

ま え が き

身近な家電製品や自動車，そして産業機器やロボットに至るまで，高い精度でものを動かすためには，位置や長さ，速度や加速度，重さなど，物理量の計測は必要不可欠であり，センサはなくてはならないものになっている。別の見方をすれば，センサ情報によって，各種機器は機能性が高まると考えられる。近年では，MEMS技術により，センサの小型化，低価格化が進み，装置を扱う上で必要なインタフェースにも変化が現われている。例えば，ゲーム機等においては，ボタン入力に加え，加速度やジャイロセンサを利用したモーション入力が増えており，直感的な入力が可能となっている。一方，パッド上を指先で操作するスマートフォンにおいては，静電容量の変化を検出することで指先の位置や操作情報を取得しており，使いやすさから，その普及率は著しく高くなっている。このようにセンサの活用によって，われわれが身近に使っている製品は，より便利で扱いやすいものになってきた。

本テキストは，センサに利用されている半導体材料のさまざまな効果，電磁気ならびに力学的な物理現象を取り上げ，動作原理や種類など，センサの基礎知識の修得を目的に執筆した。また，センサを活用する上で必要な電子回路について解説を加え，より実践的な力が養成できるように配慮した。章構成ならびに執筆担当者は，つぎのとおりである。

- 1章：センサの基礎知識（松井，中沢）
- 2章：センサ活用のための電子回路（松井，中沢）
- 3章：力センサ（中沢）
- 4章：加速度センサ（中沢，山田）
- 5章：距離センサ（中沢，松井）
- 6章：角度・角速度センサ（松井，中沢）

7章：光センサ（中沢，松井）

8章：磁気センサ（松井）

9章：温度センサ（中沢，山田）

1章ならびに2章では，センサを扱う上で必要となる基本的な概念と基礎用語，センサを活用するためのアナログ・デジタルIC（オペアンプ，トランジスタ，ロジックIC）を利用した電子回路について，まとめて掲載した。3章から9章までは，各種センサについて解説した。各章では，周辺回路について触れており，3章ではブリッジ回路，4章ではフィルタ回路，6章ではパルスカウンタ回路，7章ではトランジスタ回路の解説を行った。また，教養課程で学ぶニュートン力学については3章から6章まで，専門課程で学ぶ材料力学については3章と5章，電磁気学については8章，熱力学については9章に掲載し，他の教科との関連づけを行うことで，センサを融合的に捉えられるようにした。各章末には演習問題を掲載したので，力試しとして取り組むことをお勧めする。

本テキストを執筆するのにあたりまして，計測自動制御学会出版委員の村上弘記委員長（執筆当時）をはじめとする委員各位，査読された先生，株式会社コロナ社の関係者の皆様方には多大なるご尽力とご協力を賜りました。ここに心より厚く御礼申し上げます。

本テキストを通して，センサに興味を持ち，愛読書として研究等で活用して頂ければ幸甚です。

2012年1月

著 者

目 次

1. センサの基礎知識

1.1	センサの概略	1
1.1.1	人間の感覚機能とセンサ	1
1.1.2	MEMS 技術とセンサ	2
1.1.3	センサ信号の処理過程	3
1.2	ノイズ対策	6
1.3	センサ信号のデジタル変換	9
1.3.1	サンプリング（標本化）と量子化	9
1.3.2	A-D変換器	10
1.4	統計的データ処理・信号処理	12
1.4.1	測定誤差と精度	12
1.4.2	最小二乗法による測定値の関数近似	16
1.4.3	平滑化処理によるノイズ除去	17
1.4.4	フーリエ変換による周波数解析	20
1.5	センサの特性評価	21
1.5.1	センサの静特性	21
1.5.2	センサの動特性	23

2. センサ活用のための電子回路

2.1	オペアンプ	27
2.1.1	増幅回路	28
2.1.2	アクティブフィルタ回路	32
2.2	トランジスタ	34
2.2.1	バイポーラトランジスタの特徴	36
2.2.2	スイッチ回路	37
2.3	論理回路の基礎	38

2.3.1	論理レベルと電圧	38
2.3.2	基本論理回路	39
2.3.3	デジタル IC	40
2.3.4	回路例 (発光ダイオードを光らせる回路)	42
2.4	論理回路の応用	43
2.4.1	フリップフロップ	43
2.4.2	シフトレジスタ	47
2.4.3	カウンタ	48
2.4.4	マルチバイプレータ	50

