

現代光コンピューティング入門

博士(工学) 成瀬 誠 著

コロナ社

ま え が き

近年の人工知能（artificial intelligence：AI）の進歩に見られる社会のいっそうの情報化は、情報通信量やコンピューティング需要を劇的に増大させている。そのため、従来技術の限界を克服し、今後の情報社会を支える新たなコンピューティングの原理と技術の創出が期待されている。そのなかの一つが、光を使ったコンピューティング——**光コンピューティング**（photonic computing）——である。

光は、英語では light や photon、光に関連した技術領域（光技術）は、英語ではフォトンクス（photonics）と呼ばれる。光やフォトンクスはすでに情報通信社会に不可欠な基盤となっており、身近なところでは、光通信は現代のインターネットの根底を支え、携帯電話などに搭載されている画像センサなどはフォトンクスの典型例といえる。

光コンピューティングとは、光の役割が、光通信に見られる通信だけでなく、あるいは画像センサに見られる計測だけでなく、コンピューティングや知的機能にまで期待されていることの現れでもある。量子コンピューティング（quantum computing）は、最近ではメディアでも盛んに取り上げられるようになったが、光コンピューティングについてはわが国ではまだまだあまりよく知られてはいないかもしれない。一方、海外に目を向けると、光コンピューティングの研究は2010年代以来きわめて活発になっており、欧米ではスタートアップ企業も多数生まれている。

このような背景の下、本書は光コンピューティングの基礎から先端研究までを速習することを目指す。

光コンピューティングという研究領域は、「光」と「コンピューティング」という、一見するとだいぶ性質が異なる学術領域を基礎としている。そのため、初

学者にとっては、このような研究の前提知識を効率的に収集することは簡単ではないと思われるかもしれない。しかしながら、両者に関して必要最小限の知識や勘所さえつかみ取ってしまえば、光コンピューティング研究の最前線にまじむことはそれほど難しいことではない。

そこで、本書では「光」——物理学的な側面——と「コンピューティング」——情報学的な側面——を織り交ぜながら、順を追ってじわじわと議論を進めていく。まず、光コンピューティングが着目している光の代表的な性質を振り返る。そこで扱う内容の一部には、中学や高校の理科や物理で習うことも含まれているが、「光をコンピューティングに応用する」という展望を見据え、光の性質を「情報」という観点で捉えていく。つぎに、光コンピューティングを視野に入れながら現代の情報通信技術を俯瞰する。現状のコンピュータの構造的課題やコンピューティング需要の爆発的増大などの背景を概観するとともに、現代のコンピューティングの構造としての方向性をレビューする。

そののちに、本書の主題である現代の光コンピューティング研究を俯瞰する。最先端のフォトニクスを駆使した行列ベクトル演算やニューラルネットワークの実現、リザーバコンピューティング、イジングマシン、意思決定などの原理とシステムのメカニズムをできるだけ簡潔に説明する。光の基礎的な性質が情報機能とさまざまに融合し、光コンピューティングの新たな潮流がつつぎと生まれている様子が感じられるだろう。

AI や Beyond 5G などに見られる先端情報通信技術の社会における重要性から、コンピューティングへの強い要求は今後もとどまることなく進展すると考えられる。そのため光を含め、物理系を活用するコンピューティングの研究の活性度は今後も高い状態で推移すると期待される。本書をきっかけとして、このような研究領域の存在が認知され、研究者の知的^{じやつき}好奇心が惹起され、ひいては新たな視点に基づく革新的な光コンピューティングの研究がつつぎに生まれるという好循環につながれば幸いである。

本書の執筆は、石川正俊東京大学名誉教授、大津元一東京大学名誉教授、堀裕和山梨大学名誉教授という著者にとっての研究メンターによるご指導と、数

多くの協働研究者との研究協力を通じて得られた知見によるものである。関係各位に深く感謝申し上げます。また、内田淳史埼玉大学教授、鯉湖道紘国立情報学研究所教授、砂田哲金沢大学教授、菅野円隆埼玉大学准教授、川上哲志九州大学准教授には、本書について有益なフィードバックをいただき、深く感謝申し上げます。また、研究の実施に当たって、日本学術振興会科学研究費補助金、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CREST などの研究資金に支えられた。

