

原点から学ぶ 力学の考え方

長松 昭男
長松 昌男 【共著】

発売 コロナ社

まえがき

力学を学ぶ際には、まず万有引力・重力・求心力・慣性力などの雑多な力の表現式や、ニュートン・フック・オイラーなどの偉人により提唱された多数の法則・原理・公式を丸暗記させられ、次に複雑な運動方程式を立てて解かせられる。そのため力学は多くの学生に嫌われている。もっと筋の通った分かり易い力学書はないだろうか？ 筆者はこのような思いから本書を著している。そして、力学を構成する数学・原理・法則の発見に至る時代背景・動機・相互関連を詳しく述べ、在来の古典力学を再整理することを試みる。

本書は、力学書であるにもかかわらず複雑な数式や難解な文章を全く含まず、文系の学生や理工学の初心者が読んでも容易に理解できる平易な内容になっている。

力学は、16世紀に力から運動への関係を始点として誕生した。その後19世紀末に、電気・熱・流体・材料・化学などの複合物理領域を貫くエネルギー保存則が確立した。続いて20世紀初頭に対称性の概念が数学から物理学に導入され、ニュートン力学から相対性理論・量子力学を経てゲージ対称性・超ひも理論などの先端宇宙理論に至る全物理学の原点が対称性とエネルギー保存にあることが判明した。

しかし現在も、私達がものづくりに用いる工学は始点からの力学である。これは、力学を単独で使う際にはこの方がはるかに便利であり、通常の製品開発でこれを直ちに变える理由も必要性も全く無いためである。

しかし、時代は動いている。昨今のものでづくりでは、力学が単なる力と運動の関係から飛び立ち、機械・電磁気・熱・流体・化学・材料の異分野間を自在に変換し流動するエネルギーを統合的に管理・制御し、併せて製品の機能・構造・寸法・配置・開発期間・コスト・性能を、企画段階でモデルを用いて0から予測し最適化するモデルベース開発に有効なCAEの構築が必須かつ急務である。

モデルベース開発に用いるCAEには大きい問題がある。まず、上記の複合物

理領域を統合する理論が存在しない現在、製品モデルをどの理論に頼ってどういう方法で構築するか？である。次に、製品の姿が不明で実験検証が全く不可能な開発初期段階から使用する製品モデルの正当性をどのように検証するか？である。モデルベース開発では、市販の CAE を購入しブラックボックスで使用する、という安易な方法は全く通用しない。

一般に困難な問題の解決方法を探る最適な方法は、原点に返ることである。本書では、力学のみの始点である力から運動への関係から物理学全体の原点である対称性とエネルギー保存則に観点を映し、力学への考え方を見直すことを試みている。

本書の概要は、以下のとおりである。

第 1 章 対称性とエネルギー ではまず、“対称性”の概念が古代の中国・メソポタミアで数学の中に生まれ、エジプト・ギリシャ・ローマでゆっくりと育成され、ヨーロッパで数多くの偉人により花を咲かせた経緯を述べている。やがて、対称性の概念は 20 世紀初頭に物理学に導入され、相対性理論・量子力学を経てゲージ対称性・超ひも理論など、実験検証が不可能な先端理論物理学の正当性を主張する唯一の根拠となるに至る歴史を簡単に説明している。次に、物理学全体を貫くエネルギー保存則について 0 から分かり易く解説し、その保存則と対称性が深い関係にあることを述べている。

第 2 章 始点からの力学 では、ルネサンス時代にガリレイ・ニュートン・オイラー等の偉人によって 15 世紀に誕生し、その後約 600 年を経た現在もなお通常のものづくり工学を支配する、“力から運動への関係”で構成される古典力学の概要を紹介すると共に、その特徴・有効性・適用範囲を示している。

第 3 章 力学エネルギー では、力学において運動エネルギーと位置エネルギーの和が保存される、という力学エネルギー保存則について説明している。

第 4 章 原点からの力学 は本書の中核部分である。20 世紀初頭に物理学の原点が対称性とエネルギー保存則にあることが判明した経緯を受け、古典力学の中で唯一力の原因が明らかである弾性体の力学を、対称性とエネルギーの観点から再整理することを試みている。

