

まえがき

電子デバイスとは、電子の挙動を操ることにより、ある電気信号を用いて他の電気信号を制御するための装置である。特に本書では半導体を用いたトランジスタと、それを利用した集積回路に焦点を当てる。

トランジスタは団塊の世代とはほぼ時を同じくして誕生し、既に還暦を過ぎた。発明当初予想もできなかった驚異的な進展を遂げ、今日の我々の日常生活になくてはならない物になっている。パーソナルコンピュータや携帯情報端末のみならず、家電製品や車でも必要不可欠な部品となっている。東日本大震災で半導体部品の生産中止に追い込まれたとき、操業を停止せざるを得なかった自動車工場のニュースを覚えておられる方も少なくないだろう。またインターネットのサーバやルータにも大量の半導体部品が使われている。

そもそもトランジスタや集積回路とは何か。どのように構成され、どのような機能を実現しているか、どのように利用されているか。物理現象から始めてデバイスの構造と機能、更に、集積回路への応用までを、できるだけ初学者にわかりやすく、基礎から説明することが本書の目的である。

本書を執筆するにあたっては、電子デバイスが現在置かれている状況を考え、何を学べば今後の新しい展開に対応できる基礎力が養えるのか、この点にも配慮した。これまでのトランジスタの発明から集積回路として進展する過程は、素子寸法の微細化による性能向上の追求であった。しかるに近年、トランジスタ寸法は原子スケールに近づき、専門家の間で微細化の限界が真剣に議論され始めた。更に、それを凌駕するための新しい技術展開の方向が模索されている。これまでの枠組みを超えた新しい芽も徐々に生まれつつある。これまでに蓄積された知見を整理して今後にも備えるよい時機ではないか。本書を執筆するにあたり、まずこの現状認識が重要であると考えた。

一方で、電子デバイスへの期待も年代とともに変化してきた。高速計算から情報処理へ、更に、今後は持続可能社会、人に優しい社会の実現に大きな役割を果たすことが期待されている。「いかに作るか」から「いかに使うか」の比重が今後ますます高まって行くであろう。電気電子工学のエンジニアとして新しい社会の実現を目指し、革新的技術やサービスの開発を進めるとき、電子デバイスと無関係ということはありません。そのため、将来、直接半導体産業に携わらないまでも、電子デバイスの基礎を学び、半導体を理解することは必須であると思われる。例えば我が国の総電力使用量の半分以上を占めるといわれるモータに対して

も、電子デバイスを駆使したきめ細かい制御が省エネに有効なことは理解できる。また、人間の活動を様々な側面から支援するロボットが注目されているが、その制御にも電子デバイスは欠かせない。電子デバイスによる「グリーン化」である。

更にいえば、トランジスタを集積させた現在の半導体技術は、人類が手にした最高の英知の一つであるといえる。例えば、最先端の半導体製品で使われる回路を東京 23 区の広さに拡大すると、回路を構成するトランジスタや配線はセンチメートル刻みで制御された構造を持っている。それを設計し、実際に量産し、社会に大きなインパクトを与えているという事実は驚異的なことであろう。様々な科学技術が人類に与えてきたインパクトの中でも、最大規模であると言っても過言ではないと思われる。単純にそれだけを考えても、電子デバイスを学ぶ価値が十分にあるといえるのではないだろうか。

本書を執筆するにあたり多くの貴重な助言をいただきました古屋一仁先生（東京工業高等専門学校長，東京工業大学名誉教授），神谷武志先生（独立行政法人大学評価・学位授与機構，東京大学名誉教授）をはじめとする電子情報通信学会教科書委員会の皆様に感謝します。また編集にあたりコロナ社には大変お世話になりました。お礼申し上げます。

2013 年 1 月

和 保 孝 夫

目次

1. 序論

1.1	対象とする電子デバイス	2
1.2	本書の構成	4
1.3	学習の指針	5

2. モデルデバイス

2.1	モデルデバイスの動作	8
2.2	デジタル回路への応用	9
2.2.1	スイッチとしてのモデルデバイス	9
2.2.2	NOT 回路	10
2.2.3	NAND 回路と NOR 回路	11
2.3	アナログ回路への応用	12
2.3.1	電圧制御電流源	12
2.3.2	増幅器の電圧利得	14
2.3.3	電流利得と高周波特性	14
	本章のまとめ	16
	理解度の確認	16