3. カ セ ン サ

3.1	力とトルク	52
3.2	ストレインゲージ	54
3.3	ブリッジ回路	55
3.4	力の校正	60
3.5	重心	62
3.5.1	重心の計測	62
3.5.2	応用例	65
3.6	圧電素子型力センサ	67
3.7	静電容量型力センサ	68
	問題	70

4. 加 速 度 セ ン サ

4.1	加速度	71
4.2	加速度センサの動作原理	73
4.3	動的科加速度と静的加速度	75
4.4	加速度センサの周波数応答	77
4.5	ローパスフィルタ回路	78
4.5.1	一次のローパスフィルタ回路	79
4.5.2	二次のローパスフィルタ回路	83
	問題	87

5. 距離センサ

5.1 変位と速度	88
5.2 直線型ポテンシオメータ	89
5.3 電気マイクロメータ	90
5.4 カンチレバ型変位センサ	91
5.5 光学式距離センサ	93
5.6 超音波距離センサ	95
問題	97

6. 角度・角速度センサ

6.1 角度と角速度	98
6.2 微分回路・積分回路	100
6.3 回転型ポテンシオメータ	101
6.4 ロータリエンコーダ	103
6.5 分解能と逡倍	107
6.6 パルスカウンタ回路	108
6.7 タコジェネレータ	112
6.8 ジャイロ	114
問題	119

7. 光センサ

7.1 光と波長	120
7.2 光電効果と光センサ	122
7.3 CdS センサ	122
7.4 フォトダイオード	127
7.5 フォトトランジスタ	132
7.6 フォトインタラプタ	136
7.7 ライトレース	139
問題	140

8. 磁気センサ

8.1 電磁誘導作用を利用した磁気センサ	142
8.2 電磁誘導型磁気センサの応用	144
8.2.1 磁気ヘッド	144
8.2.2 差動トランス	144
8.2.3 渦電流式近接センサ	146
8.3 磁電変換作用を利用した磁気センサ	150
8.3.1 ホール素子	150
8.3.2 磁気抵抗 (MR) 素子	153
8.4 磁電変換型磁気センサの応用	155
8.4.1 磁界測定	155
8.4.2 電流測定	155
8.4.3 無接点スイッチ	156
8.4.4 変位センサ	157
8.4.5 方位センサ	158
問 題	159

9. 温度センサ

9.1 温度について	160
9.2 熱電対	162
9.3 サーミスタ	164
9.4 測温抵抗体	167
9.5 焦電型赤外線センサ	170
9.6 感温スイッチ	171
問 題	172

引用・参考文献	173
---------	-----

問 題 解 答	175
---------	-----

索 引	179
-----	-----



センサの基礎知識



位置や長さ、重さなどの物理量を計測する場合には、測定範囲や応答速度などを考慮に入れ、目的に適したセンサを選定しなければならない。そのためには、あらかじめセンサの仕様や性能を調べ、把握しておく必要がある。一方、センサの出力信号の形態はさまざまであり、センサ単体で計測できないものも多いため、周辺回路や計測プログラムなど、データ取得のための計測システムを構築しなければならない。測定波形においては、ノイズが乗ってしまうことがあり、この場合には、まずノイズの発生源を特定し、対策を施しておく必要がある。それでもノイズが現れる場合には、取りたいデータの情報を欠落させないようにノイズの除去や補正を行うこととなる。実際にセンサを使って計測してみると、さまざまな問題に直面することが多く、幅広い知識が必要である。

本章では、センサを扱う上で必要となる基礎的な事項について、まとめて掲載した。センサのはたらきや出力信号の種類、ノイズ対策について取り上げ、また、取得したデータの誤差や精度、平滑化ならびに周波数分析、さらにセンサの特性評価について解説する。

1.1 センサの概略

1.1.1 人間の感覚機能とセンサ

人間は優れた感覚機能を持ち、これらの情報に基づいて器用な物体の操作や姿勢の制御を行っている。視覚、触覚、聴覚、嗅覚、味覚の五感は、機械でいうところのセンサにあたり、これまでもさまざまなものが開発されてきた(表 1.1)。