まず、力学の根幹を力の釣合からエネルギーの均衡に移し、これに基づき質量と弾性の機能を表現し直して、両者が対称で閉じた因果関係を演じていることを示す。次に、従来無関係と思われていたフックの法則（の時間微分）と運動の法則が対称関係にあることを述べる。また、運動エネルギーと位置エネルギーの間に対称性が成立することを立証する。さらに、力の作用反作用の法則と対称性を有する速度の作用反作用の法則を提示し、これがガリレイの相対性原理と同一な別表現であることを述べる。

これらにより、弾性体の力学を構成する事象・エネルギー・法則が相互に整然と関係し合って、古典力学のすっきりと一体化した全体像を構築している姿を紹介する。

補章 粘性 では、物質を構成する原子間に作用する微視的力学エネルギー（巨視的熱エネルギー）の観点から粘性を論じる。そして、粘性の発生機構、粘性と弾性の共通性と差異、速度比例粘性の発現機構、同一物質が固体・液体・気体の3形態を取る理由、凍結・溶解・結晶化・脆性破壊・蒸発などの物性変化のからくりを簡単に説明する。

力学は、応用物理学の中核に位置し膨大な内容を有している。本書でその全容を記述することは全く不可能であり、それは本書の目的ではない。著者は、力学を専門分野として生きてきた半世紀余の間に得た力学に対する観方・考え方の一端を本書で紹介しようとしているに過ぎない。とは言え、著者の浅学故の独断と偏りが本書の各所に見えることを認めざるを得ない。これに関しては読者の皆様に深くお詫び申し上げます。

東京都立大学の鈴木浩平名誉教授と吉村卓也教授には、半世紀に渡り研究分野における筆者の同輩として丁寧なご指導をいただいた。また、法政大学の御法川学教授には著者の教育と企業の両活動中絶えずご協力いただいた。さらに、キャテック(株)代表取締役天津成美氏と同社取締役西留千晶博士（工学）には、ベンチャー起業以来 30 年以上の長きに渡り学術を企業活動に実用する方法をご教示・ご指導いただいた。これらの方々に対し心から感謝申し上げます。

目 次

第 1 章 対称性とエネルギー

1. 1	対称性とは	1
1. 2	数学における対称性	2
1. 3	物理学における対称性	5
1. 3. 1	物理学と数学の対比	5
1. 3. 2	ネーターの定理	7
1. 3. 3	力学と対称性	8
1. 4	エネルギー	12
1. 4. 1	エネルギーとは	12
1. 4. 2	エネルギーの形態	16

第 2 章 始点からの力学

2. 1	力 と は	20
2. 2	力学の夜明け前	23
2. 3	力学の誕生	26
2. 3. 1	ニュートンの法則	26
(1)	慣性の法則	27
(2)	運動の法則	30
(3)	力の作用反作用の法則	32
2. 3. 2	フックの法則	33
2. 3. 3	力学特性：始点から	34
2. 3. 4	力の釣合と運動方程式	36

2. 4 始点からの力学の特徴	37
(1) 力と運動の力学	37
(2) 対称性の欠落	37
(3) 因果律の欠落	38

第3章 力学エネルギー

3. 1 運動エネルギー	40
3. 2 位置エネルギー	43
3. 3 力学エネルギーの保存	45
3. 3. 1 エネルギー保存則	45
3. 3. 2 力学エネルギー保存則	46

第4章 原点からの力学

4. 1 なぜ今力学の再整理か	49
4. 2 状態量と力学特性：原点から	51
4. 2. 1 状態量	51
4. 2. 2 力学特性	52
(1) 在来力学の考え方	52
(2) 弾性体の力学特性	53
(3) エネルギーに基づく定義	54
(4) 質量と弾性の対比	56
4. 3 弾性体の位置エネルギー	58
4. 4 力学法則の対称性	61
4. 4. 1 ニュートンの法則と対称性	61
(1) 弾性の法則（仮称）	64
(2) 力の法則（仮称）	64

(3) 速度の作用反作用の法則 (仮称)	65
4. 4. 2 フックの法則と対称性	66
4. 4. 3 運動量の法則と対称性	67
4. 4. 4 釣合則と連続則	68
4. 5 力学の全体像	69
4. 5. 1 弾性体の物理事象	70
4. 5. 2 法則の対称性	70

