習問題解答  web掲載	
索引 .....	222

# 第1章 人体の構造と機能

## 1.1 組成と構成

### 1.1.1 人体の全体像

人体を学ぶにあたり、その基礎となるのが解剖学と生理学である。解剖学は、生物の正常な発生、形態、構造を理解することを目的とし、生理学は、生物の正常な機能を理解することを目的としている。解剖学と生理学は密接に関係しており、生物が機能を果たすためには、必然的にその機能に応じた形態になることが知られていて、逆にその形態や構造から、その機能を理解することもできる。

人体を構成する基本単位は細胞であり、**細胞→組織→器官→個体**の順に組み立てられ、最終的に一つの個体として構成される（図1.1）。

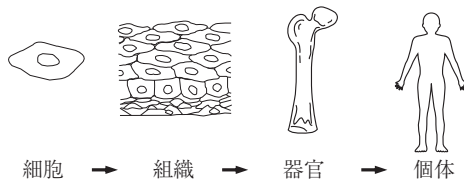


図1.1 人体の組み立て

人体の表面は**上皮組織**によって覆われており、上皮組織は体内と体外を隔てる役目を担っている。また、口から食道、胃、十二指腸、小腸、大腸、肛門までの消化器系器官の表面や、鼻粘膜、気管支、肺までの呼吸器系器官の表面は

上皮や粘膜で覆われており，上皮や粘膜は人体の内部と外部の環境を分けている。人体には，体温や血圧，血液成分や組織液の酸性度（水素イオン指数：pHで表す）などを一定の状態に維持する仕組みがあり，これを**恒常性**（ホメオスタシス）と呼ぶ。

### 1.1.2 細胞・組織・器官・個体

#### 〔1〕細胞の構造と機能

**細胞**は，生物体を構成する最小の基本単位（通常の高さ：直径5～30  $\mu\text{m}$ ）である。人体は約100兆個の細胞と，その細胞が作り出す物質によってできている。細胞は，その役目によっていろいろな形や高さ，構造，働きを持つように特殊化する。これを**分化**と呼ぶ。細胞の構造や働きは，細胞によって異なるところはあるものの，どの細胞にも共通する構造と機能がある。

細胞は，**図1.2**に示すように，細胞膜というリン脂質の二重層からなる薄い

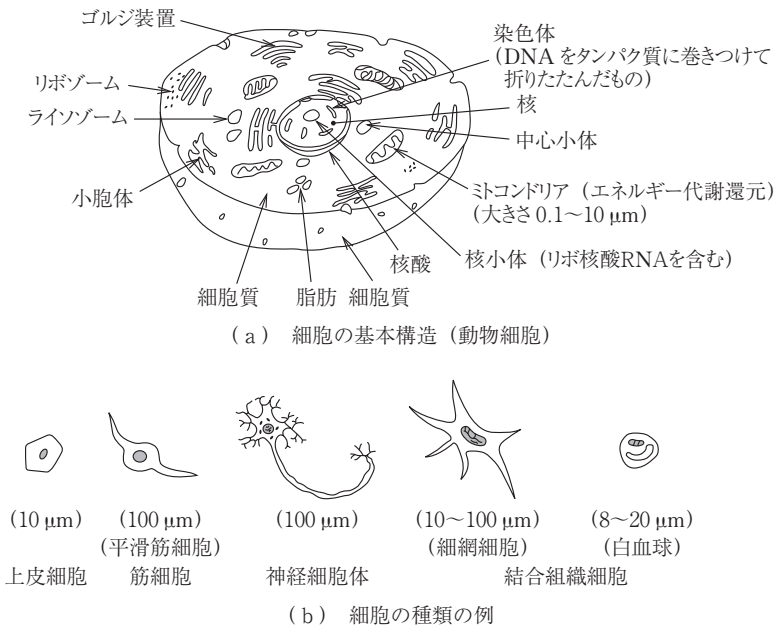


図1.2 細胞の基本構造と種類

## 第2章 運動学・力学の基礎

### 2.1 一般力学

#### 2.1.1 はじめに

人体は多くの元素，物質で構成されており，4種の有機質元素 O, C, H, N, および無機質元素 Ca, P, S, K などをもとに，体液（水溶液，電解質など）やタンパク質，脂質などで構成されていること，さらに細胞，組織，器官で人体が成り立っていることを第1章で学んだ。人体を構成する組織や器官などの物質を形や大きさのある物体と捉えて，その物理的，力学的性質や機能を知るとは，人体の基本的な力学的性質や機能を理解するうえで，また人体機能の向上につながり，有益で重要なことである。そこで，本章では物質要素の運動学的・力学的取扱いを通して，物体の物理的性質や（運動）機能を理解する方法や推測する方法について述べる。

#### 2.1.2 物質・物体の基本的性質

最初に，物体運動の力学的解析を行うにあたり，物質，物体についての一般的な知識と物体の運動・力学的取扱いの基本的な考え方について述べる。

##### 〔1〕 物質の性質と態様

**物質**は，**質量**（密度）を有し，その分子構造と分子運動に起因して，**弾性**，**粘性**（粘度），**熱伝達性**（温度，熱），**導電性**（電荷），**磁化性**などの性質を示す。さらに，物質は周囲あるいは内部の温度や応力に依存して，その状態を変化させる性質があり，**固体**，**液体**，**気体**という三態を示す。なお，熱力学的に

は、固相，液相，気相と呼ばれる。

## 〔2〕 物体の形態と性質

**物体**は物質により構成され、上述の性質に加えて、形や大きさを有する。物体をわずかに変形させたとき、元の形・大きさに戻る物体を**固体**といい、わずかな変形であっても元の状態に戻らない物体を**流体**という。液体と気体は流体である。流体が元に戻らない原因は、固体に比べて物質の分子間結合が弱く、分子構造が変化でき、特に気体は分子運動が盛んであるために元に戻れないのである。したがって、流体は容器などに閉じ込めなければ形や体積（大きさ）を保つことができないのである。金属は常温で固体であるが、固体金属の塑性変形の進行状態や溶融状態は液相状態なので流体の取扱いがなされる。

一般・応用力学では、**物体**は、**質量と体積**を有し、弾性、粘性、熱伝達/熱伝導性、導電性などの性質を示す。これらの性質は、普通、複合的に現れる。例えば、人体でも、弾性と粘性とが複合して現れることが多く、この性質は**粘弾性**と呼ばれる。実在の物体は、強弱はあるが上述の性質を有する。

## 〔3〕 物体の構成様態

実在の物体は、不純物を含まず同じ物質で構成されていることは珍しく、同じ物質で構成されていても均質に構成されていない場合もある。そのような物体は、普通、物体全体として一様に同じ性質を示さない。しかし、一般力学では、同じ物質で構成され、全体として一様に同じ性質を示すような理想的な物体として扱っている。このことは、物体運動の力学的性質や運動の本質を理解・把握するのに都合がよいからである。そのような物体は、物理的性質や物質分布に方向性がない、すなわち方向に依存しない物体で、**等方性**を有するという。そうでない物体は、**異方性**を有するという。等方性物体は、その性質や分布が回転により変化しないということである。