表 1.1 人間の五感とセンサ

	感 覚	器 官	センサ
物理 センサ	視 覚	目	光センサ (PSD, フォトトランジスタ, レーザ変位計, 赤外線変位計…)
	触 覚	皮 膚	力センサ (ひずみゲージ, 圧電素子, 感圧ゴム…) 温度センサ (熱電対, サーミスタ…)
	聴 覚	耳	コンデンサマイク, 超音波センサ…
化学 センサ	嗅 覚	鼻	ガスセンサ, 湿度センサ, アルコールセンサ…
	味 覚	舌	イオンセンサ, 糖度センサ…

特に、視覚と触覚に関してはロボットを制御する場合に重要となってくる。視覚情報は、ロボットの周辺環境を観測する上で必要であるが、CCDカメラを用いた場合、フレームごとに画像処理を行わなければならない。その観測する目的が明らかであれば、その目的に合わせた適切なセンサを用いることで、迅速に処理を行うことができる。例えば、障害物の検知を目的とすれば距離センサを用いればよく、また、定められたラインを追尾するのであれば、光センサを用いればよい。人間が目標となるものを捉える場合には、目で見て（視覚）、手で触り（触覚）、耳で聞く（聴覚）ことで情報を得ているが、これらに相当するのは物理センサであり、重さや長さ、温度や音などの計測に利用されている。一方、鼻（嗅覚）や舌（味覚）に相当するのは化学センサであり、食品の糖度、アルコール度測定に加え、血液成分の分析や汚染物質を検出することにも利用されている。

このように、センサは産業・医療分野から身近な家電に至るまで、さまざまな用途で利用されており、さらに近年のめざましいMEMS技術の進歩により、小型軽量化、低コスト化がなされている。

1.1.2 MEMS 技術とセンサ

MEMS は、micro electro mechanical system（マイクロ電気機械システム）の略称であり、MEMS 技術は、シリコン基板上にセンサ、電気回路等を集積

化したデバイスを作り上げる技術のことである。この中には、歯車、板バネ、マイクロタービンなどの機械的な部品を扱ったものも含まれるので、MEMS はマイクロマシン (micromachine) とほぼ同義である。おもに、半導体集積回路における製作加工技術が利用されているが、三次元構造を形成するために、集積回路の作製プロセスでは使われない犠牲層エッチングと呼ばれる技術が用いられている。また、シリコン基板上にアスペクト比の高い(狭くて深い)深掘りエッチングを施す手法も MEMS 特有の加工である。この MEMS 技術を駆使した代表的なものとしては、カラーインクジェットプリンタのヘッド部の微小ノズル、走査プローブ型顕微鏡のカンチレバー、小型プロジェクタのミラー素子等があげられる。

近年、センサの小型軽量化がなされているのには、この MEMS 技術の進歩によるところが大きく、センサの歴史を大きく変えたといっても過言ではない。例えば、シリコン基板に深掘りエッチングを施すことで、櫛歯構造の電極対を形成し、電極間の静電容量変化を利用したセンサ、ピエゾ抵抗素子をイオン注入によって埋め込み、ひずみ量変化を利用したセンサなどには、MEMS 技術が必要不可欠である。これらの技術によって集積されたセンサは、特に MEMS センサと呼ばれている。

1.1.3 センサ信号の処理過程

図 1.1 にセンサ信号の処理過程の概略を示す。センサからの出力は、アナ

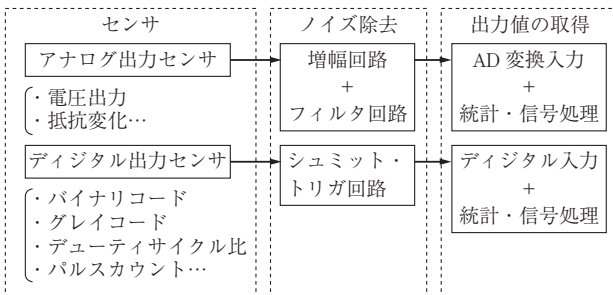


図 1.1 アナログ出力センサとデジタル出力センサの信号の流れ

ログ信号とデジタル信号の2種類に分類することができる。アナログ信号で出力されるセンサについては、センサ出力強度が微弱であるため、センサ出力信号を増幅する電圧増幅回路（アンプ）とフィルタ回路が一体となっているセンサ構造が多く見られる。フィルタは、特定周波数の雑音（ノイズ）を除去したり、あるいは、後段で使用されるAD変換器によるサンプリング条件に適合させる低域通過フィルタとして機能する。