2023年7月

成瀬 誠

誠に残念ながら、本書の著者である成瀬誠先生が書籍製作中にご逝去されました。本書発行に当たっては、ご遺族の了解を得て出版することができました。最後に、成瀬誠先生のご冥福を心よりお祈り申し上げます。

2024年1月

成瀬研究室プロジェクトシニアマネージャー 中田 俊彦

目 次

1. 光コンピューティングにおける光の基礎

1.1 「現代光コンピューティング入門」に向けて	1
1.2 現代光コンピューティングを見据えた光の基本的性質	2
1.2.1 光速とは何か	2
1.2.2 広帯域性	3
1.2.3 並列性	4
1.2.4 コヒーレンス	5
1.2.5 量子性と偏光	7
1.2.6 次元, 自由度, 多重化	9
1.3 光コンピューティングを見据えた光デバイス概観	15
1.3.1 レーザ	15
1.3.2 レーザカオス	18
1.3.3 光ファイバ	21
1.3.4 光回路	22
1.3.5 ビームスプリッタ, 光カップラ	24
1.3.6 光アイソレータ, 光サーキュレータ	26
1.3.7 回折, ホログラム	29
1.3.8 近接場光と励起移動型デバイス	33
1.3.9 光の階層性とシステム機能	35

2. 現代光コンピューティングのための 情報通信技術の俯瞰

2.1 コンピューティング需要の拡大とアーキテクチャ革新の必要性	39
2.1.1 コンピューティング需要の爆発的増大	39
2.1.2 従来技術の限界	41
2.1.3 電力消費の増大	42
2.1.4 アーキテクチャ革新の必要性	42
2.2 フォンノイマンアーキテクチャ	42
2.3 領域特化アーキテクチャ	44
2.3.1 領域特化アーキテクチャの概要	44
2.3.2 ニューラルネットワーク	47
2.3.3 シストリックアレー	52
2.4 光コミュニケーションの基盤	55
2.4.1 シャノンの定理	55
2.4.2 光インターコネクション	56

3. 現代光コンピューティング

3.1 光行列ベクトル演算, 光ニューラルネットワーク	59
3.1.1 空間並列活用型	59
3.1.2 コヒーレンス活用型	62
3.1.3 波長多重活用型	68
3.2 光リザーバコンピューティング	70
3.2.1 リザーバコンピューティングの基本構造	70
3.2.2 時間遅延型	72
3.2.3 空間並列型	75
3.2.4 導波路型	77

3.2.5	リザーバの構成方式の拡張	79
3.2.6	リザーバコンピューティングの機能の拡大	80
3.3	イジングマシン	81
3.3.1	イジングモデルの基底状態探索	81
3.3.2	フラストレーション	83
3.3.3	組合せ爆発	84
3.3.4	シミュレーテッドアニーリング	85
3.3.5	コヒーレントイジングマシン	86
3.3.6	空間光並列イジングマシン	87
3.4	強化学習, 意思決定	88
3.4.1	単一光子を用いた意思決定	89
3.4.2	レーザカオスを用いた超高速意思決定	91
3.4.3	カオスの遍歴を用いた意思決定	94
3.4.4	もつれ光子を用いた協力的意思決定	97
3.4.5	光を用いた意思決定の応用	102
3.5	粘菌コンピューティングから光コンピューティングへの展開	105
3.5.1	粘菌コンピューティング	105
3.5.2	粘菌とエネルギー移動の時空間ダイナミクス	106
3.5.3	バウンズバック則と解探索	108
3.6	シューベルトマシン	109
3.6.1	フォトクロミック材料における複雑な構造の形成	110
3.6.2	シューベルト多項式の生成	111
3.6.3	フォトクロミック結晶と近接場光を用いた順序認識機能	111

4. さらなる発展に向けて

引用・参考文献	119
索引	132

1

光コンピューティングにおける 光の基礎

1.1 「現代光コンピューティング入門」に向けて

光を情報処理に応用するという研究領域は、1960年代にレーザが発明される以前から始まり、非常に長い歴史を持つ。光を情報のキャリアとし、さらに光の有するさまざまな物理的性質を利用して情報を処理する構造がそれぞれの時代で探求され、時代とともに、光情報処理、光コンピューティング、情報光学、情報フォトニクス、フォトニックコンピューティングなどとさまざまな名称で呼ばれてきた^{1)†}。