補章 粘 性

補1 粘性とは	73
補1. 1 歴史的背景	73
補1. 2 粘性の機能	74
補2 弾性と粘性	77
補3 粘性の発生機構	84
補3. 1 原子間ポテンシャルと粘性	84
補3. 2 力学エネルギーの散逸	92
補3. 3 速度比例粘性の発生理由	98
補4 固体・液体・気体の物性	100
参考文献	106
索引	107
人名索引	111

第 1 章 対称性とエネルギー

1. 1 対称性とは

著者は子供時代に、万華鏡を覗いて対称性の美しさに感動した覚えがある。対称性⁷⁾⁸⁾は、花びら・蝶の羽・雪の結晶など自然界における無数のパターンに表現され、数学・物理学・天文学・建築学などあらゆる学術の中核をなしている。宇宙のどこに行ってもまた何億年経っても、ベクトルの理論・運動の法則・電磁誘導の法則は変わらない。時空間不変性は連続対称性であり、対称性という言葉で代表される不変・普遍・不動の物理法則は自然界の荘厳さを表現し、宇宙が完全な論理・秩序・調和に支配されていることを示唆する。

原因を与えると結果が生じることを因果律が成立するという。因果律は代表的な時間連続対称性である。海の水は、蒸発して雲となり雨が降って、地上に落ちた水が川を流れて再び海に帰る。諸行無常・因果応報・諸象流転。因は果となり果は次の因となり、万事万象は必ず原因と結果を有し、巡り巡って永遠に継続し続けている。

対称性は「複数の事象間にある同等性」と定義される。双対性は 2 事象間の対称性を意味する。対称変換は対称性を持たせる変換を意味する。例えば数学では、円の回転は連続対称変換・正方形の 90°回転は対称変換である。力学や電磁気学では、力と速度（運動）・電流と電圧・電気と磁気は対称性（双対性）を有する。運動エネルギーと位置エネルギー・電気エネルギーと磁気エネルギーは対称（双対）関係にある⁵⁾。

数学は**真**であり物理学は**美しい**。絶対的な重要性和底知れない美しさを持つ対称性の追求と理解は、まず純粋数学で始まり物理学の中に後からついてきた。対称性は、紀元前数十世紀の中国やメソポタミア（イラン）でまず数学として発生し、ピラミッドや遺跡建造物に見られるように古代文明の中で育成され、やがて物理学の中に入り込んで発展を続け、現代の科学技術全体に革命をもたらすに至っている。例えば**相対性原理は、あらゆる時空間で物理法則が同一でなければならない**、という深い対称性の原理を中心に成り立っている。また**量子物理学は、素粒子を支配する自然法則は対称性から成り立っている**、ことを基本に置いている⁸⁾。

1. 2 数学における対称性

数学は、自然界を記述する人類共有の言語であり対称性を論理体系化する手段である。

古代のエジプト・ギリシャ・ローマ時代には、数学は主に**幾何学**として発達した（例：**ユークリッド**（**エウクレイデス** Eukleides, 英語名 Euclid, B.C.365-B.C.275）幾何学）。その後文明が南ヨーロッパから再び中東アラブの世界に波及した時期に**代数学**が誕生した。一方中世ヨーロッパでは、教育・学問の中心が民間から教会・修道院に移ると共に、社会全体が宗教・形而上学・哲学に支配されて形骸化し、科学の暗黒時代が長期間続いた^{10) 11)}。

教会からあまり抵抗を受けなかった純粋数学は、15世紀頃にアラブから再びイタリアに帰ってきて、ルネサンス期以降には数多くの天才数学者が続出した。数学と物理学の間にまだ垣根がなかったこの時代には、物理学の進歩も主に数学者が成し遂げた。以下に、物理学に関係が深い天才数学者の例をいくつか挙げる⁵⁾。

オイラー（Leonhard Euler, 1707–1783）は、複雑難解な差分形式で記述されていたニュートンの法則を簡明な微分形式に展開した。また、数学の中で重要な数である**指数**を表す記号 e と**単位複素数**を表す記号 i を初めて導入し（それ

ぞれ 1727 年と 1777 年), 複素指数関数が周期関数であることを証明し, 複素平面やオイラー角を定義する等, 数学を実数の世界からそれと対称性を有する虚数の世界に広げ, これら両者からなる複素数の世界を開拓した. 彼が複素数を用いることで証明した円周率 π ($\pi = 3.14159\dots$) と指数 e ($e = 2.71828\dots$) の驚くべき関係 $e^{i\pi} = (\exp(i\pi)) = -1$ は, 数学の中でも最も美しい関係式であるとされている.