センサからのアナログ信号をデジタル信号に変換するのがAD変換器であり、デジタル信号は計測値としてパソコンに入力される。PIC、H8といったマイコンにはAD変換機能が標準で装備されており、容易にアナログ信号のデータを取得できる。パソコンで測定を行う場合にはAD変換ボードが必要となってくるが、たいてい測定用のソフトウェアが付いてくるので、初心者にも扱いやすくなっている。デジタル信号にはさまざまな雑音が重畳しているので、パソコンまたはマイコン内で計測値に対する統計的処理や必要に応じた各種信号処理が行われる。

一方、デジタル信号で出力されるセンサについては、バイナリコード、グレイコード、デューティサイクル比、パルスカウント等、その出力形態がさまざまである。デューティサイクル（duty cycle）は、図1.2に示されるようにONおよびOFF状態の矩形波信号であり、周期 T_2 に対するON状態の時間 T_1 の割合、すなわちデューティ比（duty ratio）でセンサの出力値が表される。

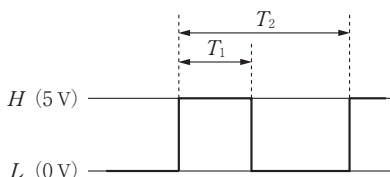


図1.2 矩形波信号による
デューティサイクル

例えば、加速度センサにおいて測定範囲が $\pm 2G$ 、 $1G$ あたりデューティ比が12.5%ずつ変化するとすれば、加速度 Acc はつぎのように表される。

$$Acc = \left\{ \frac{T_1}{T_2} - 0.5 \right\} / 0.125 \quad (1.1)$$

デューティ比 T_1/T_2 が 50 % の場合には 0 G, 25 % の場合には -2 G, 75 % の場合には +2 G となる。なお、デューティ比は、モータの **PWM 制御** (pulse width modulation) にも用いられており、デューティ比によってモータの速度制御を行うことができる。このように、パルス幅を出力信号として利用したもののほかに、2 進数の組合せで、観測された状態を表すものがある。表 1.2 で示されるのは、2 進数のバイナリコード、グレイコードと呼ばれるものである。

表 1.2 バイナリコードとグレイコード

10 進数	16 進数	バイナリコード				グレイコード			
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
2	2	0	0	1	0	0	0	1	1
3	3	0	0	1	1	0	0	1	0
4	4	0	1	0	0	0	1	1	0
5	5	0	1	0	1	0	1	1	1
6	6	0	1	1	0	0	1	0	1
7	7	0	1	1	1	0	1	0	0
8	8	1	0	0	0	1	1	0	0
9	9	1	0	0	1	1	1	0	1
10	A	1	0	1	0	1	1	1	1
11	B	1	0	1	1	1	1	1	0
12	C	1	1	0	0	1	0	1	0
13	D	1	1	0	1	1	0	1	1
14	E	1	1	1	0	1	0	0	1
15	F	1	1	1	1	1	0	0	0

例えば、磁気方位センサで東西南北の方位を表すために、バイナリコードが利用されている。観測された方位を仮にアナログ信号を用いて表すのであれば、扱う方向の数に応じて出力電圧のしきい値を定める必要が出てくるが、バイナリコードであれば即座に表現できる。一方、グレイコードは隣り合う数値を比べた場合、一カ所のみ変化する特徴を持っており、おもにアブソリュート方式のロータリエンコーダに用いられている。バイナリコード出力やグレイコード出力は 2 進数によって表されているために比較的イメージしやすいが、

デューティサイクル比やパルスカウント等に関しては、出力パルスの幅や周期の情報を処理しなければならない。そのため、マイコン等でデータを扱う場合には、タイマー割込み等の知識が必要となってくる。

1.2 ノイズ対策

正確なデータを取得するためには、ノイズは無視することができない問題である。使用するセンサによっては、ノイズ対策が必要不可欠となってくる。図 1.3 にノイズの種類と代表的な対策を示す。