このような長い歴史のなかでは、「光」に対しても「情報」に対しても、さまざまな立場から数多くの研究開発が展開されてきた。特に、1980年代は光コンピューティングの研究がきわめて活発に行われた。当時の研究は、書籍『光コンピューティングの事典』²⁾に系統立てた形で整理され、具体的な研究開発事例だけでなく、必要な光の物理的基礎や情報システムの基礎についても詳細に解説されている。

では、本書『現代光コンピューティング入門』はどのようなアプローチをとるのか？

「現代光コンピューティング入門」は、2010年代以降に革新的に発展してきた最近の新たな光コンピューティングを押さえなければならない。過去の光コンピューティングに対して概念的にも技術的にも異なる側面があり、そこが現

[†] 肩付き数字は、巻末の引用・参考文献番号を表す。

現代光コンピューティングの一つの大きな特徴でもある。実際に、光を用いた行列計算モジュールがスタートアップ企業から出荷されるに至っており、このような技術レベルの向上も見逃せない。

一方、現代光コンピューティングにおいても、引き続き、この分野が光と情報の境界領域に位置することは不変であり、特に光の基礎的知識は欠かせない基盤となる。ただし、個別の具体的な光科学や光デバイス技術に関して、過剰にかつ詳細に辞書的・網羅的にカバーすることは、入門レベルである本書にはなじまない。

そこで本書では、まず1章において、現代光コンピューティングへの応用展開を見据えつつ、光の基本的、代表的性質をレビューする。詳細については、文中で引用している書籍や論文を参照されたい。

1.2 現代光コンピューティングを見据えた光の基本的性質

1.2.1 光速とは何か

光の速さ c はおよそ $299\,792\,458\text{ m/s}$ であり、1秒間に地球を約7周半するほど高速である。この高速さをもって、光コンピューティングは「光速計算」などと呼ばれることもある。

ただし、**光速** (speed of light) は「光」に限った話ではない。通常、「光」とは、私たちの眼に見える光 (可視光) や光通信で使われる光 (近赤外光) など、波長 (wavelength) が 100 nm 程度から $10\text{ }\mu\text{m}$ 程度の範囲の電磁波を指す。これらの「光」は真空中を光速 c で伝搬する。これらの波長以外の電磁波、例えば無線 LAN (local area network) で使われている「電波」(例えば、周波数 2.4 GHz 、波長 12.5 cm) も真空中を光速 c で伝搬する。

いったい、光速とは何なのか？ その理解のためにはアインシュタインの特殊相対性理論が不可欠である³⁾。アインシュタインは、空間と時間をセットにして、私たちが住んでいる宇宙がどのように構成されているかを考えた。ゆがんでいない空間では、一様に進む時間の刻み dt と光速 c を距離に換算した目盛

cdt と、ゆがんでいない空間に平行移動で引いたまっすぐな基準線に沿って、座標を刻む目盛 dx , dy , dz をとり

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \quad (1.1)$$

が宇宙のどこにおいても変わらないものとしなければ、この宇宙に意味を見いだすことができないことに気が付いた。この ds は世界間隔 (world interval) と呼ばれる。

ここで出てくる光速 c は、時間を計る尺度と空間を計る尺度の変換係数である。このように、光速 c とは、時間と空間の変換係数であり、そもそも私たちが実際に住んでいる宇宙を規定しているものと理解しなければならない。1 メートルを空間の尺度、1 秒を時間の尺度とすれば、その変換係数である光速 c はおよそ 299 792 458 m/s となる。

光速 c はどのようなシステムにおいても一定であるので、光速が c から少し速くなったり、あるいは少し遅くなったりすることもない。このことから、光には進行方向に並行に振動する成分がなく、横波であることがわかる。これに対して、音や地震波などは進行方向に並行に振動する成分を有する縦波である。同じ波動現象とはいえ、光は時空を規定する光速を基礎としていて、音波などは媒質の存在を絶対的に必要とし、相互に著しく異なった側面を伴っている。

1.2.2 広帯域性

光を特徴付ける性質の一つは**広帯域性** (broadband performance) である。

ここでは、光通信で使われている波長 $1.55 \mu\text{m}$ の光を考える。この光は、1 秒間におよそ 194 兆回振動している (約 194 THz)。波が 1 秒間に何回振動するかを**周波数** (frequency) や**搬送周波数** (carrier frequency) と呼ぶ。実際の光は、「ある最小周波数」から「ある最大周波数」まで周波数に幅を持っている。この最大周波数と最小周波数の幅を**帯域幅** (bandwidth) と呼ぶ (図 1.1 参照)。光通信で使われる波長 $1.55 \mu\text{m}$ の光における帯域は 100 GHz 程度である。

一方、例えば 2.4 GHz 帯の無線 LAN では、たいていの場合、帯域幅は 20 MHz

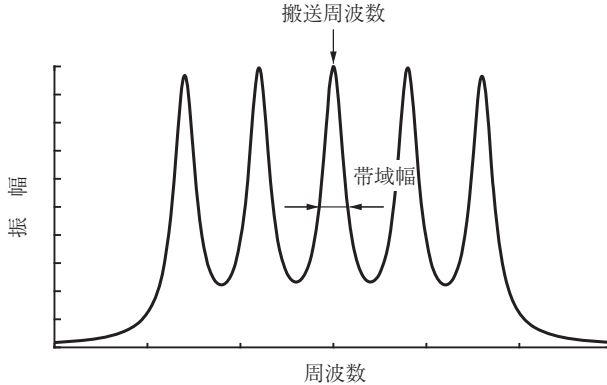


図 1.1 搬送周波数と帯域幅

程度に過ぎない。この簡単な例では、光の帯域幅は無線のそれよりも 5000 倍も大きい。このような光の広帯域性は、2.4.2 項で紹介する光通信の根底を支えており、現代の光コンピューティングの基盤となっている性質の一つである。

1.2.3 並列性

カメラで画像や映像を撮るとき、撮影の対象となる物体からカメラのなかの画像センサに向かって光が並列に伝わっている（複数点から出た光が同時に複数点に伝わる）（図 1.2(a) 参照）。このように光が並列に伝わるということ——**並列性**（parallelism）——は、私たちの生活において当たり前を観測される性質だが、光の特徴がよく表れており、最新の光コンピューティングでも活用されている。

単純なシステムとしてレンズ 1 枚の系を考える。レンズに並行な光が入射すると、レンズの作用によってレンズの焦点距離の位置に光が集まる（図 1.2(b) 参照）。これは並列の光線を一点に集めているが、「情報」の観点からは、ある面内の情報をレンズによって特定の位置に**集約**（summation）できることを意味している。

逆に、レンズの焦点位置に光源を配置すると、光源から出た光はレンズによって並行な光となる。つまり、光源という空間中の一点にあった情報が、レンズ

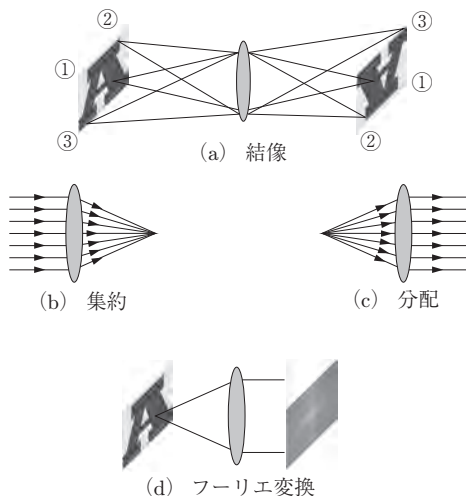


図 1.2 光の並列性：結像，集約，分配，フーリエ変換

によって面内の多数の場所に同時に**分配** (broadcast) されている (図 1.2(c) 参照)。

このように、「集約」「分配」などの機能を光で実現するということは、情報の観点において現代の光コンピューティングの基礎を支える重要な特質となっている。同様に、2次元情報の拡大，縮小，平行移動などもレンズやミラーを介した光波伝搬で実現できる。

さらに、レンズ1枚と光の伝搬だけで**フーリエ変換** (Fourier transformation) が実現できる (図 1.2(d), 1.3.7 項参照)。フーリエ変換とは、信号を周期信号の重ね合わせに変換する操作である。すなわち、光は空間中を伝搬するだけである種の信号処理を実現できる。光を用いたシステムでは、このような光の伝搬をいかに精度良く、かつ効率的に実現するかが、具体的なシステム設計上の課題になる。

1.2.4 コヒーレンス

波と波が重なったとき、それらがたがいに影響を与え合うことを**干渉** (inter-

索引

【あ】		数分割問題	84	光 速	2
アーキテクチャ	42	干 渉	5	広帯域性	3, 117
アクセラレータ	45	緩和振動	19	コヒーレンス	6
アトラクタ	81			コヒーレント	6
アムダールの法則	44	【き】		コヒーレントイジング	
		規格化平均二乗誤差	80	マシン	86
		基底状態	16	コンスタレーション	12
【い】		軌道角運動量	14		
意思決定	19, 88	強化学習	88	【さ】	
イジングマシン	81	競合的多本腕バンディット		サイドチャンネル攻撃	33
イジングモデル	81	問題	97	サロゲート法	93
——の基底状態探索	83	共振器	17		
位 相	12	行列ベクトル演算	49, 59	【し】	
位相器	12	極限性能	117	次 元	9
位相シフタ	12	近赤外光	2	シストリックアレー	52
位相変調	12	近接場光	34	自然放出	16
インコヒーレント	6	近接場光学	34	実世界接触能	117
インターコネクション		近接場光相互作用	37	シナプス	49
ボトルネック	43			自発的パラメトリック	
		【く】		下方変換	98
【え】		空間周波数	32	時分割多重	11
エネルギー移動	107	空間周波数フィルタリング		シミュレーテッド	
エネルギー供給系	17		33	アニーリング	85
		空間多重	13	シャノンエントロピー	96
【お】		空間光並列イジングマシン		シャノンの定理	55
オンオフキーイング	13		87	充足可能性問題	109
		空間光変調管	51	周波数	3
【か】		空間光変調器	31	集 約	4
回 折	29	空中計算	7	縮退パラメトリック	
回折光	29	組合せの数の爆発	84	発振器	86
回折光学素子	61, 76			シューベルト行列	111
階層型光システム	35	【け】		シューベルト多項式	111
階層的ホログラム	37	計算可能性	42	シューベルトマシン	113
カオス	19	計算機ホログラム	31	巡回セールスマン問題	106
カオスの遍歴	94	限界性能	118	順序認識	111
カオス秘匿通信	19	嫌光性	105	状態占有効果	106
カオスライダ	19			情報光学	1
可干渉性	6	【こ】		情報フォトニクス	1
確率振幅	9	光学禁制遷移	35	真性粘菌	105
可視光	2	構造的限界	118	振 幅	12