3. 半導体におけるキャリアの挙動

3.1	物質の電気伝導度	18
3.2	結晶構造とエネルギーバンド	19
3.2.1	シリコン原子	19
3.2.2	シリコン結晶	21

談話室	ダイヤモンド構造	23
	3.2.3 エネルギーバンド	23
3.3	電流の担い手：キャリア	26
	3.3.1 真性半導体のキャリア	26
	3.3.2 キャリヤ濃度の制御	28
談話室	Geと化合物半導体	31
3.4	フェルミ準位とキャリア濃度	31
	3.4.1 フェルミ分布関数とフェルミ準位	31
	3.4.2 真性半導体のフェルミ準位	33
	3.4.3 キャリヤ濃度とフェルミ準位	34
	3.4.4 一般の半導体のフェルミ準位	37
3.5	キャリアの輸送現象	39
	3.5.1 キャリヤのドリフト	39
	3.5.2 キャリヤの拡散と再結合	45
	本章のまとめ	49
	理解度の確認	50

4. pn 接 合

4.1	pn 接合のバンド図	52
	4.1.1 pn 接合の構造	52
	4.1.2 キャリヤの拡散と空乏層の形成	53
	4.1.3 電荷, 電界, 電位	55
	4.1.4 電子のエネルギーとバンド図	56
	4.1.5 pn 接合におけるフェルミ準位	58
4.2	pn 接合の電流電圧特性	59
	4.2.1 定性的考察	59
	4.2.2 電流連続の式	61
	4.2.3 電流電圧特性の導出	63
4.3	小信号等価回路	66
	4.3.1 小信号抵抗	66
	4.3.2 空乏層容量	68
4.4	pn 接合に関わる諸現象	70
	4.4.1 降伏現象	71

4.4.2 トンネルダイオード	72
本章のまとめ	74
理解度の確認	74

5. MOSFET

5.1 素子構造と動作原理	76
5.1.1 モデルデバイスの実現方法	76
談話室 トランジスタの語源	77
5.1.2 MOSFET の基本構造	78
5.1.3 n チャネル MOSFET	79
5.1.4 p チャネル MOSFET	81
5.2 MOS 構造と MS 構造	82
5.2.1 MOS 構造のバンド図	82
5.2.2 MOS 構造の空乏層	84
5.2.3 空乏/反転/蓄積状態	86
5.2.4 MS 構造の電流電圧特性	87
5.3 電流電圧特性	90
5.3.1 線形領域	91
5.3.2 飽和領域	93
5.3.3 エンハンスメント型とデプリーション型	96
5.3.4 チャネル長変調効果	97
5.4 等価回路と高速化の指針	98
5.4.1 低周波小信号等価回路	98
5.4.2 高周波小信号等価回路	102
本章のまとめ	105
理解度の確認	106

6. BJT

6.1 素子構造と基本動作	108
6.1.1 二つの pn 接合	108

6.1.2	端子名と回路記号	110
6.2	電流電圧特性	111
6.2.1	共通ベース配置	111
6.2.2	共通エミッタ配置	115
談話室	ヘテロ接合バイポーラトランジスタ	121
6.3	小信号等価回路	122
6.3.1	低周波小信号等価回路	122
6.3.2	拡散容量	124
6.3.3	電流増幅率と f_T	125
6.4	MOSFET との比較	126
	本章のまとめ	128
	理解度の確認	128

7. CMOS 論理回路

7.1	CMOS インバータ	130
7.1.1	機能と実現方法	130
7.1.2	回路構成と動作原理	132
7.1.3	レベル再生機能	134
7.2	消費電力と動作速度	135
7.2.1	消費電力の評価	135
7.2.2	インバータの寄生容量	138
7.2.3	動作速度の評価	140
7.3	論理回路の構成	144
7.3.1	NOR 回路と NAND 回路	144
7.3.2	複合ゲートと多段ゲート	145
7.3.3	レシオド回路とダイナミック回路	147
7.3.4	パスゲート	149
7.4	スケール則	151
談話室	リング発振器	153
	本章のまとめ	154
	理解度の確認	154