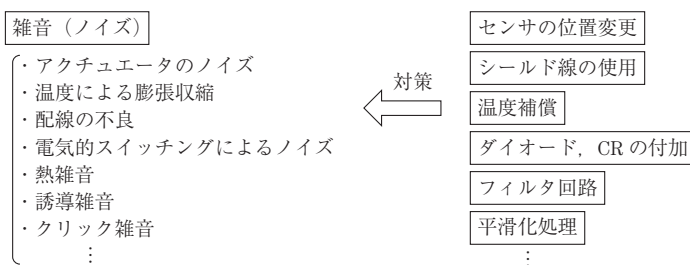


図 1.3 ノイズ対策

ノイズは、外部から受ける場合と内部で発生する場合に分けることができる。外部から受ける場合としては、モータやソレノイド等のアクチュエータからのノイズ、電気的スイッチングによるノイズ等があげられる。また、配線の仕方によってはノイズが入りやすく、低レベルの信号が大電力の送電線から影響を受ける場合もある。一方、内部から発生するものとしては、温度の上昇によるセンサ内の電圧、電流のゆらぎ（熱雑音）、回路中の部品どうしによる静電誘導、磁気誘導（誘導雑音）、回路の接触不良（クリック雑音）等がある。測定波形にノイズが見られた場合には、まず配線やセンサの設置場所等、簡単な対策で改善できないか確認する必要がある。特に、アナログ信号で出力されるセンサに関しては、ノイズが乗りやすいものもあるため、フィルタ回路等を利用することで、容易に改善できる場合がある。また、ダイオードや CR（コ

索引

【あ】		オペアンプ	27	ゲイン曲線	26
アクティブフィルタ	32	重 さ	62	ゲージ率	55
圧縮荷重	53	【か】		ゲート回路	40
圧電効果	68	開放端電圧	129	【こ】	
圧電素子	67	ガウス分布	14	高速フーリエ変換	21
アノード	127	カウンタ	48	光電効果	122
暗電流	131	角運動量の保存則	118	光電子放出効果	122
【い】		角速度	99	光導電効果	122
位 相	25	華氏温度	161	誤 差	12
位相曲線	26	可視光線	120	コモンモードノイズ	28
一次遅れ要素	80	過失誤差	13	固有振動数	97
一次コイル	147	仮想短絡	29	コリオリ力	116
インディシャル応答	24	加速度	72	コレクタ電流	35
インバータ	40	カソード	127	【さ】	
インバーテッド		価電子帯	128	最小二乗法	16
ダーリントン回路	135	渦電流	147	最大感度波長	136
【う】		過渡応答特性	24	差動トランス	90
運動の法則	72	感温スイッチ	171	差動入力	11
運動方程式	72	感 度	22	差動利得	28
【え】		ガンマ線	120	サニャック効果	115
エックス線	120	【き】		三重点	161
エネルギーギャップ	128	逆圧電効果	68	サンプリング	9
エミッタ接地	36	逆バイアス	129	サンプリング周期	9
エミッタ電流	35	キュリー温度	165	サンプリング定理	9
エリアシング	9	共 振	97	【し】	
エンコーダ	101	【く】		紫外線	120
【お】		偶然誤差	13	視感度	121
応答周波数	77	空乏層	127	自己インダクタンス	147
オフセット誤差	76	【け】		時定数	125
オフセット電圧	76	系統誤差	13	シフトレジスタ	47
		ゲイン	25	ジャイロセンサ	114
				遮断角周波数	82