振幅変調	12	ニューロモルフィック コンピューティング	49	フォトニクス	1
【す】		ニューロン	49	フォトニック結晶	79
スピン	81			フォトニックコンピュー ティング	1
スペckルパターン	78	【ね】		フォンノイマンアーキ テクチャ	42
スマートピクセル	57	粘菌	105	フォンノイマンボトル ネック	43
【せ】		粘菌コンピューティング	105	複屈折性	28
制約充足問題	108	【は】		復調	12
世界間隔	3	配線型デバイス	33	符号誤り率	80
潜在能力	118	配線ボトルネック	44	不整合	113
【そ】		バウンスバック則	108	物理乱数生成	19
双極子間相互作用	37	波長	2, 10	フラストレーション	83
【た】		波長板	10	ブランク定数	16
帯域幅	3	波長多重	11	フーリエ変換	5, 31
耐タンパ性	34	搬送周波数	3	プロセッシングエレメント	52
多重化	9	半導体レーザ	17	分配	5
多重性	117	半波長板	10	【へ】	
多値変調	13	【ひ】		並列性	4
多本腕バンディット問題	88	光	2	偏光	7
単一光子	7, 89	——の回折限界	30	偏光子	10
【ち】		光アイソレータ	18, 26	偏光ビームスプリッタ	7
チャンネルボンディング	103	光アソシアトロン	50	変調	12
直交振幅変調	13	光異性化	110	変調器	12
【て】		光インターコネクション	56	偏波多重	10
デジタルマイクロミラー デバイス	76	光回路	22	【ほ】	
定常発振	19	光カップラ	25	ボトムアップ	110
低損失性	117	光コム	70	【ま】	
デナードスケーリング	41	光コンピューティング	1	マッハツェンダー干渉計	62
電気双極子	38	光サーキュレータ	27	マルチコア光ファイバ	14
電磁波	2	光情報処理	1	マルチモード光導波路	77
転倒	113	光ニューラルフィールド	78	【む】	
電波障害	24	光ファイバ	13, 21	ムーアの法則	41
伝搬光	34	光リザーバコンピュー ティング	19, 70, 72	【め】	
伝搬高速性	117	光励起移動	34	メモリウォール	43
【と】		非線形出力演算	49	面発光レーザ	17
動的チャンネル選択	102	非相反性	27	【も】	
動的モデル選択	104	非直交多元接続	102	もつれ光子	98
特異性	114	非ノイマン型アーキ テクチャ	44	戻り光	18
特殊相対性理論	2	ビームスプリッタ	24		
【に】		ピンボトルネック	44		
ニューラルネットワーク	47	【ふ】			
		ファブリペロー共振器	17		
		ファラデー効果	27		
		フォトクロミック材料	110		

	【ゆ】	リザーバ		【れ】	
誘導放出	16	コンピューティング	70	励起移動型デバイス	35
	【ら】	領域特化アーキテクチャ	45	励起状態	16
ランダムウォーク	93	量子コンピューティング	46	レーザ	1, 15
	【り】	量子性	7	レーザカオス	19, 92
リザーバ	70	量子ドット	34	レーザ媒質	17
		量子ドットネットワーク	107		
		量子力学	9		
		リング共振器	68		

	【A】		【G】		【P】	
AI	39	GPGPU	48	PBS	7	
AI エレクトロニクス	47	GPU	39	PE	52	
AirComp	7					
	【B】		【I】		【Q】	
Beyond 5G	102	IRDS	41	QAM	13	
Beyond Neumann アーキ テクチャ	44	I/O ボトルネック	43			
	【C】		【L】		【S】	
CGH	31	Lang-Kobayashi 方程式	19	SA	85	
CMAB	97	liquid state machine	72	Santa Fe 時系列	79	
CPU	41			SAT	109	
CSP	108			SLM	31	
	【D】		【M】		SPDC	98
DFB レーザ	17	MAB	88, 97		【T】	
DMD	76	MCF	14	TDM	11	
DOE	61	MMSE	80		【V】	
DOPO	86	MMWG	77	VCSEL	17	
DSA	45	MSLM	51		【W】	
	【E】	MZI	62			
echo state network	72					
EMI	24					
			【N】			
			NOMA	102	WDM	11
			NP 完全問題	109	~~~~~	
			【O】		【ギリシャ文字・数字】	
			OAM	14	$\lambda/2$ 波長板	10
					4f 光学系	33

— 著者略歴 —

1994年 東京大学工学部計数工学科卒業
1996年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了（計数工学専攻）
1999年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了（計数工学専攻）
博士（工学）
1999年 東京大学国際・産学共同センターリサーチ・アソシエイト
2000年 東京大学大学院助手
2002年 情報通信研究機構研究員（着任時は通信総合研究所）
2003年 情報通信研究機構主任研究員
2017年 情報通信研究機構プランニングマネージャー
～18年
2017年 情報通信研究機構総括研究員
2019年 東京大学大学院教授
2023年 逝去

現代光コンピューティング入門

Introduction to Modern Photonic Computing

© Makoto Naruse 2024

2024年5月7日 初版第1刷発行



検印省略

著者 なる せ まこと
成 瀬 誠
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来 真也
印刷所 三美印刷株式会社
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 978-4-339-02941-3 C3055 Printed in Japan

(西村)



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 03-5244-5088, 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。