### 2.1.3 物体の運動学的・力学的取扱いの基本

後述する物体運動に対する運動学および一般力学に共通した基本的取扱いについて整理して述べる。

# 第3章 運動器系の力学

## 3.1 骨・軟骨のバイオメカニクス

### 3.1.1 下肢骨格の解剖学

1章で述べたように、ヒトを対象とするバイオメカニクスを理解するためには、解剖学の知識は必要不可欠である。ヒトの身体は多数の関節によって構成されており、その関節は多種多様な形状の骨で構成されている。そして、関節の周囲には、靭帯や、関節を動かすのに重要な多数の筋が存在している。

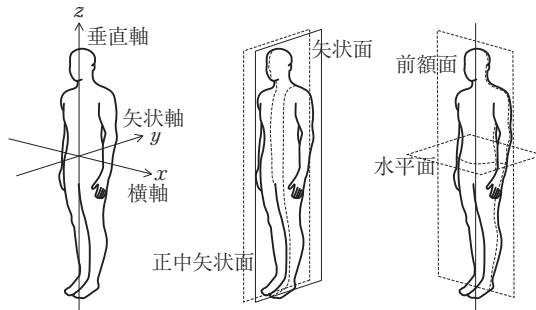
最初に、下肢骨格の代表として、上半身の体重を支えるための重要な役割を担っている股関節を取り上げ、股関節の構造や運動についての基礎的用語も説明する。

### 3.1.2 股関節の解剖学

#### 〔1〕 解剖学的方位の定義

股関節の構造および名称を理解するためには、解剖学で用いられている方位を示す用語の知識が必要である。解剖学において基本となる**肢位が解剖学的正位**であり、ヒトが両足をそろえて、顔、目および手のひらを前方に向けて直立する状態（立位）である。そして、解剖学的正位では、身体を通過したがいに直交する三つの軸と面が定義されている（図3.1）。

身体に定義される軸は**縦軸**、**横軸**、**矢状軸**であり、縦軸は直立位で地面に対して垂直な軸、横軸は縦軸と直交して左右に走る軸、矢状軸は身体の後面から

図 3.1 解剖学的方位<sup>1)</sup>

前面へ走り，縦軸と横軸に直交する軸である。たがいに直交する三つの平面は，それぞれ**矢状面**，**前額面**，**横断面**（または**水平面**）と呼ばれており，さらに身体の中央を通過する矢状面を**正中矢状面**と呼び，これによって身体は左右に分けられる。矢状面は正中矢状面と平行に位置する面，前額面は横軸を含み，正中矢状面と直交する面，横断面は正中矢状面と前額面に対して直交する面である。

また，方位を表す際，前額面に対して人体の正面側を**前方**，背面側を**後方**，正中矢状面に近づく方向を**内側**，遠ざかる方向を**外側**としている。さらに，頭尾方向の相対位置関係は**上方**，**下方**で表されるが，特に上肢・下肢においては，それぞれ心臓に近づく方向を**近位**，心臓から遠ざかる方向を**遠位**と呼び，上方または下方と近い意味で用いられる。

## 〔2〕 股 関 節

股関節は，球状の関節面を持つ臼状関節である。股関節は，一般的には骨盤と大腿骨によって構成された関節であると理解されているが，**骨盤**は一對の寛骨，仙骨および尾骨を組み合わせた複合体の総称であることから，解剖学的には正しいとはいえない（図 3.2）。また，骨盤内において寛骨と仙骨は仙腸関節を形成しているが可動性に乏しく，ほとんど動かない。また，両側の寛骨どうしを結合している恥骨結合も線維軟骨によって強固であるため動かない。寛骨は，坐骨，恥骨および腸骨といった三つの骨から構成され，出生直後はこれら



# 第4章 歯の力学

## ▲▽ 4.1 歯硬組織の力学的特性 ▲▽

生体組織は、**硬組織**と**軟組織**に大別でき、歯組織と骨は硬組織である。骨のバイオメカニクスに関する研究は多くなされているが、歯硬組織のバイオメカニクス研究は、歯学系の研究機関が少ないうえ、歯科修復材料研究に限定されてきたことにより少ない。近年、歯科臨床（診断、治療）においても歯硬組織の力学的挙動研究が重要であることが認識され、研究実験も行われてきたが、未解決な課題も多い。

また、健全なヒト歯の入手が難しいことも実験を困難にしているため、歯硬組織の力学的特性値は、これまでの実験結果（値）が代表的データとして扱われ、有限要素法による歯の複雑な応力解析に必要な基本データ（弾性率、強度）は、これらの実験値が参考にされている。ここでは、歯硬組織である象牙質およびエナメル質の力学的特性について述べる。

## ▲▽ 4.2 歯 ▲▽

### 〔1〕 歯と歯周組織の構造

歯は硬組織であり、その周囲は**歯周組織**と呼ばれる。歯と歯周組織の断面図を図4.1に示す。

歯硬組織は、図4.1に示すように、**エナメル質**、**象牙質**および**セメント質**から

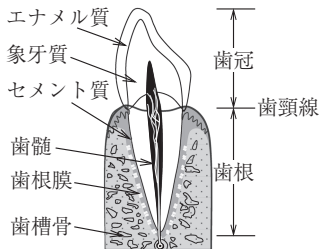


図 4.1 歯と歯周組織の構造(切歯)

構成され、それぞれ無機質、有機質および水から構成されている。**エナメル質**では、有機質が0.4～0.8%、無機質が95.0～97.0%、水が1.2～4.0%であり、ほかの二つの硬組織とはかなり異なった組織である。**象牙質**では、有機質が10.8～15.7%、無機質が61.0～71.0%、水が10.8～15.7%である。**セメント質**は、象牙質や骨とはほぼ類似の組成であり、無機成分は約60～70%で、

残りは**コラーゲン線維**を主体とした有機成分と水である。

ヒトの歯の上方は**歯冠**、境界は**歯頸線**、下方は**歯根**と呼ばれ、歯根は上顎骨と下顎骨の海綿骨中に**歯根膜**を介して埋まっている。上顎の歯根は下顎の歯根よりも数が多い傾向があり、これは歯を噛みしめた際の安定性で上顎が土台となることに関係していると考えられている。歯冠は口腔内に露出した部分でエナメル質に覆われており、歯根は顎骨内に埋められておりセメント質で覆われている。エナメル質は、ヒトの体の中で最も硬い組織である。歯の主体は象牙質と呼ばれる組織から構成され、その中央部には血管が侵入している**歯髄**がある。

歯周組織は、歯の周囲にある組織で歯肉、歯根膜、セメント質、歯槽骨の四つからなる。歯槽骨と歯のセメント質の間には、粘弾性の性質を有する歯根膜という組織が存在し、これらがシャープー線維と呼ばれる強靱な線維によって結ばれている。このように、歯は堅固で弾力性を持つ結合により、歯で噛む際に歯に作用する力を分散(荷重・応力分散機能)および緩和(衝撃力緩和機能)させ、スムーズな咀嚼が行える構造体となっている。

なお、歯と歯周組織は口腔内であって、発音、摂食機能に関わる器官である。動物においては、闘争の武器としての機能もある。

## 〔2〕 歯の種類

図 4.2 に、ヒト永久歯 32 本(親知らず 4 本を含める)の歯列と歯の種類を示す。ヒトの歯は、食物を切るシャベル状の**切歯**、先端が突出し切り裂くための

## 第5章 循環器系の力学

### ▲▽ 5.1 力学的特徴 ▲▽

循環器系の生理学では、心筋の収縮、血管の弾性（伸展性）、血管抵抗（負荷）が重要な因子であり、血圧、血流あるいは脈波伝播の力学的データをもとに解析されてきた。したがって、循環器系を力学面から理解するためには、血圧、血流の力学的理解と精度のよい計測が重要であるといえる。

循環器系の力学的特徴は、①心臓の拍出機能により動脈系に周期的脈動性流れを与え、②動脈管の伸展性により心臓の吐出圧を低く抑えることができ、さらに、③血管（壁）に蓄積された応力エネルギーを動力源として末梢血管へと血液を送ることができることである。この脈動的な流れは、末梢では血管抵抗により減速平坦化され、定常的な流れに変換されて毛細血管に流される。

血液循環の役割は、第1章で述べたように、栄養物の運搬・調整、ガス輸送、血球成分の輸送、内部環境の維持、老廃物の運搬などである。これらの役割を効率的に行えるように、血流は自律的に制御される。

### ▲▽ 5.2 血液と血管の物性 ▲▽

#### 〔1〕 血液の組成と特徴

**血液**は、ヒトの体重の約1/13 (7.7%)で、液体性の**血漿**成分55%と細胞性の**血球**成分45%からなる。血漿成分の91%は水で、残りはタンパク質（8～

9%)や電解質の塩類であり、血球成分の96%が**赤血球**、残りは**白血球**と**血小板**(0.5%)である。赤血球の2/3が水である。したがって、血液の80%強が水で構成されている。血液の密度は $1050 \sim 1060 \text{ kg/m}^3$ で水(標準 $1000 \text{ kg/m}^3$ )および海水( $1025 \text{ kg/m}^3$ )よりやや大きく、酸性度(pH:水素イオン濃度)は海水程度の7.35~7.45に保たれ弱アルカリ性である。なお、血漿に溶解しているフィブリノーゲンがフィブリンという線維状のタンパクとなり赤血球と一緒に固着したものを血餅という。

血液には血球成分などが含まれているため、血液は純粋な液体ではなく変形性固体を含んだ(固液)混相流体と見られるが、血球の大きさが $6 \sim 15 \mu\text{m}$ 、沈降速度が $10 \text{ mm/h}$ 程度であることから均質流体(平均密度 $1050 \text{ kg/m}^3$ の単相流体)の扱いが可能である。しかし、血球の大きさや動きが影響する細い血管内では、円盤状の血球の存在などにより混相流体としての性質が現れてくることに注意を要する。表5.1に血球の特性を示す。

## 〔2〕血液の粘度

血液は、上述したように、血漿中に血球が分散した懸濁液体といえる。この

表5.1 血球の特性<sup>1)</sup>

赤血球	直径 $7 \sim 8 \mu\text{m}$ 、厚さ $2 \mu\text{m}$ の両凹面円盤状(単細胞)、♂ $540$ 万個/ $\mu\text{L}$ 、♀ $480$ 万個/ $\mu\text{L}$ 、酸素運搬、寿命120日(注: $\mu\text{L} = \text{mm}^3$ ) 赤血球の成分の65%が水、34%がヘモグロビン、ヘモグロビンの結合作用により肺から組織へ $\text{O}_2$ を運搬する。赤血球膜は弾力性があり、容易に変形し、毛細血管を通り抜けることができる。
白血球	赤血球より大( $6 \sim 15 \mu\text{m}$ )、 $5000 \sim 10000$ 個/ $\mu\text{L}$ 、食(菌)作用、免疫抗体産生、寿命2~30日 好中球:径約 $10 \mu\text{m}$ (60~70%)、細菌などを貪食する。 好酸球:径約 $10 \mu\text{m}$ (2~4%)、抗寄生虫、抗ヒスタミン作用でアレルギー反応の抑制。 好塩基球: $7 \sim 9 \mu\text{m}$ (0.5~1%)、血管透過性の亢進やアレルギー反応を起こす。 単球:径約 $10 \sim 15 \mu\text{m}$ (3~6%)、マクロファージ(不定形)に分化し食細胞として死細胞やその断片などを取り込み消化する。 リンパ球:径約 $6 \sim 15 \mu\text{m}$ (25~40%)、T細胞、B細胞、ナチュラルキラー細胞から構成され、抗体産生など免疫反応に関与する。
血小板	大きさ $2 \sim 4 \mu\text{m}$ 、円板形(無核)、 $15 \sim 40$ 万個/ $\mu\text{L}$ 、血液凝固作用、血管壁の修復促進、寿命9日

# 第6章 人体の熱力学

## ▲▽ 6.1 体温調節のメカニズム ▲▽

生物、特にヒトのような恒温動物は、体内の温度を狭い温度範囲に保って生存している。その体温の調節は、第1章で述べたように、物理的な**放熱**と化学的な**産熱**の調節によって行われる。放熱は**放射**、**熱伝導**、**対流**および**蒸発**の体外（環境）への物理的な過程で行われ、産熱はおもに**栄養素の酸化**または**分解**などの体内での化学的反応過程によるエネルギー変換によって行われる。この食物からの栄養素をエネルギーに変換するなどの体内で行われる化学反応を**代謝**という。ヒトは、生命を維持するためにつねに体内各部で物質代謝を行い、そのエネルギーの25～35%は運動（仕事）に用いられ、運動に直接消費されなかった残りのエネルギーはすべて**熱**になり、体温維持に用いられる。その割合は、安静時ではおおよそ筋で20%、呼吸器系および循環器系で10%、脳で20%、肝臓その他で50%である。活動時には筋からの熱産生は大きくなり、全体の80%程度になる。ヒトのような恒温動物は、発生した熱により外界よりも高い体温を維持する。代謝は化学反応の一種であり、体温が高いほど活発になり、体内の化学反応は促進されるが、細胞の温度が42℃以上では体内の酵素系が障害されるため、42℃の体温レベルからは低いことが必要である。約37℃という体温レベルは、生命を維持するという条件では最適温度である。また、ヒトの身体は皮膚表面や内部、または身体の各部分で温度が異なっており、手足や顔など身体の末端や表面における温度は外界の温度変化により影響

表 6.1 室温 (20℃) におけるヒトの身体部位の温度 (単位:℃)

身体部位	温 度	身体部位	温 度	身体部位	温 度
肩	34～36	心臓	37～38	腋の下	36～37
腰	28～34	足先	28～31	手	28
腕	32	首	37	膝	31

される (表 6.1)。一方、人体内部の温度は、脳や心臓などの臓器の働きを正常に維持するために安定しており、この内部の安定した体温を**中核温**と呼ぶ。

上述したように、恒温動物であるヒトの体内温度は一定の範囲に保たれている。ヒトの体温は、通常、36～37℃であり、33℃を下まわると意識が混濁して昏睡状態に至り、死亡する場合もある (表 6.2)。一方、体温が42℃を超えた状態が長時間続くと、熱射病 (熱中症) や脳障害が生じる。これらの温度変化による障害を防ぐために、健全なヒトでは体温が30～41℃の範囲で体温調節の機能が働き、間脳の**視床下部**にある体温調節中枢が身体の温度情報を受けて熱産生と熱放散を調整し、身体の熱バランスを保つように機能するのである。具体的には、身体が低温にさらされて正常値以下になると、皮膚の毛細血管を収縮させることにより血液量を減少させることによって、体外に放散させる熱の量を減らし、震えやホルモンの作用で熱の産生を促し体内の代謝活動を高める。反対に、身体が高温にさらされ、また運動や労働によって体温が必要以上に上昇すると、皮膚の毛細血管を拡張させて血液量を多くし、汗腺の働きを活発にして発汗を促進し熱の放散量を増やす。また、体内の代謝活動を抑制

表 6.2 ヒトの体温と症状所見

体 温	症状所見	体 温	症状所見
45℃	死亡 (細胞完全死)	35℃	低体温
42℃	植物人間, タンパク質凝固	34℃	痴呆症状
40℃	うなされる	33℃	昏睡状態
38℃	身体のだるさ, 頭痛	31℃	植物人間
36.5℃	平常体温	27℃	死亡 (凍死)
36℃	冷え性		

高熱時: 解熱剤有, 低熱時: 薬剤無。一般の体温計検温域は32～42℃。

# 第7章 歩行運動の力学と制御

## 7.1 歩行の力学

### 7.1.1 筋（肉）の力学的特性

筋肉は運動をするための組織すなわち筋組織であり、解剖生理学では**筋**という。一般的に、筋肉という場合は**骨格筋**を指すことが多い。

筋は、第1章で述べたように、横紋筋と平滑筋に大別される。ほとんどの横紋筋は、その両端が腱になって骨に付着し、身体を動かすときに使われるので骨格筋とも呼ばれる。また、ヒトの意志によって動かすことができるので随意筋とも呼ばれ、運動神経の支配を受ける<sup>3)</sup>。

筋（肉）の収縮には、**等尺性収縮**と**等張力性収縮**という2通りの方法がある（1.2.1項参照）。等尺性収縮は、手で荷物を同じ位置で持ち続けたり、鉄棒にぶらさがったりするときに、関節運動を生じたり筋肉の長さを変えたりせずに外力に抵抗して筋力を発生させる収縮の仕方である。等張力性収縮は、荷物の持ち上げや屈伸運動をするときに、関節運動によって筋肉の長さを変えて一定の張力（筋力）を発生させる収縮の仕方である<sup>3)</sup>。

筋を収縮させるために、グリコーゲンやリン酸化化合物、酸素などのエネルギー源が必要である。特に、直接のエネルギーはATP（アデノシン三リン酸）の加水分解によって賄われる。運動を長時間持続するために、ATPを再合成して再び分解する必要がある。再合成には、筋肉中のクレアチンリン酸が分解したときのエネルギーを利用する<sup>3)</sup>。

筋によって持ち上げることのできる物の重さは、筋の太さすなわち筋線維の数と太さに比例する。太い筋ほど収縮によって生じる力が大きい。筋が物を持ち上げる高さは、筋の長さ（筋線維の長さ）に比例する。筋は収縮しようとする瞬間に最大の力を出し、負荷の重さにより仕事量が最大となり、また筋の縮む速さにより仕事の効率を最大にすることができる<sup>3)</sup>。

### 7.1.2 運動力学的諸量

運動とは、物体が時間の経過とともにその空間的位置を変えることである。運動の方向を含めた単位時間当りの変化量が速度であり、さらに速度の単位時間当りの変化が加速度である。物体にある力が作用した場合を考えると、物体には作用力に比例して加速度が加わり、物体の速度すなわち運動の状態が変わる。言い換えると、力は作用した物体の速度すなわち運動の状態を変える働きを持ち、その大きさに比例した加速度を生じさせるのである。

身体のある**体節**では、体節に付着している筋によって発揮する**筋力**、隣接する体節から関節を介して受ける**関節反力**、および重力や空気抵抗といった身体外からの力によって運動の状態が決まり、各体節の運動の状態が最終的に総合されて“身体の動き”になる。

筋によって発揮された力の総称を筋力と呼ぶ。その源は、筋原線維内にあるアクチンとミオシンの反応である。アクチンとミオシンの集合体として**筋節（サルコメア）**があり、それが直列に連なって筋原線維をなし、並列に多数集まって筋線維を構成する。筋線維1本の活動によって発揮された力を筋線維張力、筋線維がさらに多数集まって腱に作用した力を筋張力と呼ぶ（1.2節参照<sup>1)</sup>）。**関節トルク**は、筋張力と関節中心から張力の作用線までの距離（モーメントアーム）の積によって表される関節軸まわりに生じる回転力である。

## 7.2 歩行の運動学

ヒトの二足歩行動作の基本的特徴について歩行の運動学の面から述べる。片



# 第8章 人体の機能と限界

## (生体物性：外界環境からの影響)

### ▲▽ 8.1 人体の電気的特性 ▲▽

#### 8.1.1 人体の電気現象

人体の電気的特性は、受動特性と能動特性に分けられる。神経内を伝わる電気的信号は外部組織に微量のイオン電流を流すが、微弱電流により体表面には電位差が発生する。この微弱電流と電位差とに関係する電気的特性を**受動特性**という。物質としての電気的特性として、感電（電撃）や外部からの微弱な電流と電圧の関係を示す特性も受動特性である。すなわち、受動特性は外部から加えられた電気的刺激に対して反応する物質の性質のことをいい、エネルギーは加えられない<sup>1)</sup>。

一方、人体の行動は脳からの命令（信号）によって起こる。脳からの命令は電気的信号に変換され、神経を伝搬して抹消の組織に伝達され、抹消組織が動作する。この一連の現象は、エネルギーを加えて物質やイオンを濃度勾配とは逆方向に移動させることにより発生する（1.2.3項参照）。この電気的現象を**能動特性**という。この人体の電気的現象を利用して神経の伝達や筋の運動を計測する計器として、心電計や筋電計および脳波計などがある。なお、機能的電気刺激は、受動特性に基づいて能動特性を誘導したものである<sup>2)</sup>。

#### 8.1.2 受動的電気特性

人体組織の受動的電気特性は、通常、分子のレベル以上で考える。分子のレ

ベル以上で考える場合には、細胞内の小器官、細胞、組織、器官と個体（人体）などの階層を見る必要がある（1.1節参照）。細胞、組織などを構成している物質の電気的特性を表す重要な電気定数には、誘電的特性を示す誘電率  $\varepsilon$ 、導電的特性を示す導電率  $\sigma$ 、または逆数の抵抗率  $\rho$  と透磁率  $\mu$  がある。

人体を構成する物質は、磁性体ではなく多くは非磁性体と見られるので、人体の電気的特性に関して、以下の関係式が用いられる。導電率  $\sigma$  は抵抗率の逆数で電流の流れやすさを表し、単位としては単位長当りのコンダクタンスで単位は [S/m]（S：ジーメンズ）である。また、導線の抵抗  $R$  は、長さ  $l$  に比例し、断面積  $S$  に反比例するので、抵抗率を  $\rho$  とすると次式で表される。

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (8.1)$$

誘電率  $\varepsilon$  は、電場を印加したときの遮蔽率すなわち電気の溜めやすさで、単位は [F/m]（ファラデー毎メートル）で表す。静電容量  $C$  は次式で表される。

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{L} \quad (8.2)$$

ここで、 $\varepsilon_0$  は真空時の誘電率、 $\varepsilon_r$  は人体の比誘電率、 $A$  は表面積、 $L$  は距離である。