遮断周波数	33				
重心	62				
周波数応答特性	24				
出力インピーダンス	28				
順バイアス	128				
焦電型赤外線センサ	170				
焦電効果	170				
シングルエンド入力	11				
真性半導体	128				
真理値表	39				
		【た】			【ね】
		ダイアフラム	68	熱起電力	162
		タイミングチャート	40	熱電対	162
		タイムチャート	40	熱平衡	160
		タコジェネレータ	112	熱力学第0法則	160
		立上り時間	124	熱力学的温度	161
		立下り時間	124		
		縦ひずみ	57	【は】	
		ターリントン回路	133	バイポーラ	103
		単安定マルチ		波長	120
		バイプレータ	50	白金測温抵抗体	167
		単極性	103	パワースペクトル	20
		短絡電流	130		
				【ひ】	
【す】		【ち】		非安定マルチ	
ステップ応答	24	力	52	バイプレータ	50
ストレーンゲージ	54	チャタリング	8	ピエゾ抵抗効果	74
スレッシュホールド・レベル	159	直線性	22	光起電力効果	122
				ヒステリシス差	23
		【て】		引張り荷重	52
		通倍	107	非同期カウンタ	48
		デューティサイクル	4	標準化定理	9
		デューティ比	4		
		伝達関数	124	【ふ】	
		伝導帯	128	ファラデーの	
		電流増幅率	37	電磁誘導の法則	113
				フィードバック制御	140
		【と】		フォトインタラプタ	136
		同期カウンタ	49	負帰還	29
		同相信号除去比	28	複素インピーダンス	148
		同相利得	28	フーリエ変換	20
		等速運動	89	ブリッジ回路	55
		動特性	23	フリップフロップ	43
		トルク	53	ブルアップ抵抗	7
				ブルル代数	39
		【に】		フレミング	
		二次遅れ要素	84	—の左手の法則	143
		二次コイル	147	—の右手の法則	113, 143
		入力インピーダンス	28	分解能	11, 22
		ニュートンの第二法則	72		
				【へ】	
【そ】				平滑化	17
双極性	103				
相互インダクタンス	147				
相互誘導係数	148				
測温抵抗体	167				
速度	89				

ベース電流	35	マルチプレクサ	11		
変位	72			【り】	
		【む】		離散時間信号	11
【ほ】		無バイアス	129	離散的フーリエ変換	20
ボアソン比	57	【も】		リップルカウンタ	48
法線加速度	73	モーメント	53	立方晶系	165
補償接点	163	モーメントの腕	53	リプル電圧	114
補償導線	163	【ゆ】		量子化	10
ポテンシオメータ	101	誘電体	68	【れ】	
ホドグラフ	72	ユニポーラ	103	連続時間信号	9
ボード線図	26	【よ】		【ろ】	
ホール効果	150	横ひずみ	57	論理式	39
ホール電圧	151			論理レベル	39
【ま】					
マルチバイブレータ	50				

【A】		【J】		P型半導体	127
A-D変換	10	JKフリップフロップ	45	【R】	
【C】		【L】		RSフリップフロップ	43
C-MOS	41	Lレベル	39	【T】	
【D】		【N】		TTL	41
Dフリップフロップ	44	N型半導体	127	Tフリップフロップ	46
【H】		【P】		~~~~~	
Hレベル	39	PWM制御	5	γ値	124

— 著者略歴 —

中沢 信明（なかざわ のぶあき）

1993 年 富山大学工学部生産機械工学科卒業
1995 年 東北大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了（システム情報科学専攻）
1998 年 東北大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了（システム情報科学専攻）
博士（情報科学）
1998 年 日本学術振興会特別研究員（東北大学）
1999 年 群馬大学助手
2006 年 群馬大学助教授
2007 年 群馬大学准教授
現在に至る

松井 利一（まつい としかず）

1977 年 早稲田大学理工学部電気工学科卒業
1979 年 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了（電気工学専攻）
1980 年 株式会社東芝勤務
1994 年 株式会社国際電気通信基礎技術研究所出向
1996 年 株式会社東芝勤務
1997 年 博士（工学）早稲田大学
1998 年 群馬大学助教授
2007 年 群馬大学准教授
現在に至る

山田 功（やまだ こう）

1987 年 山形大学工学部電気工学科卒業
1989 年 山形大学大学院工学研究科修士課程修了修了（電子工学専攻）
1989 年 山形県企業局勤務
1991 年 山形大学助手
1997 年 博士（工学）大阪大学
2000 年 群馬大学助教授
2008 年 群馬大学教授
現在に至る

センサの基本と実用回路

Foundations of Sensor and Practical Use of Electric Circuit

©公益社団法人 計測自動制御学会 2012

2012年5月2日 初版第1刷発行

検印省略

編者 公益社団法人
計測自動制御学会
東京都文京区本郷1-35-28-303
著者 中 沢 信 明
松 井 利 一
山 田 功
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

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 978-4-339-03353-3 (森岡) (製本：愛千製本所)

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おります。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