8. メモリ

8.1	メモリの基本構成	156
8.2	ROM	157
8.2.1	マスク ROM	157
8.2.2	PROM とフラッシュメモリ	160
8.3	RAM	166
8.3.1	SRAM	167
8.3.2	DRAM	168
	本章のまとめ	171
	理解度の確認	172

9. まとめと今後の展望

9.1	電子デバイスをめぐる大きな流れ	174
9.2	トランジスタから集積回路へ	178

引用・参考文献	181
索引	182

1

序 論

本章は、本書が対象とする電子デバイスの範囲と本書の構成を説明し、読者が本書を用いて電子デバイスを学習していく上での指針を与えることを目的とする。



1.1 対象とする電子デバイス

電子デバイスとは電子を利用して有用な機能を実現する仕掛けである。言い換えると電気信号を別の電気信号で制御する装置である。本書では図 1.1 で示すように、トランジスタとそれを組み合わせて構成した集積回路について説明する。更に集積回路を組み合わせることでモジュールを構成し、それを組み合わせてコンピュータや携帯情報機器が実現できる。これらも含めて広い意味で電子デバイス、あるいは半導体デバイスと呼ばれることもあるが、実線で囲んだ狭い意味の電子デバイスを取り扱う。

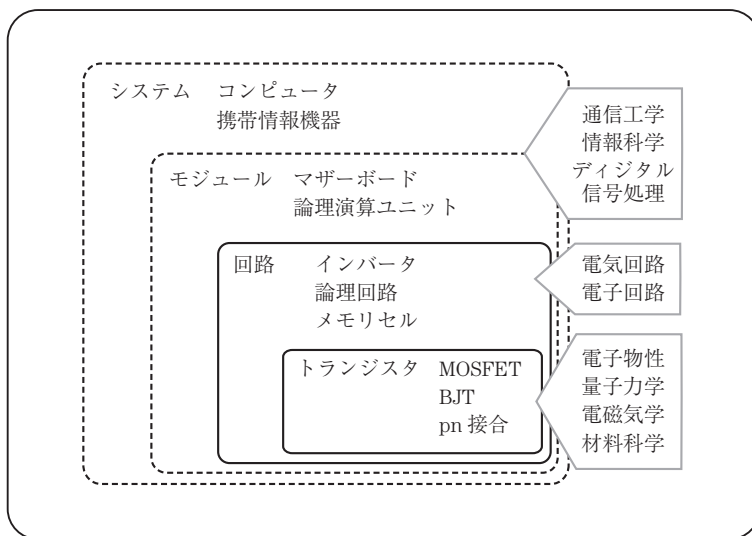


図 1.1 電子デバイスが関与する領域
(実線で囲んだ部分が本書の対象とする電子デバイスの範囲)

その他、広い意味で電子デバイスと考えてもよいが、本書の範囲外としたものには、発光/受光機能を持つ光デバイス、電力用素子（パワーデバイス）、高周波デバイス、各種センサなどが含まれる。これらを直接取り扱ってはいないが、半導体を利用したこれらの素子を理解する上で、本書で説明する基本的事項が役立つはずである。

今日、情報は「0」、「1」というビットを単位にしてデジタルシステムで処理される。実際には、電圧、電流、電荷量、電界/磁界の強さなどの電気信号によって表現されることが多い。電子デバイスはこれらの電気信号を対象とする。情報を表現するのに電気信号を用いる理由はいくつかあるが、導体から絶縁体まで物質の電気伝導度が広い範囲に広がっていて、電気信号の経路を容易に制御できること、そして何といたっても半導体を用いたトランジスタや集積回路の技術が発展したこと、を挙げることができる。

図 1.1 には本書の内容に関連する学問分野も合わせて示した。電子デバイスは半導体における電子現象を利用して電気信号を処理し、情報処理システムの構築に応用される。したがって、まず半導体と其中で起きる電子現象に関する知見が必要になる。電子のようなミクロな世界を記述する量子力学、半導体のように多数の電子が関与する現象を解明するための電子物性論、制御する信号と制御される信号との関わりを記述するための電磁気学、それぞれの分野が深く関わってくる。また、電子デバイスには高品質の半導体材料が必要であるため、それを取り扱う材料科学とも関連する。

