

生物機械工学

数理モデルで生物の不思議に迫る

伊能 教夫【著】

コロナ社

まえがき

「生物機械工学」は、生物の形や動きについて機械工学的な観点から調べる学問である。魚の遊泳や鳥の飛翔は、じつに魅力的である。なぜ、あのよう華麗に泳いだり飛んだりできるのだろうか。魚や鳥の巧みな動きを人工的に実現できたら、さぞかし楽しいに違いない。このような素朴な好奇心や夢が「生物機械工学」の原点といえる。

その意味でレオナルド・ダ・ヴィンチは、生物の仕組みを機械工学の視点で捉えた先駆者である。彼の描いた人間や動物の解剖図には、生物を力学的に捉える発想が見て取れる。レオナルドの時代から500年の月日が流れた。工学技術は飛躍的に発展し、われわれの生活はすこぶる便利になった。生物の形や機能はマイクロレベルでの議論が可能になった。細胞一つひとつの挙動も調べられるようになった。

しかし、われわれが暮らしているマクロレベルの世界に立ち返ってみると、説明が難しい事柄もたくさん残っている。例えば、本書で紹介する基礎代謝率の法則性も十分な説明ができていない。生物を総合的に理解するには、マイクロレベルとマクロレベルの二つの方向の探求が必要であると考えている。

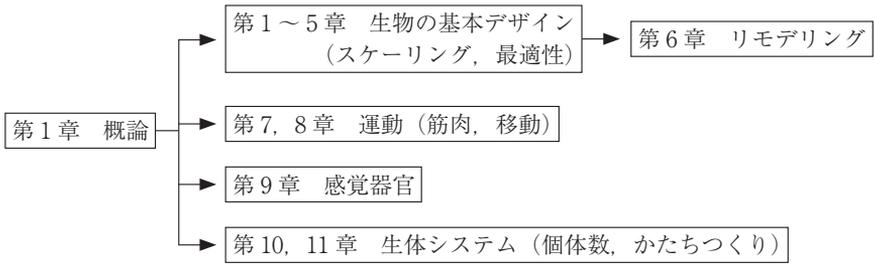
本書は、生物機械工学の入門書ではあるが、工学的視点から見えてくる生物特有の特徴を紹介することを主眼に置いた。解析的な記述では、大学初学年でも学べるようにできるだけ平易に説明することを心がけた。また、本書で扱う内容は生物機械工学の原点に戻って「おもしろい」と感じる事項を先人達の研究報告を中心に筆者の判断で選んだ。このため、読者によっては内容に偏りがあると感じるかもしれないが、この点はお許しいただきたい。生物を機械工学的観点から眺めてみるという、楽しさと難しさを味わっていただけたら幸いである。

2018年9月

伊能 教夫

本書の構成

本書は全11章からなり、第1章「概論」から始まって大きく四つの流れになっている。前半部（第1～5章）で生物の形に関する特徴について順を追って説明している。後半部（第7章以降）は、それ以外の生物的特徴を紹介している。もちろん、興味のある章から読んでいただいて結構である。



目 次

第1章 概 論

1.1 生物機械工学が扱う研究対象	1
1.2 数理モデルについて	3
1.3 生物機械工学で扱う具体例	5
1.3.1 樹木の枝分かれ	5
参考 1.1：はりの材料力学	9
1.3.2 動物の跳躍高さ	12
1.3.3 馬 の 歩 行	16
コラム 生物に学ぶことは役に立つか？	17
植物の七不思議 その1：枝の断面形状	18
演 習 問 題	19
引用・参考文献	20

第2章 スケーリングと次元解析

2.1 スケーリングとアロメトリー	22
2.2 骨の長さや直径のスケーリング	24
2.3 基礎代謝率	26
2.4 鼓動のスケーリング	28
2.5 寿命のスケーリング	29
2.6 次 元 解 析	30

植物の七不思議 その2：枝の形状	33
演習問題	34
引用・参考文献	35

第3章 0.75乗則をめぐる議論

3.1 弾性相似則モデルによる0.75乗則の導出	37
3.2 生体組織の自己相似性に着目した学説	42
参考 3.1：オイラーの座屈条件について	47
参考 3.2：フラクタルについて	48
参考 3.3：式(3.20)の説明	49
演習問題	50
引用・参考文献	51

第4章 血管の分岐

4.1 血管の3乗則	53
4.2 血管の分岐角度	56
4.3 血管の適応フィードバック	58
参考 4.1： $P_m = \Delta pf$ と表せる理由	61
参考 4.2：ハーゲン・ポアズイユ流れの導出	61
植物の七不思議 その3：樹皮の修復	63
演習問題	64
引用・参考文献	64