### 〔1〕細胞の電気的特性

細胞は、血漿や細胞の外側にある体液から構成される**細胞外液**と**細胞膜**により隔離され、内部には**細胞内液**が存在する。一般に、溶液中でイオンに解離する物質を電解質と呼ぶ。細胞外液中には水と電解質（陽イオン）があり、細胞内液にも水と電解質（陽イオン）が存在している。しかし、細胞外液と細胞内液ではそれらのイオン組成は異なる。電荷は細胞外液と細胞内液内のイオンによって運搬されるが、境界にある細胞膜は厚さが数 nm の**脂質二重層**から形成されて大きな抵抗率を有しているため、電荷は細胞膜を通過できない。すなわち、膜内部の疎水性部分では、電気を通さないコンデンサとして機能することになる。

人体組織では、細胞外液は、導電率が 10 ~ 50 mS/cm、抵抗率は血漿で

# 第9章 計測技術の基礎

## ▲▽ 9.1 計測の基本 ▼▲

計測対象の物（物体，人体，生体組織など）や現象の状態，形，動きを知ること，その現象の理解，問題の解決，設計へのヒントにとって大変重要である。そのための一つの手段として，**計測**を行う。計測にあたっては，計測の対象（物）と計測したい量を明確にし，計測に対する要請と条件について十分考慮したうえで適切な計測法を選択することが肝要である。さらに，**測定**はできるだけ精確で，その結果は信頼されるものが望まれる。以下には，工学分野などで利用されている重要な計測法および測定法の信頼性について，物理的，化学的観点からの計測の基本原則と方法について解説する。

## ▲▽ 9.2 計測する量と誤差 ▼▲

### 9.2.1 計測する量

物質が静止状態にある場合と運動状態にある場合とがある。物質の静止状態を表すためには，その物質の存在している場所（位置），大きさ（寸法），形状（準静的変形を含む）とその物質の熱力学的な状態を測定する必要がある。物質の運動状態を表すためには，位置や大きさの静的な量と熱力学的な量に加えて，物質の速度と物質に作用する力を測定する必要がある。さらに，複数の物質が混在する場合あるいは一つの物質の状態（相）が共存する場合は，混合の

割合と形態および物質（あるいは相）間の相互作用を測定する必要がある。

したがって、計測の対象に応じて計測すべき量が決まる。まとめると

① 静的な量

存在場所：3次元（座標）位置

大きさ：3次元寸法

形状（準静的変形を含む）：3次元形状（変形量（ひずみ））

② 運動学的な量

速度：3次元

③ 熱力学的な量

圧力，密度，温度，内部エネルギーなど（うち2量）

④ 力，電磁気，光，音響，その他の量

を計測することになる。これらの計測すべき基本的な量は、以下に示す **SI 基本単位**（時間，長さ，質量，電流，熱力学的温度，物質量，光度）にも関連している。

### 9.2.2 計測の要請と条件

計測する量を決定したあと，その量の性質や取得方法，すなわち局所量，瞬時量，平均量，時間経過，あるいは空間分布を取得したいのか，また直接計測できるのか，センサの種類，どの物理的・化学的原理を利用して計測するのか，などについて十分勘案しなければならない。計測対象の環境条件や計測法の適用性を考慮して計測の要請と条件をまとめると，**図 9.1** のようになる。

### 9.2.3 測定誤差

通常，測定には**誤差**を伴い**真の値**を測定することは難しい。そこで，測定された値がどの程度に信頼される値であることを示しておくことが肝要である。

一つの測定において，**測定誤差**は**測定値**と**真の値**との差として定義される。

$$\text{測定誤差} = \text{測定値} - \text{真の値} \quad (9.1)$$

この**誤差**（**全誤差**） $\delta_i$ には，**かたより誤差**（定誤差，系統誤差ともいう） $\beta$

# 索引

<b>【あ】</b>		運動器系		応答曲線	
圧縮応力		locomotory (or motor)		response curve	69
compressive stress	46	system	9	横紋筋 striated muscle	4
圧縮性		運動機能		オフセット降伏強度	
compressibility	76, 82	motor function	9	offset yield strength	54
圧縮性流体		運動量 momentum	28	オフセット法	
compressible fluid	81	運動量保存則		offset method	54
圧縮特性		law of conservation of		音速 acoustic	
compressive property	137	momentum	89	(or sound) velocity	82
圧縮ひずみ		運搬 transfer	8	音波 sound wave	82
compressive strain	48				
圧縮率		<b>【え】</b>		<b>【か】</b>	
compressibility	51, 82	永久ひずみ		外界 surroundings	95
圧力 pressure	77	permanent strain	54	介護 care	188
—の跳び		液体 liquid	19	介助 assistance	188
jump in pressure	83	エナメル小柱		外側 lateral	110
圧力波 pressure wave	82	enamel prism	138	回転運動 rotation	38
アルキメデスの原理		エナメル質 enamel	135	回転半径	
Archimedes' principle	86	エネルギー式		radius of gyration	32
		energy equation	91	解の重ね合わせ	
		エネルギー代謝率		superposition of solution	23, 59
		energy metabolic rate	170		
<b>【い】</b>		エネルギー保存則		解剖学的正位	
異化		law of conservation of		anatomical position	109
catabolism	106, 169	energy	90, 98	ガウス分布	
位相 phase	60	エルゴード過程		Gaussian distribution	212
位相差		ergodic process	75		
phase difference	69	エルゴード性		可逆変化	
一様伸び		ergodicity	212	reversible change	97
uniform elongation	53	エレメント element	39	核 nucleus	3, 198
一様ひずみ		遠位 distal	110	角運動量	
uniform strain	53	エンタルピー		angular momentum	30
1回拍出量		enthalpy	101	角振動数	
stroke volume	153	エントロピー増大の原理		angular frequency	60
遺伝暗号 genetic code	8	principle of entropy		拡張期圧	
異方性 anisotropy	20	increase	100	diastolic pressure	153
陰圧		<b>【お】</b>		確率過程	
negative pressure	164	オイラーの運動方程式		probability process	212
陰イオン anion	8	Euler's equation of motion		確率密度関数	
			90	probability density	
<b>【う】</b>		オイラーの方法		function	75, 212
渦なし流れ		Euler's method	88	加工硬化	
irrotational flow	91	横断面		work hardening	53
うなり beats	63	transverse plane	110	下降伏点	
運動エネルギー				lower yield point	53
kinetic energy	29				
運動学 kinematics	21				

可視光線領域  
visible ray region 201  
荷重-伸び線図  
load-elongation diagram 52  
かたより誤差  
bias error 213  
過渡振動  
transient vibration 60  
下方 inferior 110  
感覚器 receptor, sensory organ, sense organ, sensor 14  
感覚機能 sensory (or sense) function 9  
寛骨 coxal bone 111  
慣性系  
inertial system 28  
慣性モーメント  
moment of inertia 32  
慣性要素  
inertia element 63  
慣性流 inertial flow 80  
慣性力 inertia force 29, 67  
関節 joint 10  
関節トルク  
joint torque 177  
関節軟骨  
articular cartilage 112, 123  
関節反力  
joint reaction force 177  
完全流体 perfect fluid 79

## 【き】

気液二相流  
gas-liquid two-phase flow 84  
機械要素  
machine element 39  
器官 organ 6  
器官系 organ system 6  
機構 mechanisms 33  
機構学  
theory of mechanisms 21  
規則振動  
periodic vibration 59  
基礎 foundation 63  
機素 (機械要素)  
machine element 39