一方システム側からの要求を満足するための複雑な機能を実現するには、トランジスタを組み合わせ回路を構成する必要がある。回路の分野では真空管時代から蓄積された多くの有用な知見があり、それを有効に利用することが必須となる。更に、近年、集積回路に搭載できるトランジスタの数が飛躍的に増大し、システム全体を集積回路の中に取り込むことも可能になっている。そのために、集積回路の開発には、通信工学や情報科学、デジタル信号処理などの分野との密接な連携も必要になってきた。

このように、電子デバイスは広い分野と関わって発展してきたので、本書でもそれに関する最小限の説明をすることにした。しかし、すべてをカバーすることは本書の範囲を超えているので、読者は必要に応じて関連分野の知識を習得しながら、電子デバイスの学習を続けて欲しい。本来、技術には切れ目がなく、カリキュラム内の各科目間のギャップを埋めることは読者の皆さんの努力にかかっている。

1.2 本書の構成

本書の構成を図 1.2 に示す。まず 2 章でモデルデバイスを導入し、トランジスタの概念を説明する。この部分は類書にはあまり見られない本書の特徴であり、何を実現しようとしていて、それはどのように応用できるかを、まず読者に知って欲しいために設けた。目標を明示することで、その後に引き続き章の理解を助けることを目的とする。

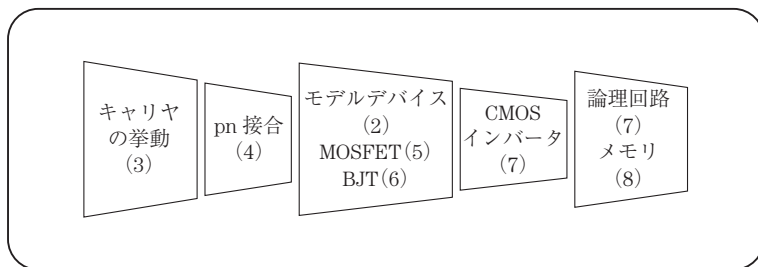


図 1.2 本書の構成 (括弧内は章番号)

3 章では半導体の電気的な特性を説明する。電子デバイスが扱う電気信号は電流や電圧、時には電荷などの電気的な物理量で表現される。一方、電子デバイスの主要な部分は半導体で構成されているので、これらの物理量の相互関係を半導体の電気特性から導出しなければならない。そのために、半導体内部の電界と、電流の担い手となるキャリアの挙動を正確に把握する必要がある。

4 章はトランジスタを構成する上でのキーとなる pn 接合について学ぶ。この章は、半導体の物性とデバイスの橋渡しをする部分である。5 章は電界効果型トランジスタ (MOSFET)、6 章はバイポーラ接合トランジスタ (BJT) の説明にそれぞれ充てた。

7 章と 8 章は、5 章で説明した MOSFET を用いた集積回路について説明する。まず、CMOS インバータについて MOSFET の特性に基づき説明する。引き続き CMOS 論理回路について述べる。8 章では論理回路と並んで重要なメモリ (記憶回路) について説明する。集積回路の特性が MOSFET の特性とどのように関わり合っているか、更にそれにはどのような物理現象が関与しているか、全体像を把握できれば、本書で目的とした電子デバイスの学習の目的はほぼ達成されたといっていよい。

最後の9章では、それまでの説明を踏まえた章であり、個別に説明してきた事項が歴史的にどのように発展してきたのか、概略を説明する。各章で説明してきた事項がバラバラな物ではなく、密接な関連を持っていることを理解してもらい、電子デバイスの現状と技術的なトレンドを感じて頂ければありがたい。

1.3 学習の指針

本書を理解していく上でのポイントを図1.3に示す。特に電子デバイスでは、その構造を十分に理解した上で、その振る舞いを解析していくことが重要である。本書では、まず対象とする構造や構成を説明し、ついで、それがどう動作するのか、どう機能するのか定性的に言葉で説明する。最後に式や記号を用いて定量的な解説を展開する。