第5章 長骨の厚さに関する最適性

5.1 長骨の幾何学的関係	65
---------------	----

5.2 骨強度を基準にした最適値	68
5.3 たわみ量を基準にした最適値	71
5.4 衝撃荷重を基準にした最適値	72
植物の七不思議 その4：根の力学的適応	74
演習問題	75
引用・参考文献	76

第6章 生体組織のリモデリングと数理モデル

6.1 生体組織のリモデリング	77
6.1.1 骨のリモデリング	78
6.1.2 血管, 筋肉, 神経, 樹木のリモデリング	81
6.1.3 リモデリングのまとめ	82
6.2 生体組織のリモデリングに着目した数理モデル	83
6.2.1 骨に学んだモデル	83
6.2.2 シミュレーション手法	84
6.2.3 ローカルルールによるシステムの挙動	86
6.2.4 位相構造の生成シミュレーション	87
植物の七不思議 その5：太陽光への適応	90
演習問題	90
引用・参考文献	92

第7章 筋肉の力学特性

7.1 筋肉の種類	94
参考 7.1：速筋と遅筋	96
7.2 筋肉の力学特性	96
7.3 筋肉が発揮するパワー	98
7.4 筋肉の効率について	99

7.5 DC モータとの特性比較	101
演習問題	102
引用・参考文献	102

第8章 生物の移動

8.1 移動仕事率	103
8.2 移動仕事率の簡単な計算例	105
8.3 歩行時の消費エネルギーを決める二つの要素	107
8.4 実験に基づく歩行時の移動仕事率	108
8.5 なぜ最適な速度が存在するのか	109
8.6 実験式の妥当性の検討	111
参考 8.1: 慣性モーメント	115
植物の七不思議 その6: 頂上の覇権争い	116
演習問題	116
引用・参考文献	117

第9章 生物の感覚器官

9.1 感覚器とセンサ	118
9.2 光と音の物理量について	119
9.2.1 光に関する単位	119
9.2.2 音に関する単位	121
9.3 人間の感覚器官	122
9.3.1 人間の視覚	122
9.3.2 人間の聴覚	126
9.3.3 人間の触覚	128
9.4 昆虫の感覚器官	129

9.4.1 昆虫の視覚	130
9.4.2 昆虫の聴覚	133
植物の七不思議 その7: 隣り合う樹木	135
演習問題	135
引用・参考文献	136

第10章 個体数の増減

10.1 1種類の生物の増減を表すモデル (ロジスティック方程式)	138
10.2 差分化されたロジスティック方程式の挙動	141
10.3 2種類の生物の増減を表すモデル (Lotka-Volterra 方程式)	144
10.4 Lotka-Volterra 方程式の挙動	145
10.5 Lotka-Volterra 方程式の数値計算	148
演習問題	149
引用・参考文献	151

第11章 生物の形づくり

11.1 タンパク質の生成	152
11.2 チューリングとノイマン	155
11.2.1 チューリングマシン	155
11.2.2 チューリングモデル	157
11.2.3 ノイマンの自己複製機械	159
11.3 セルオートマトン	159
11.3.1 1次元セルオートマトンの例	159
11.3.2 2次元セルオートマトンの例: ライフゲーム	161
11.4 L シ ス テ ム	163
植物の七不思議 番外編: 黄金比	164

演習問題	166
引用・参考文献	167
あ と が き	169
演習問題の解答	170
索 引	176

1. 概 論

「生物機械工学」とは、生物と機械工学を組み合わせた造語であり、生物を機械工学的な視点で議論する境界領域の学問分野を指す^{1)†}。機械工学的な観点から生物を眺めてみると、従来の生物学とは異なるおもしろさが見えてくる。このサワリの部分を知っていただくのが本章の役目である。まず、本書が扱う生物機械工学の範囲について述べる。つぎに、具体的な例を挙げながら「生物機械工学」の一端を紹介していこう。

1.1 生物機械工学が扱う研究対象

「バイオ」と名の付く言葉は科学雑誌では頻繁に登場するが、最近では日常生活でも耳にするようになった。バイオエンジニアリング、バイオメカニクス、バイオテクノロジー…といった表記の言葉である。これらは、言葉の意味が必ずしも明確に定義されているわけではない。また、研究の進展につれて使用範囲が変わってくることもある。しかし、何もないよりはたまかではあるが「バイオ」全般について見通しが付く分類があったほうがよいだろう。

筆者の独断ではあるが図 1.1 をご覧いただきたい。使用頻度の多い「バイオ」の名が付く言葉を三つの学問分野で位置づけてみた。三つの学問分野とは、機械系分野、化学系分野、情報系（情報システム系としたほうがよいかもしれない）分野である。これらの学問分野を軸にして「バイオ」の研究分野を位置づけようというものである。三つの学問分野は、それぞれが独立性を持つ

† 肩付きの数字は、章末の引用・参考文献番号を表す。

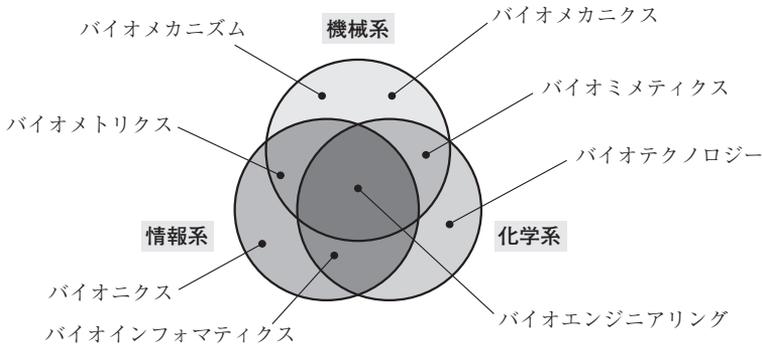


図 1.1 「バイオ」の名が付く言葉と三つの学問分野

ているが、生物と関わるような境界領域の研究では、二つ以上の学問分野の知識が必要になることが多い。ここでは、そのことを強調するためにたがいの学問分野を接近させて描いている。本書では主として機械系の円内の題材について扱う。

「バイオ」に関係する言葉はほかにもあるが、ここでは図中に示した言葉を簡単に説明しておこう。

・**バイオエンジニアリング**： 「バイオ」の分野を総称する言葉として機械系、化学系、情報系、いずれの学問分野にも用いられている。生物工学と訳されることがある。

・**バイオメカニクス**： 骨や歯などの生体の硬組織、血管や筋肉などの軟組織の力学的性質を研究する分野である。日本語で「生体力学」と訳されることが多い。

・**バイオメカニズム**： 身体の動きに関する研究分野で用いられているが、バイオメカニクスとほぼ同じ意味で使用される場合もある。

・**バイオミメティクス**： 生物模倣工学と訳される。生物の動きや形、あるいは生体組織の微細構造を参考にして優れた人工物を創り出そうという研究分野である。「模倣」という言葉にネガティブなイメージを感じるかもしれないが、本当の意味で生物を模倣するには、現象の本質を理解する必要がある。

・**バイオテクノロジー**： ミクロレベルで生命現象を扱う研究分野である。

遺伝子操作を視野に入れた研究で使用されることが多かったが、最近では細胞レベルの機械的特徴を調べる研究も始まっている。

・**バイオニクス**： 生体情報工学と訳される。生物の視覚、聴覚、触覚などの仕組みを工学的に探る研究分野である。また、この知見を応用して人体機能をサポートする研究もここに入る。

・**バイオインフォマティクス**： 遺伝子配列を情報として扱う研究分野である。最近のコンピュータ性能の向上に伴って大量の生体情報から意味のある情報を抽出する研究が盛んになっている。

・**バイオメトリクス**： 生物の形は個体ごとに微妙に異なっている。例えば手のひらや指の血管は、分岐の仕方が人によって千差万別であり、この特徴を利用して個人を特定する技術がセキュリティシステムに応用されている。

1.2 数理モデルについて

これからいくつかの具体例を紹介していくが、工学的な視点から生物の不思議に迫るためには、現象を分析するための道具が必要である。それが**数理モデル** (mathematical model) である。数理モデルは、生体機械工学に限らずいろいろな分野で重要であり、学ぶ機会が多いと思うので、ここでは大体のイメージをつかんでもらうための説明をしておこう。

例えば、**図 1.2 (a)** のような走行中の自動車を対象とすることにしよう。数理モデルは、注目する現象で表現する式が変わってくる。ここでは、自動車の乗り心地に関係する座席の振動について調べたいとする。

図 (b) は、自動車の運動を振動現象に注目してモデル化したものである。自動車の速度を一定速度と仮定して、タイヤから受ける道路の凸凹による座席の運動状態を調べるために、車体の質量 M と 2 組のばね定数 k_1, k_2 とダンパ (振動を抑える緩衝器) c_1, c_2 でモデル化している。この場合の座席の運動は、絶対座標系から見た上下方向の変位 y と紙面に垂直な回転方向 θ の二つの変数で表現されている。道路の凸凹は、走行時にタイヤが受ける時間的な変位

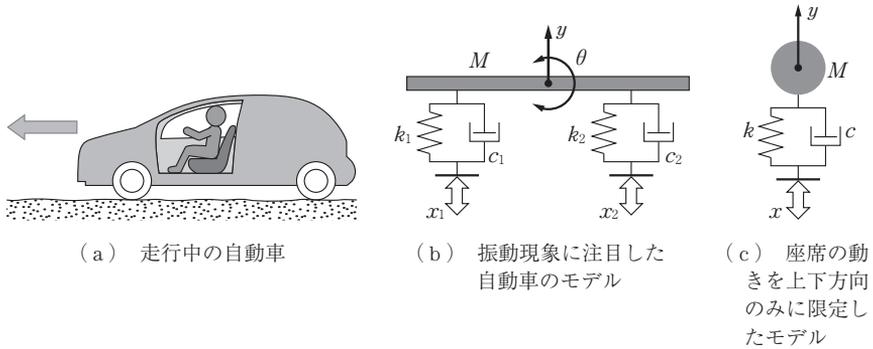


図 1.2 自動車のモデル化

x_1 , x_2 であり、これが車のモデルの入力となる。図 (c) は、さらに簡略化して座席の動きを上下方向のみに限定したモデルである。

このようなモデルに基づいて数理的な解析が行われる。解析には運動方程式が必要であり、数理モデルの変数が多いと必要な方程式も多くなる。例えば図 (b) は、2 自由度の運動方程式、また図 (c) は 1 自由度の運動方程式 ($M\ddot{y} + c\dot{y} + ky = c\dot{x} + kx$) で表せる。具体的な数式で表現できない場合は、モデル化なしで直接数値シミュレーションを実施する方法もある。

数理モデルは、注目する現象をどのくらい正確に調べたいかで変わってくる。詳細な挙動を調べるには、精密な数理モデルでシミュレーションを行う必要がある。その際、すべての条件について調べようとすると膨大な時間とコストがかかり、重要なポイントがどこかを見失う恐れもある。まずは簡略化した数理モデルを使うほうが全体像を把握しやすい。本書のように生物現象を対象とする場合は、俯瞰的に現象を把握する必要があり、簡略化した数理モデルが重要な役割を果たす。

1.3 生物機械工学で扱う具体例

それではつぎに、機械工学の観点から生物を眺めた場合の具体例を紹介しよう。ここでは樹木の枝分かれ、動物の跳躍高さ、馬の歩行効率について述べる。

1.3.1 樹木の枝分かれ

樹木の枝の直径は、樹木の成長とともに太くなる。当たり前だと思うかもしれないが、ここに不思議を感じてもらうのが本書の役目である。このことを力学的に考えてみると、枝には葉が茂っているので、その重さで折れないように太くなると理屈が付く。そうであるならば枝の太さと重量には何らかの法則性が成立すると予想される。この発想が大事である。

C. D. Murray は、11 種類の樹木について大小さまざまな枝を切って、根元の枝の周長と重量を計測した²⁾。その計測値を両対数軸で示したものが図 1.3 のグラフである[†]。

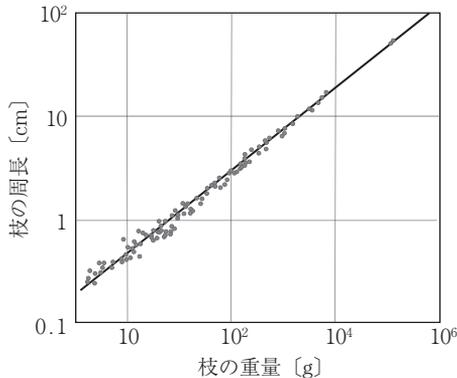


図 1.3 周長と重量の関係（文献 2 を参考に
して作成）

† 対数グラフについてはご存知かと思うが、指数関数的な関係を調べるのに有用であるので、第 2 章で説明する。

索 引

【あ】	筋肉	94
アロメトリー	筋肉の熱定数	100
	【け】	
【い】	血管の3乗則	53
位相構造	血管の分岐回数	42
移動仕事率	血管の分岐角度	56
	【こ】	
【う】	光子	123
馬の歩行	光束	119
運動野	光度	119
	合目的性	152
【え】	個眼	129
枝の2.5乗則	骨格筋	94
枝の法則性	骨芽細胞	79
	コッホ曲線	48
【お】	コドン	153
オイラーの座屈条件式	【さ】	
横紋筋	最小材料最大強度説	78
応力	再神経支配	81
音のパワー	材料強度	7
音圧	材料力学	6
音圧レベル	座屈モデル	38
	サルコメア	95
【か】	三半規管	126
海綿骨	【し】	
ガリレオ・ガリレイ	シグモイド曲線	140
感覚野	次元解析	30
桿体	自己相似性	8
	自己相似的	42
【き】	視細胞	123
幾何学的相似則	支持機能	66
基礎代謝率		
基礎代謝量		
機能的適応		
	視神経	122
	自由神経終末	128
	重力加速度	14
	樹木の枝分かれ	5
	上位概念	40
	照度	119
	ジョンストン器官	134
	自律分散システム	83
	心筋	94
	人口論	138
	【す】	
	随意筋	95
	水晶体	122
	錐体	123
	数理モデル	3
	スケーリング	13, 22
	スケーリング則	22
	ずり応力	58
	【せ】	
	生長変形法	85
	生物機械工学	1
	セルオートマトン	159
	センサ	118
	【そ】	
	造血機能	66
	側抑制結合	125
	速筋	96
	【た】	
	大腿四頭筋	15
	体表パターン	157
	多峰性	88

単位立体角 120
 弾性相似則モデル 37
 断面係数 7
 断面二次モーメント 7

【ち】

遅筋 96
 緻密骨 65
 中枢システム 83
 チューリング 155
 チューリングマシン 155
 聴覚細胞 126

【て】

定常状態 145
 伝搬速度 31

【と】

等尺性 98
 等尺性収縮 96
 等張性収縮 96
 動物の跳躍高さ 12

【な】

内臓筋 94

【ね】

熱放散 27

【の】

ノイマン 155

【は】

バイオインフォマティクス 3
 バイオエンジニアリング 2
 バイオテクノロジー 2

バイオニクス 3
 バイオミメティクス 2
 バイオメカニクス 2
 バイオメカニズム 2
 バイオメトリクス 3
 ハーゲン・ポアズイユ流れ

55
 破骨細胞 79
 パチニー小体 128
 パリティチェック 156
 反復写像 142

【ひ】

光の回折 132
 ひずみ 10
 評価基準 67

【ふ】

複眼 129
 不随意筋 95
 フラクタル 48
 フラクタル構造 42
 フラクタル次元 49
 振り子の周期 30
 フレッチャーマンソンカーブ 127

分析と総合 152

【へ】

平滑筋 94
 平衡点近傍 145
 ペンフィールドの図 128

【ほ】

歩容 16

【む】

無次元量 104

【め】

メルケル小体 128

【も】

毛細血管 42

【や】

ヤング率 11

【ら】

ライフゲーム 161

【り】

離散力学系 141
 リボソーム 153
 リモデリング 77
 両対数軸 23
 輪郭抽出 125

【る】

ルフィニ小体 128

【ろ】

ローカルルール 83, 160, 161
 ロジスティック関数 139
 ロジスティック曲線 139
 ロジスティック方程式 139
 ロード・レイリー法 30

【A】

allometry 23
 analysis and synthesis 152

【C】

cellular automaton 159
 cobwebbing method 142

【D】

digital signal processor 131
 dimension analysis 30
 DNA 152

DSP 131

[F]

functional adaptation 77

[G]

Gabrielle-von Karman
ダイアグラム 104

Galileo Galilei 24

game of life 161

geometric similarity law 22

[H]

Hagen-Poiseuille flow 55

[L]

logistic curve 139

logistic equation 139

logistic function 139

Lord Rayley method 30

Lotka-Volterra 方程式 143

Lotka-Volterra equation 143

L-system 162

L システム 162

[M]

mathematical model 3

metabolic rate 26

MKS 単位系 104

[R]

remodeling 77

RNA 153

[S]

scaling 22

scaling law 22

self-similarity 8

sensor 118

SI 単位系 31

specific power 103

S 字曲線 140

[T]

Turing machine 155

— 著者略歴 —

- 1976年 東京工業大学工学部機械物理工学科卒業
1978年 東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了（機械物理学専攻）
1985年 工学博士（東京工業大学）
1989年 東京工業大学助教授
1994年 東京工業大学大学院助教授
2000年 東京工業大学大学院教授
現在に至る

生物機械工学—数理モデルで生物の不思議に迫る—

Biomechanical Engineering

— Approach to Wonders of Living Things by Mathematical Models —

© Norio Inou 2018

2018年11月16日 初版第1刷発行



検印省略

著者 伊 能 のり お
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 <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-06757-6 C3045 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。