基礎代謝  
basal metabolism 168  
気体 gas 19  
気体定数 gas constant 96  
気体性キャビテーション  
gaseous cavitation 84  
基本周期  
fundamental period 61  
臼歯 molar 137  
吸収 absorption 83  
境界層 boundary layer 79  
境界層厚さ  
boundary layer thickness 79  
共振 resonance 69  
共振角振動数 resonance angular frequency 69  
共振現象  
resonance phenomena 69  
強制振動  
forced vibration 60, 68  
強制対流  
forced convection 104  
共役関係  
conjugate relation 47  
共役せん断応力  
conjugate shear stress 47  
極限強度  
ultimate strength 53  
極座標系  
polar coordinate system 34  
局部収縮  
localized contraction 53  
巨視的尺度  
macroscopic scale 22  
虚数単位  
imaginary unit 60  
筋 muscle 10  
近位 proximal 110  
筋節 sarcomere 177  
筋組織 muscle tissue 4  
筋力  
muscle strength 177, 189

## 【く】

偶然誤差  
precision error 212  
偶力 couple 26

くびれ necking 53  
クリープ損傷  
creep damage 117  
繰返し荷重  
repeated load 45

## 【け】

系 system 95  
計測 measurement 210  
頸体角  
neck shaft angle 115  
経路関数  
path function 95  
ゲージ圧  
gauge pressure 85  
血圧 blood pressure 152  
血液 blood 142  
血管 blood vessel 144  
血管系  
vascular system 12  
血管抵抗  
vascular resistance 153  
血球 blood cell 142  
結合組織  
connective tissue 4  
血漿 plasma 142  
血小板 platelet 143  
血流 blood flow 164  
犬歯 canine 137  
減衰係数比  
damping ratio 67  
減衰振動  
damped vibration 67  
減衰要素  
damping element 63  
減衰力 damping force 67

## 【こ】

効果器 effector 15  
交換血管  
exchange vessel 145  
恒常性  
homeostasis 2, 150, 168  
構成関係式  
constitutive relation 57  
剛性率  
modulus of rigidity 50  
拘束運動  
constrained motion 21

硬組織		紫外線領域		自由運動	
hard tissue	55, 135	ultraviolet ray region	202	free motion	21
剛体	rigid body 21, 25	磁性化	magnetizability 19	周期	period 61
交番荷重		齒冠	crown 136	自由度	
alternating load	45	時間平均値		degree of freedom	215
降伏点	yield point 53	temporal average value	75	収縮期圧	
降伏点降下		axial strain	198	systolic pressure	154
yield point drop	53	軸索	axon 48	重心	
後方	posterior 110	軸ひずみ	axial strain 136	center of gravity	31
合力	resultant force 26	齒頸線	cervical line 136	自由振動	
国際単位系		刺激伝達反応系		free vibration	59
The international system		stimulus conduction		自由度	
of units	216	system	15	degree of freedom	40
誤差	error 211	刺激伝導系		重粒子線	
個体	individual 6	cardiac conduction system	159	heavy particle beam	204
固体	solid 19	自己相関関数		重力加速度	
骨格系	skeletal system 9	autocorrelation function	75	gravitational acceleration	84
骨格筋	skeletal muscle 4	齒根	root 136	樹状突起	dendrites 198
骨組織		齒根破折		受容器	receptor 14
bone (or skeletal) tissue	4	root fracture	141	循環器系	
骨盤	pelvis 110	periodontal ligament	136	circulatory system	12
コドン	codon 8	支持組織		瞬間中心	
固有角振動数		supporting tissue	4	instantaneous center of	
natural angular frequency	66	lipid, lipoid	9	motion	36
コラーゲン線維		齒周組織		消化器系	
collagen fiber	136	periodontal tissue	135	digestive system	12
コトコフ音		矢状軸	sagittal axis 109	蒸気性キャビテーション	
Korotkoff sounds	155	矢状面	sagittal plane 110	vaporous cavitation	84
【さ】		齒髓	pulp 136	衝撃荷重	
細動脈	arteriole 145	自然対流		impact load	45
細胞	cell 2	natural convection	104	衝撃波	
細胞外液		実応力		shock wave	82
extracellular fluid	9	actual stress	54	上降伏点	
細胞質	cytoplasm 3	質点		upper yield point	53
細胞体		mass point, point mass	21	状態方程式	
cell body, soma	198	—(系)の力学		equation of state	77, 96
細胞内液		particle dynamics	21	状態量	
intracellular fluid	9	質量	mass 19	state quantity	95
細胞膜		質量保存則		上皮組織	
cell membrane	3, 195	law of conservation of		epithelial tissue	3
左心室		mass	88	上方	superior 110
left ventricle	156	シナプス	synapse 199	静脈	vein 145
サルコメア		contraction of area	54	静脈還流量	
sarcomere	177	シミュレーション		venous return	163
【し】		simulation	189	初期位相	initial phase 60
肢位	position 109			自励振動	
				self-excited vibration	60
				真応力	true stress 54

心筋	
myocardium, heart muscle,	
cardiac muscle	4, 158
神経系	14
nervous system	14
神経細胞	5
nerve cell, neuron	5
神経線維	16
nerve fiber, axon	16
神経組織	5
nervous tissue	5
心磁図	200
magnetocardiography	200
心周期	162
cardiac cycle	162
靱性係数	54
modulus of toughness	54
振動	59
vibration, oscillation	59
振動数	61
frequency	61
真の値	211
true value	211
心拍出量	153
cardiac output	153
心拍数	153
heart rate	153
真ひずみ	54
true strain	54
振幅	60
amplitude	60
振幅比	69
amplitude ratio	69
<b>【す】</b>	
随意筋	4
voluntary muscle	4
スカラー量	24
scalar quantity	24
スターリングの心臓の法則	147, 161
Starling's law of the heart	147, 161
スチューデント <i>t</i> 分布	215
student <i>t</i> distribution	215
ステファン・ボルツマンの法則	106
Stefan-Boltzmann law	106
滑り	79
slip	79
ずり応力	149
shear stress	149
ずり速度	149
shear speed	149
<b>【せ】</b>	
静圧	90
static pressure	90
正確度	213
bias limit	213

静荷重	45
static load	45
制御機能	9
regulatory function	9
生殖器	17
genital organ,	17
reproductive organ	17
生殖機能	9
reproductive function	9
静水圧	50
hydrostatic pressure	50
成層圏	85
stratosphere	85
正中矢状面	110
median sagittal plane	110
静変位	69
static displacement	69
精密度	213
precision index	213
生命維持機能	9
life support function	9
静力学	21, 44
statics	21, 44
静力学的つり合い条件	
static equilibrium of	
forces	27
赤外線領域	204
infrared ray region	204
脊柱起立筋	190
erector muscular of spine	190
赤血球	143
red blood cell	143
切歯	136
incisor	136
接触角	83
contact angle	83
接線座標	35
tangential coordinates	35
接線ひずみ	49
tangential strain	49
絶対圧力	85
absolute pressure	85
絶対温度	96
absolute temperature	96
セメント質	135
cementum	135
前額面	110
coronal plane	110
線形応答	23
linear response	23
線形振動	59
linear vibration	59

線形ばね要素	56
linear spring element	56
全誤差	211
total error	211
せん断応力	46, 79, 149
shear stress	46, 79, 149
せん断速度	149
shear rate	149
せん断弾性係数	50
shear modulus	50
せん断ひずみ	49
shear strain	49
セントロード	36
centrode	36
全伸び	54
total elongation	54
前方	110
anterior	110
<b>【そ】</b>	
総圧	90
total pressure	90
象牙細管	137
ivory tubule	137
象牙質	135
dentin	135
層流	80, 148
laminar flow	80, 148
測定	210
measurement	210
測定誤差	211
measurement error	211
測定値	211
measured value	211
速度水頭	81
velocity head	81
速度の相似則	36
law of	
similarity (or similitude),	
similarity rule	36
速度ポテンシャル	91
velocity potential	91
束縛運動	21
constrained motion	21
組織	3
tissue	3
塑性ひずみ	54
plastic strain	54
損失水頭	81
head loss	81
<b>【た】</b>	
ダイアメトラル試験	139
diametral test	139
体液	9
body fluid	9
対偶	39
pair, kinetic pair	39



代謝 metabolism	166	断熱変化		定容(積)比熱	
体循環		adiabatic change	85	specific heat at constant	
systemic circulation		タンパク質		volume	97
	13, 156	protein	6	デオキシリボ核酸	
対数ひずみ		断面減少率		deoxyribonucleic acid	6
logarithmic strain	54	reduction in area	54	てこの原理	
対数減衰率				principle of leverage	
logarithmic decrement	67				27, 188
体性感覚		【ち, つ】		電子線	
somatic sensation (or		力の三角形		electron beam	204
sense)	17	triangle of force	25	転写 transcription	7
体積 volume	20	力のつり合い		テンソル tensor	24
体積弾性係数		equilibrium of forces	26	伝熱	
bulk modulus	51, 82	力のモーメント		heat transfer	103
体積ひずみ		moment of force	24	伝播速度	
bulk strain	50	—のつり合い		propagation velocity	74
体節		balance of moment of		電離放射線	
body segment	177	force	188, 191	ionizing radiation	203
大腿骨 femur	112	中核温		伝令 messenger	7
大動脈 aorta	145	core temperature	167		
大動脈弁		中枢神経系		【と】	
aortic valve	156	central nervous system	15	動圧	
台風 typhoon	207	跳躍伝導		dynamic pressure	90
対流		saltatory conduction	198	等エントロピー変化	
convection	104	調和振動		isentropic change	85
対流圏		harmonic motion	59	等温変化	
troposphere	85	直交座標系 rectangular		isothermal change	85
耐力		(or orthogonal) coordinate		等価	
proof stress	54	system	34	equivalence	25
縦弾性係数		直交軸定理		同化	
modulus of longitudinal		perpendicular axis		anabolism	170
elasticity	50	theorem	32	等価減衰係数	
縦ひずみ		津波 tsunami	206	equivalent damping	
longitudinal strain	48			coefficient	65
ダランベールの原理		【て】		等価質量	
D'Alembert's principle	29	定圧比熱		equivalent mass	64
単純せん断		specific heat at constant		動荷重	
simple shear	48	pressure	96	dynamic load	45
弾性 elasticity	19	抵抗係数		等価ばね定数	
弾性血管		drag coefficient	206	equivalent spring constant	
elastic vessel	145	抵抗血管			64
弾性限		resistance vessel	145	等価力学系	
elastic limit	52	定常 steady	22	equivalent mechanics	
弾性定数		定常確率過程		system	65
elastic constant	49	stationary random (or		統計量 statistic	213
弾性体 elastic body	22	stochastic) process	75	等尺性収縮	
弾性ひずみ		定常振動		isometric contraction	11
elastic strain	54	steady-state vibration		等張力性収縮	
			60, 68	isotonic contraction	11

- |                           |         |                           |             |                         |     |
|---------------------------|---------|---------------------------|-------------|-------------------------|-----|
| 動的粘弾性                     |         | 熱中症                       |             | ハイドロキシアパタイト             |     |
| dynamic viscoelasticity   | 56      | heat attack               | 167, 174    | hydroxyapatite          | 140 |
| 導電性 conductivity          | 19      | 熱伝達                       |             | ハーゲン・ポアズイユ流れ            |     |
| 動粘性係数                     |         | heat transfer             | 104         | Hagen-Poiseuille's flow | 80  |
| kinematic coefficient of  |         | 熱伝達性                      |             | ハーゲン・ポアズイユの法則           |     |
| viscosity                 | 81      | heat transference         | 19          | Hagen-Poiseuille's law  | 152 |
| 動粘度                       |         | 熱伝達率                      |             | 破断強度                    |     |
| kinematic viscosity       | 144     | heat transfer coefficient |             | fracture strength       | 53  |
| 洞房結節                      |         |                           | 104         | 破断伸び                    |     |
| sinoatrial node           | 159     | 熱伝導                       |             | elongation at fracture  | 54  |
| 等方性 isotropy              | 20      | heat conduction           | 103         | 破断ひずみ                   |     |
| 動脈 artery                 | 145     | 熱伝導率                      |             | fracture strain         | 54  |
| 動脈硬化                      |         | thermal conductivity      | 104         | 白血球                     |     |
| arteriosclerosis          | 157     | 熱放射                       |             | white blood cell        | 143 |
| 動力学 dynamics              | 21, 44  | heat radiation            | 105         | 波 動 wave                | 59  |
| 特殊感覚                      |         | 熱力学温度                     |             | 波動方程式                   |     |
| special sensation         |         | thermodynamic             |             | wave equation           | 73  |
| (or sense)                | 17      | temperature               | 96          | ばね定数                    |     |
| トルク torque                | 24      | 熱力学の第1法則                  |             | spring constant         | 64  |
|                           |         | first law of              |             | パラメータ励振                 |     |
| <b>【な】</b>                |         | thermodynamics            | 98          | parametric excitation   | 60  |
| 内臓感覚                      |         | 熱力学の第2法則                  |             | パワースペクトル密度関数            |     |
| visceral sensation        |         | second law of             |             | power spectral density  |     |
| (or sense)                | 17      | thermodynamics            | 100         | function                | 75  |
| 内 側 medial                | 110     | 粘 性 viscosity             | 76          |                         |     |
| 内部エネルギー                   |         | 粘性係数                      |             | <b>【ひ】</b>              |     |
| internal energy           | 98      | coefficient of viscosity  |             | 非圧縮性                    |     |
| 雪 崩 avalanche             | 207     |                           | 57, 79, 149 | incompressibility       | 51  |
| 軟骨組織 cartilage (or        |         | 粘性要素                      |             | 非圧縮性流体                  |     |
| cartilaginous) tissue     | 4       | viscous dashpot element   |             | incompressible fluid    | 81  |
| 軟組織 soft tissue           | 55, 135 |                           | 56          | 非減衰自由振動                 |     |
|                           |         | 粘性流 viscous flow          | 80          | undamped free vibration | 65  |
| <b>【に, ぬ】</b>             |         | 粘弾性                       |             | 微視的尺度                   |     |
| ニュートンの粘性法則                |         | viscoelasticity           | 20, 56      | microscopic scale       | 23  |
| Newton's law of viscosity | 57      | 粘弾性体                      |             | ヒス束                     |     |
|                           |         | viscoelastic body         | 22          | His bundle              | 160 |
| ニュートン流体                   |         | 粘 度                       |             | ピストン・クランク機構             |     |
| Newtonian fluid           | 79, 147 | (dynamic) viscosity       |             | piston crank mechanism  | 40  |
| ニューロン neuron              | 198     |                           | 57, 144     | ひずみ硬化                   |     |
| 濡れ性 wettability           | 83      | 脳磁図                       |             | strain hardening        | 53  |
|                           |         | magnetoencephalography    |             | ひずみ速度                   |     |
| <b>【ね, の】</b>             |         |                           | 200         | strain rate             | 55  |
| ねじり振動                     |         | 伸び計 extensometer          | 52          | 非線形応答                   |     |
| torsional vibration       | 73      |                           |             | nonlinear response      | 23  |
| 熱エネルギー                    |         | <b>【は】</b>                |             | 非線形振動                   |     |
| heat energy               | 93      | 肺循環                       |             | nonlinear vibration     | 59  |
| 熱 傷                       |         | pulmonary circulation     |             |                         |     |
| burn, heat burns          | 174     |                           | 13, 156     |                         |     |

引張応力		不規則振動		ベクトル量	
tensile stress	46	random vibration	59, 75	vector quantity	23
引張応力-ひずみ線図		復原要素		ペースメーカー電位	
tensile stress-strain		restoring element	63	pacemaker potential	159
diagram	52	復原力 restoring force	67	ヘマトクリット (値)	
引張強度		複素振幅		hematocrit (value)	144
tensile strength	53	complex amplitude	60	ベルゴニ・トリボンドーの法則	
引張真応力-真ひずみ線図		複素数表示		Bergonie-Tribondeau's law	205
tensile true stress-true		expression of complex			
strain diagram	52	numbers	34	ベルヌーイの式	
引張特性		不随意筋		Bernoulli's equation	90
tensile property	52, 139	involuntary muscle	4	ペンネスの生体熱伝導モデル	
引張ひずみ		不確かさ		Pennes bioheat equation	173
tensile strain	48	uncertainty	214		
非定常 unsteady	22	不確かさ区間		<b>【ほ】</b>	
非電離放射線		uncertainty interval	214	ポアソン効果	
non-ionizing radiation	205	フックの法則		Poisson's effect	48
非ニュートン流体		Hooke's law	49	ポアソン数	
non-Newtonian fluid	79, 147	物質 substance	19	Poisson's number	49
比熱 specific heat	97	物体 body	20	ポアソン比	
比熱比		ブラウン運動		Poisson's ratio	49
heat capacity ratio	85	Brownian motion	94	包括度 coverage	214
非保存系		フーリエ解析		母集団 population	212
non-conservative system	23	Fourier analysis	62	保存系	
標準線形固体モデル		フーリエ級数		conservative system	23
standard linear solid		Fourier series	62	保存力	
model	58	フーリエ係数		conservative force	29
標準偏差		Fourier coefficient	62	ホットスポット	
standard deviation	212	プルキンエ線維		hot spot	201
表皮効果 skin effect	202	Purkinje fiber	160	ポテンシャル	
標準関数		分化 differentiation	2	potential	29
sample function	75	分布定数系		ポテンシャル流れ	
表面張力		distributed parameter		potential flow	91
surface tension	77, 82	system	73	ホメオスタシス	
比例限		<b>【へ】</b>		homeostasis	150, 168
proportional limit	52	ペア pair	39	ポリトロープ指数	
疲労損傷		平滑筋 smooth muscle	4	polytropic index	103
fatigue damage	119	平均動脈圧		ポリトロープ変化	
		mean arterial pressure	145	polytropic change	85, 103
<b>【ふ】</b>		平行軸定理		翻訳	
ファン・デル・ワールスの式		parallel axis theorem	32	translation	6
van der Waals equation	78	平行四辺形の法則		<b>【ま】</b>	
フォークト固体モデル		law of parallelogram	24	マクスウェル流体モデル	
Voigt solid model	57	並進移動		Maxwell fluid model	57
不可逆変化		translation	37	曲げ特性	
irreversible change	97	閉塞 choking	82	bending property	140

末梢神経系  
peripheral nervous system 15

【み】

ミエリン鞘 myelin sheath 198  
密度 density 77  
脈圧 pulse pressure 153  
脈管系 vascular system 12  
脈波 pulse wave 154  
脈波伝播速度 pulse wave velocity 158

【も】

毛管現象 capillary phenomenon 83  
毛細血管 capillary 145  
モデル model 186  
モーメントのつり合い equilibrium of moments 26

【や, ゆ, よ】

ヤング率 Young's modulus 50  
床反力 ground reaction force 181  
陽イオン cation 8, 195  
溶解 dissolution 83  
陽子線 proton beam 204  
要素誤差 elemental error 214  
腰痛 lumbago 188

容量血管 capacitance vessel 145  
横振動 lateral vibration 73  
横弾性係数 modulus of transverse elasticity 50  
横ひずみ transverse strain 48  
四節回転機構 quadric crank mechanism 41  
四節回転連鎖 quadric crank (or link) chain 41  
四棒連鎖 quadric crank chain 41

【ら】

ラグランジェの方法 Lagrange's method 88  
ランダム荷重 random load 45  
ランダム誤差 random error 212  
ランビエ絞輪 node of Ranvier 198  
乱流 turbulent flow 80, 148

【り, る】

力学的エネルギー mechanical energy 185  
力学的仕事 mechanical work 185  
力学的パワー mechanical power 185  
力積 impulse 29

理想気体 ideal (or perfect) gas 96  
リボ核酸 ribonucleic acid 6  
流(線)管 stream tube 88  
流体 fluid 20, 76  
流体抵抗 fluid resistance 78  
流体摩擦 fluid friction 78  
流体摩擦係数 fluid friction coefficient 81  
リュウダース帯 Lüders band 53  
臨界レイノルズ数 critical Reynolds number 80

リンク link 39  
リンク機構 linkage 37  
リンク装置 linkage 39  
リンパ系 lymphatic system 12  
累積損傷モデル cumulative damage model 118

【れ, ろ】

励振力 exciting force 59  
レイノルズ数 Reynolds number 80, 148  
連鎖 chain 41  
連続体 continuum 22, 77  
連続の式 equation of continuity 89  
ロードセル load cell 52

【英略語】

DNA deoxyribonucleic acid 6  
MRI magnetic resonance imaging 151, 200

RNA ribonucleic acid 6  
SI Le Système International d'Unités 216

【ギリシャ文字】

$\alpha$  線 alpha ray 204

$\beta$  線 beta ray 204

【数字】

1 自由度系 single-degree-of-freedom system 67

— 編 著 者 略 歴 —

1964年 大阪大学基礎工学部機械工学科卒業  
1972年 工学博士 (大阪大学)  
1989年 筑波大学教授  
1990年 公益財団法人 カシオ科学振興財団評議員 (兼任, 現在に至る)  
2003年 筑波大学名誉教授  
2003年 近畿大学教授  
2008年 近畿大学退職

人体の力学 —基礎から学ぶバイオメカニクス—

Human Body Dynamics — Fundamentals of Biomechanics —

© Matsui, Terui, Okamoto, Yokoyama, Tanabe, Sakamoto, Chiba, Kobayashi 2020

2020年5月28日 初版第1刷発行



検印省略

編 著 者	松 井 剛 一
著 者	照 井 直 人
	岡 本 覚 隆
	横 山 裕 治
	田 邊 裕 信
	坂 本 美 麗
	千 葉 公 一
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
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 978-4-339-07246-4 C3047 Printed in Japan

(柏原)



< 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。