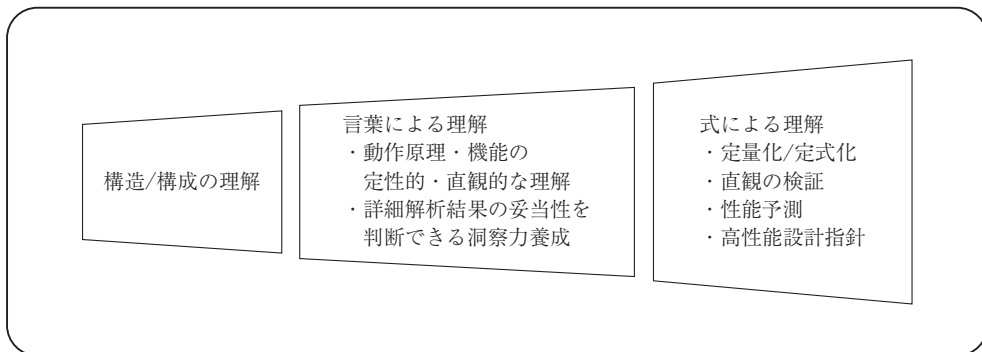


図 1.3 理解の進め方

式による定量的な解析や定式化は、直観的な理解が妥当であることの検証になるし、性能予測や高性能化の設計指針を得るために必要である。一方、言葉による理解も重要である。式が解けると理解できた気持ちになるが、その式が意味することを言葉で理解しようとする努力が不可欠である。また、近年はコンピュータを用いた精密なシミュレーションも可能である。しかし、そのようにして得られた値が妥当であるか、慎重に吟味する必要がある。たとえパラメタを1桁間違えて入力したとしても、得られた結果を総合的に考察することで、その誤りに気づかなければいけない。そのためには、得られた結果が物理的に考えて不都合がないか、様々な知見を結集して考察を加える必要がある。そのときに言葉による理解を通じて得た洞察力が必須となる。

1回読んだだけでは、十分に理解しにくい部分があるかもしれない。しかし、全体の話は矛盾なく積み上げられているので、必要に応じて廻りながら読み進めることで、理解を深めることができよう。漠然と理解できないという段階から、理解できない部分を明確にしようとする努力を通して、少しずつ理解が進むことを期待している。極端なことを言えば、例えば、ノーベル賞受賞者が懸命に考えたことを、かみ砕いて説明しているのであるから、一読して理解できたとすれば、むしろその方が不思議なことかもしれない、と開き直ることも時には必要である。

索

引

【あ】

アインシュタインの関係式
.....46
アクセプタ30
アドレス156
アバランシェ71
アーリー効果97, 119
アーリー電圧97

【い】

移動度41
インバータ10, 130

【え】

エサキダイオード73
エネルギーギャップ24
エミッタ110
エンハンスメント96

【お】

オーム性コンタクト89

【か】

外因性半導体30
外殻電子20
拡散45
拡散係数45
拡散長64
拡散電位57
拡散電流45
拡散容量104, 124
重なり容量102
過剰キャリア濃度47
活性領域113
価電子帯24
可動電荷29

【き】

寄生容量14, 102, 138
揮発性メモリ171
基板効果80
逆トランジスタ領域114
逆バイアス61, 88
キャッシュメモリ168

キャリア27
共通エミッタ配置115
共通ソース増幅器104
共通ソース配置95
共通ベース配置112
共有結合21
許容帯24
キルビー178
禁制帯24

【く】

空乏状態86
空乏層55, 84
空乏層近似65
空乏層容量68, 102

【け】

ゲート78
検波61

【こ】

格子振動43
降伏現象71
固定電荷29
コレクタ110
コレクタ到達率114

【さ】

再結合27, 47
サブコレクタ120
サブスレッシユホールド
電流138

【し】

しきい値9
しきい値電圧87, 92
仕事関数83
遮断領域103, 113
周辺回路156
出力抵抗99
出力特性95
順バイアス61, 88
小信号成分100
小信号電圧利得101

小信号等価回路101
少数キャリアの注入61
少数キャリアの寿命48
状態密度35
冗長性171
消費電力137
障壁高さ84
ショックレー177
ショットキー接合88
真空管175
真空準位83
真性キャリア濃度27
真性半導体27

【す】

スケール則151

【せ】

正孔26
整流特性61
正論理11, 130
接合型トランジスタ177
接合の式65
絶対温度32
遷移25
線形領域93
センスアンプ169

【そ】

相互コンダクタンス
.....13, 100, 123
速度飽和44
ソース78
ソース接地96
ソフトエラー171

【た】

大信号等価回路70
ダイナミック論理回路148
ダイヤモンド構造21
立ち上がり遅延時間142
立ち下がり遅延時間141
多値メモリ166
縦型110
ダミーセル169