ラグランジュ (Joseph Louis Lagrange, 1736–1813) は, 1777 年に傑作「解析力学」を著し, 著書名が示す新しい力学を創生した. 彼はこの本が図表を含まず, 力学の根底が数学に整然と支配されていることを誇りにした.

ラプラス (Laplace, Pierre Simon, Marquis de, 1749–1827) と **フーリエ** (Fourier, Jean Baptiste Joseph, Baron de, 1768–1830) はそれぞれ, ラプラス変換とフーリエ変換と呼ばれる対称変換を発見した. これらは共に, 情報化時代と呼ばれる現在文明の中核になっている.

ガウス (Gauss, Carl Friedrich, 1777–1855) は, 数学・天文学・力学・電磁気学において史上最高最多の成果を残した超天才であった. 例えばガウスは, **電磁気学**の根幹を支える 4 法則からなる **マクスウエルの方程式**のうち 2 つを提唱した (電界と磁界に関するガウスの法則). ガウスは, 自己顕示欲が無く謙虚であり, 自身の業績の多くを発表しなかった. 例えば, 現在振動・音響の計測・演算処理に不可欠である FFT (高速フーリエ変換) は, 1965 年にクーリーとターキーが初めて開発したとされてきたが, すでに 1805 年にガウスが開発していたことが最近発見された.

ハミルトン (Sir William Rowan Hamilton, 1805–1865) は, 少年時代から数学と光学の両分野において底知れぬ天才ぶりを発揮していた. 彼は力学と光学の類似性 = 数学的統一性を発見して両者の統合化を実現し, 今日数学・理論物理学・量子力学に広く使われる簡明な形式の力学系運動方程式が, 後にハミルトニアンと呼ばれ座標変換に左右されない 1 つの物理量から導かれることを示した.

対称性に焦点を当てて数学の発展を見るとき, まず特筆される数学者が, フ

ランス革命の動乱の唯中に生きた**ガロア**(Evariste Galois, 1811–1832)である⁸⁾。21歳の時に恋人をめぐる決闘で銃に打たれて死んだガロアは、数学に革命を起こす1冊の著書を残した。

彼は生前、代数学においてすべての5次方程式を厳密に解く方法を探っていた。5次方程式の厳密解が得られたとしても、一見したところ実用的には何も使えなかった。もし工学や天文学の問題に5次方程式が関係していても、数値解を必要な桁数だけ決定する方法は当時すでにいくつも存在していたので、厳密解の存在とそれを求める方法は数学者しか興味を持たず、数学のコンペに出して賞を獲得し有名になるだけしかない純粋数学の典型例と見なされていた。しかしそれは大きな間違いであった。この問題に対する答え、すなわち5次方程式には全体を統一的に満足する厳密解が存在しないという事実の発見・その理由の説明・解が得られるための条件の提示等がやがて、数学全体そして数理論理学の中身を根底から変えることになる。

ガロアの著書は、数学構造における対称性を記述し、数学を幾何・代数・三角法と言った数や形の学問から構造・過程の学問に変えた。ガロアのこの手法から、“群論”と呼ばれる対称性の論理体系（言語）が数学の1分野として誕生した。群論の“群”は“対称性の計算方法”とも言える。

ガロアによって初めて“対称性とは？”という問いに対する論理的に厳密に定義される正確な答えが可能になった。それまでの答えは、例えば“均衡の美”・“規則的”等という印象や特徴に訴えるあいまいな記述であった。しかしガロア以後の世界では、代数学はもはや方程式の中で数の記号を操作するだけではなく、構造・過程・対称変換などの深淵な構想を論理的に扱うものになった。数学をより抽象的・一般的で以前よりはるかに強力なものに変えたのである。

通常の数学で重要なのは代数方程式と微分方程式である。ガロアは群という対称概念を創出しそれを代数学に適用した。その後1900年頃までに、ガロアに続く数学者達によってこの概念は有限・離散から無限・連続に拡張され、幾何学と微分方程式に適用された。微分方程式を用いれば、流体の流れ・重力の作

用・惑星の運動・熱の伝達・波の動き・磁気的作用・光や音の伝搬など物理学における重要な諸現象を容易に表現できる。観察したい量そのものではなくその変化率に目を向ければ、自然界のパターンは単純になる。群論の微分方程式への適用によって後に対称性が物理学全体をけん引するための素地が完成した。

この数学言語はその後科学の隅々にまで広がり、近世代の**相対性原理**・**量子力学**を経て現在、両者を統合する**ゲージ不変性**・**万物理論**などの先端物理理論の中核となっている⁷⁾。

数学と物理学を結ぶ道を初めて具体的に開通させたのが、**ネーター** (Amalie Emmy Noether, 1878–1935) である⁷⁾。彼女については、元来数学者であったにもかかわらず物理学に対する貢献が著しいので、次節で述べる。

1. 3 物理学における対称性

自然界には数限りない対称性が存在している、というよりも自然界が対称性そのものであるという方がふさわしい。例えば、宇宙には中心点と言うものはなくどこの点も「中心」である。また、物質と反物質・電子と陽電子・陽子と反陽子など、宇宙を構成する万物は対称である。物理学はこの自然界を探求する学問であり、それを支えるすべての**物理法則**は宇宙の時間・位置・方向に左右されない。宇宙に存在するすべての物理法則とそれらを構成する**基礎定数**(光の速度等)が不変不動であることは、実験的に証明されたまぎれもない事実である。例えば時間的には、アフリカ西部ガボン共和国オクロ村のウラン鉱床の調査から、宇宙は20億年前にも現在と同じ物理法則に支配されていたことが、1915年に10億分の1の精度で証明されている⁸⁾。また空間的には、遠く離れたアンドロメダ星雲内でも銀河星雲内と同一の物理法則が成立していることが観測されている⁷⁾。

1. 3. 1 物理学と数学の対比

真理は、数学では「論理的証明」、物理学では「実験と観察」により明らかに

索引

【あ行】

位置	34
位置エネルギー	44
1自由度系	36
位置の定義	67
位置保存の定義	67
因果関係	55, 65
因果律	1, 39
インピートゥス	24
運動	8, 20, 51
運動エネルギー	42
運動の法則	30
運動方程式	36
運動量	9
運動量の法則	67
運動量保存の法則	67
永久運動（第1種の）	46
永久運動（第2種の）	46
液体	100, 104
エーテル	7
エネルギー	12, 41
エネルギー原理	74, 78
エネルギー保存則	7, 10, 12, 46
遠隔力	21, 62

【か行】

外延量	24
外力	33
化学エネルギー	18
加速度	22, 34
形	34
活力	9, 40
ガラス状態	104
ガリレイ系	29
ガリレイの相対性原理	29, 65
ガリレイ変換	14
慣性	31, 34
慣性系	28
慣性座標系	28
慣性の法則	27
慣性力	35
幾何学	2
気体	101, 105
基本状態量	51
基礎定数	5
基本単位系	15
共有結合	102
近接力	21, 62
群論	4
ゲージ対称性	8
結晶構造	96, 100, 102

ケプラーの3法則	26
原子間ポテンシャル	84
減衰	77
原点	i, 49
原理	6
交換斥力	85
公式	6
格子振動	101
剛性	35, 53
剛体	34
公理	6
国際単位系	15
固体	97, 100, 101
古典力学	26, 61
固有力	28, 30

【さ行】

作用	22, 32
作用反作用の法則（力の）	32
作用反作用の法則（速度の）	63, 65
作用力	27, 61
散逸関数	76
CAE	50
磁界	17
磁気エネルギー	17
時間対称性	39, 63, 65
仕事	12
仕事率	15
指数	2

質点	34
質点系	34
始点	i, 49
質量	9, 34, 35
質量の機能（静的・動的）	54
磁場	17
シミュレーション	50
重力	22
重力加速度	25
重力波	21
重力場	79
ジュール	15
瞬時エネルギー	52
状態量	51
蒸発	104
脆性体	96
脆性破壊	104
静電エネルギー	17
絶対空間	29
絶対時間	29
相対性原理	2, 5
双対	51
双対性	1
層流	99
速度	34, 54
速度の連続	55
速度の連続の法則	69
速度比例粘性	77, 98
塑性変形	102

【た行】

対 称	51
対称性	1, 7, 12
対称変換	1
代数学	2
ダランベールの原理	36, 69
弾 性	53
弾性域	89
弾性エネルギー	53, 58
弾性体	34, 53
弾性の機能（静的・動的）	54
弾性の場合	80
弾性の法則	63, 64
弾性変形	102
力	9, 51, 54
力の釣合	55
力の釣合の法則	36, 69
力の法則	63, 64
地動説	25
超伝導	101
超ひも理論	8
定 理	6
て こ	12
電 荷	21
電 界	17, 21
電気力	20
電子雲	85
電磁気学	3
電磁波	17

天動説	9, 25
電気エネルギー	17
電気双極子モーメント	85
電磁エネルギー	18
電 場	17, 21
凍 結	104
等ポテンシャル面	47
動 力	15

【な行】

内包量	25
ニュートン（単位）	15
ニュートンの法則	9, 26
ニュートン力学	34
ネーターの定理	7
熱エネルギー	16
熱エネルギーの散逸	95
熱膨張	103
熱励起	95, 101
粘 性	35, 73
粘性域	90
粘性体	83
粘性抵抗力	35
粘性の場合	82, 83

【は行】

場	21, 44, 48, 62
パワー	15
パウリの排他律	85
反作用速度	63

反作用力	27, 61
万有引力	9, 20, 26
非極性原子	85
微視的運動エネルギー	75
ファンデルヴァールス引力	85
復元性	35
復元力	35
複素数	2
フックの法則	9, 33, 53
物性	100
物理法則	5
変位	35
変曲点	87
変形	35
法則	6
保存力	47
保存力の場	47
ポテンシャルエネルギー	44
ポテンシャル場	48

【ま行】

マクスウエルの方程式	3
モデル化	36, 50
モデルベース開発	50
ものづくり	34

【や行】

溶解	103
溶解熱	103

【ら行】

乱流	100
力学	9, 20
力学エネルギー	46
力学エネルギーの散逸	92
力学エネルギー保存則	10, 47
力学特性（原点から）	52
力学特性（始点から）	35
力学の始点	34, 38
力線	48
流体	96
量子物理学	2
量子力学	5
レナードジョーンズポテンシャル	85

【わ行】

ワット（単位）	16
---------	----

人名索引

アインシュタイン	19, 21	フック	9, 33, 74
アリストテレス	24, 38	プトレマイオス	25
アルキメデス	23	ブラーエ	9, 26
オイラー	2, 27	ブラドワーディン	24
オレム	24	ブランク	14
ガウス	3	フリーエ	3
ガリレイ	9, 26	プラントル	74
ガロア	4	ベーコン	23
ケプラー	9, 26	ヘルムホルツ	7, 46, 48
コペルニクス	25	ベルヌーイ	27
コリオリ	41	ポアズイユ	74
ジュール	46, 48	墨子	23, 38
シュレーディンガー	6	マイヤー	46, 48
ダ・ヴィンチ	25, 46	マクスウエル	7
ダランベール	36	マッハ	7
デカルト	38, 40	ヤング	41
ニュートン	9, 21, 26, 38, 74	ユークリッド	2, 23
ネーター	5, 49	ライブニッツ	9, 27, 40
パウリ	85	ラグランジュ	3, 38, 40
ハミルトン	3	ラプラス	3
ビュリダン	24	レイノルズ	74
ファンデルヴァールス	85	レナードジョーンズ	85

— 著者略歴 —

長松 昭男（ながまつ あきお）

1970年 東京工業大学大学院理工学研究科
博士課程修了
工学博士

1970年 東京工業大学工学部助手

1984年 東京工業大学工学部教授

2000年 東京工業大学名誉教授

法政大学工学部教授

2010年 キャタック株式会社勤務

現在に至る

長松 昌男（ながまつ まさお）

1997年 東京都立大学大学院工学研究科
博士後期課程修了
博士（工学）

1997年 北海道工業大学工学部講師

2008年 北海道工業大学創生工学部准教授

2014年 北海道科学大学工学部准教授

現在に至る

原点から学ぶ 力学の考え方

Concept of Mechanics from Basis of Physics

© Akio Nagamatsu, Masao Nagamatsu 2022

2022年1月25日 初版第1刷発行

検印省略

著者 長松昭男

長松昌男

発行者 長松昌男

印刷所 壮光舎印刷株式会社

製本所 株式会社 グリーン

112-0011 東京都文京区千石4-46-10

発売元 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 978-4-339-08228-9 C3053 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。