【ち】

遅延時間	141
蓄積状態	87
チャンネル	78
チャンネル走行時間	105
チャンネル長	91
チャンネル長変調効果	97
チャンネル幅	91
チャンネル容量	102
中性領域	55

【つ】

ツェナーダイオード	72
-----------	----

【て】

抵抗負荷型インバータ	132
抵抗率	18
デコーダ	157
デブリーション	96
電圧利得	14
電界効果型トランジスタ	77
電気伝導度	18
電子親和力	82
点接触型トランジスタ	110
伝達特性	96
伝導電子	26
伝導電子帯	24
電流増幅率	115, 125
電流利得	15, 104
電流連続の式	63
電力増幅	114

【と】

等価回路	98
ドナー	28
ドリフト	40
ドレイン	78
ドレインコンダクタンス	99
ドレイン抵抗	99
トンネル現象	71, 165
トンネルダイオード	73

【な】

内殻電子	20
内蔵電位	57
なだれ	71

【ね】

熱励起	26
-----	----

【の】

ノイズ	178
ノーマリオフ	96
ノーマリオン	96

【は】

排他的論理和	150
バイポーラ接合 トランジスタ	108
パスゲート	149
バーディーン	176
バルク	79
反転状態	87
反転層	78, 86
バンド構造	23

【ひ】

ビット線	156
表面準位	176
表面ポテンシャル	85
比例縮小則	151
ピンチオフ	94

【ふ】

フェルミエネルギー	31
フェルミ準位	31, 58
フェルミ分布関数	32
フォノン	43
フォノン散乱	43
不揮発性メモリ	166
負性微分抵抗特性	72
フラッシュメモリ	165
ブラッテン	176
プルアップ ネットワーク	145
プルダウン ネットワーク	145
ブレイクダウン	71
プレーナ型	110
フローティングゲート	162
負論理	11, 130
ファウラー・ノルドハイム トンネル	165

【へ】

ベース	110
ベース接地	112
ベース幅	116
ヘテロ接合バイポーラ トランジスタ	121

【ほ】

ポアソン方程式	56
ポイントコンタクト型 トランジスタ	176
飽和速度	44
飽和電流	66
飽和領域	95, 113
ボディ	79
ポテンシャル障壁	83, 88
ホットエレクトロン	164
ホール	26
ボンド	21

【ま】

マスク ROM	158
---------	-----

【み】

ミラー指数	22
-------	----

【む】

ムーアの法則	179
--------	-----

【め】

メインメモリ	171
メサ型	110
メモリセル	156

【も】

モデルデバイス	8
---------	---

【ゆ】

有効質量	41
ユニティゲイン周波数	16, 105, 125
ユニポーラ型トランジスタ	108

【よ】

横型	110
読取り専用メモリ	157

【り】

リーク電流	138
リフレッシュ	169
リング発振器	153

【れ】

励起	25
レシオド回路	147
レベル再生機能	135

【わ】

ワード線156

【B】 β モード116
BJT108**【C】**CMOS132
CMOS インバータ132**【D】**

DRAM168

【E】

EEPROM162

【F】FET77
FGFET162**【G】** g_m モード116**【H】**

HBT121

【M】MISFET77
MOS 構造82
MOSFET77
MS 構造87**【N】**n ウェル139
n 型半導体29
NAND144
NAND 回路11
NAND 型 ROM159
nMOS インバータ132
NOR144
NOR 回路11
NOR 型 ROM158
NOT 回路10, 130**【P】**p 型半導体30
PDN145
pn 接合52
PROM162
PUN145**【R】**RAM166
ROM157**【S】**

SRAM167

【X】

XOR150

— 著者略歴 —

和保 孝夫 (わほ たかお)

1975年 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了
(物理学および応用物理学専攻)

1978年 理学博士 (早稲田大学)

現在, 上智大学教授

電子デバイス

Electron Devices

© 一般社団法人 電子情報通信学会 2013

2013年 5月 10日 初版第1刷発行

検印省略

編者 一般社団法人
電子情報通信学会
<http://www.ieice.org/>

著者 和保孝夫

発行者 株式会社 コロナ社

代表者 牛来真也

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 Printed in Japan

振替 00140-8-14844 · 電話 (03)3941-3131(代)

<http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-01848-6

印刷：三美印刷／製本：グリーン



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おりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします