

まえがき

コンピュータ言語の歴史は、機械志向から知識志向にシフトしている。最初に2進数を扱う機械語、つぎに数値処理のためのアセンブラと Fortran、ついでデータ処理のための Cobol が標準的に利用された。データが大量になるにつれ、構造化されたデータ処理が必要になり、Pascal, PL/I や, Ada という言語が利用されるようになった。さらに、日本語処理の必要性から JEF, OASYS が利用された。また、データのみならず知識を処理したいという要求から、Lisp, Prolog, Smalltalk という言語が開発された。

人工知能研究は、J. マッカーシー、M. ミンスキー、C. シヤノン、N. ロチェスターらが参加した1956年のダートマス会議から始まったといわれる。1960年代の前半はコンピュータを用い、ゲームとパズルが解かれたので、ゲームとパズルの時代といわれたが、後半は暗黒の時代であった。1970年代は人工知能研究が見直され、知識工学や応用システムが生まれた。T. A. ウィノグラードの自然言語理解システム SHRDLU が1970年代前半のブームの火付け役であり、言語と知識の時代といわれた。

1980年代は人工知能研究の一大ブームが起き、知識工学の時代と呼ばれた。1982年に電子技術総合研究所出身の瀧一博をトップとする第5世代コンピュータプロジェクトがスタートすると、日本でも人工知能研究のブームが起きた。新世代コンピュータ技術開発機構研究所(瀧一博所長)は、欧米では主流でなかった記号処理プログラミング言語 Prolog を核言語とする超並列マシン PIM を設計・開発し、その上で各種応用システムを開発した。海外では、Lisp マシン上で応用人工知能システムが開発された。第1著者(國藤)も富士通株式会社 国際情報社会科学研究所から、この新世代コンピュータ技術開発機構研究所に主任研究員として出向し、その後11年間このプロジェクトに携わった。

ii ま え が き

1990年代になると、認知科学の影響でシンボリズムの限界を超えるコネクショニズムという考え方が再認識された。ニューロネット専用チップが開発され、ロボットの制御に利用されるようになった。高次の問題解決にはシンボリズムとコネクショニズムのハイブリッドアーキテクチャが利用されるようになった。人工知能研究の可能性と限界が見え、ニューロネットとニューロロボットの時代に入ったといえる。

21世紀に入り、超並列処理の研究が、複数のマシンをつなぐグリッドコンピュータのアーキテクチャに活かされるようになってきた。人工知能研究も各種応用研究に Web インテリジェンス研究として利活用されている。中でもインターネットに眠る膨大なデジタル情報から必要な情報を探索するデータマイニング、Web マイニング、テキストマイニング研究が注目されている。2000年代は、いわばインテリジェンスとマイニングの時代である。

このような流れで 2010 年代を見ると、デジタル情報のみならずアナログ情報をも利活用する必要性が生まれている。技術的には、センサマイニング、特許マイニング、リスクマイニング研究がより注目されるであろう。そこでは、ネットワーク上の膨大なデジタル情報とアナログ情報の集合体の中から、必要な知識を発見し創造する技術が求められている。すなわち、著者らの専門分野である発想支援システムや知識創造支援システムが、より多くの人に利用される時代となることであろう。

2012 年 4 月

國藤 進

目 次

1. 序 論

1.1 知識社会における人工知能	1
1.2 本書の構成	3

2. 状 態 空 間

2.1 状態空間による問題の解法	5
2.2 コンピュータに問題を解かせるための準備	14
2.2.1 問題の表現	15
2.2.2 状態空間	15
2.2.3 探索アルゴリズム	15
2.3 カード問題の例	15
2.3.1 問題の表現	16
2.3.2 状態空間	17
2.3.3 探索アルゴリズム	19
問 題	24

3. 探 索

3.1 グラフの探索	26
3.1.1 グラフ探索アルゴリズムの基礎	28

iv 目 次

3.1.2 エッジにコストがかからないグラフの探索	33
3.1.3 エッジにコストがかかるグラフの探索	36
3.2 ゲームの木の探索方法	45
3.2.1 ゲームの木の構造	45
3.2.2 ゲームの木の探索	46
3.2.3 ゲームの局面の評価	49
3.2.4 MINIMAX 探索	50
3.2.5 アルファ・ベータ探索	54
問 題	58

4. 命 題 論 理

4.1 命 題 論 理	61
4.2 記 号 化	62
4.3 真 理 値 表	63
4.4 論 理 結 合 子	65
4.4.1 否 定	65
4.4.2 か つ	65
4.4.3 ま た は	66
4.4.4 な ら ば	68
4.4.5 同 値	69
4.5 論理記号の優先順位	70
4.6 恒真命題・恒偽命題	71
4.6.1 真理値表による恒真・恒偽の判定	72
4.6.2 命題の標準化による恒真・恒偽の判定	74
4.6.3 意味木による恒真・恒偽の判定	78

4.7 推 論	80
4.7.1 真理値表による妥当性判定	82
4.7.2 恒真性判定による妥当性判定	84
問 題	86

5. 述 語 論 理

5.1 述 語 論 理	88
5.2 個 体 領 域	89
5.3 限 量 記 号	90
5.3.1 作 用 域	91
5.3.2 限量記号と否定	93
5.3.3 限量記号の有限解釈	94
5.3.4 冠頭形への変換	95
5.4 述語論理式の標準化	96
問 題	99

6. 導 出 原 理

6.1 命題論理の導出原理	100
6.1.1 連言標準形の恒偽性判定	100
6.1.2 命題論理の導出原理	100
6.1.3 導 出 反 駁 木	104
6.2 述語論理の導出原理	105
6.2.1 連言標準形の恒偽性判定	105
6.2.2 スコーレム標準形	108
6.2.3 述語論理の導出原理と導出反駁木	110
問 題	112

7. 論理による問題解決とフレーム問題

7.1 論理式を用いた問題の解き方	113
7.2 宣言的知識を求める問題	114
7.2.1 「はい」「いいえ」で答える問題例 (1)	114
7.2.2 「はい」「いいえ」で答える問題例 (2)	117
7.2.3 「なに」を答える問題例	118
7.2.4 「だれ」と「なに」を答える問題例	120
7.3 手続き的知識を求める問題	121
7.3.1 Green による定式化	123
7.3.2 Kowalski による定式化	126
7.4 フレーム問題	128
7.4.1 Green による定式化とフレーム言明	128
7.4.2 常識とフレーム問題	131
7.4.3 Kowalski による定式化とフレーム言明	133
問 題	136

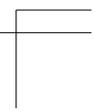
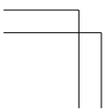
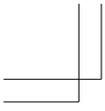
8. Prolog

8.1 Prolog 入 門	138
8.1.1 Prolog の 概 要	138
8.1.2 Prolog の実行環境	140
8.1.3 Prolog プログラムの基本	143
8.2 カード問題の Prolog プログラム	152
8.2.1 Green による定式化を用いたプログラム	152
8.2.2 Kowalski による定式化を用いたプログラム	155

8.2.3 プログラムの実行例	158
8.3 Prolog を用いた問題解決の例	162
8.3.1 4 色 問 題	162
8.3.2 ハノイの塔	164
8.4 メタ推論	167
問 題	170

9. 知識表現

9.1 プロダクションルール	173
9.1.1 プロダクションシステム	173
9.2 意味ネットワーク	175
9.2.1 ネットワーク構造による知識の表現	175
9.2.2 意味ネットワークのデータベースへの保存	178
9.3 セマンティック Web	179
9.4 非単調論理	182
9.4.1 デフォルト推論	182
9.4.2 失敗による否定	183
9.4.3 仮説推論	184
問 題	185
引用・参考文献	187
問 題 解 答	191
あ と が き	222
索 引	223



1

序 論

1.1 知識社会における人工知能

P. F. ドラッカーや D. ベルらにより、21 世紀は知識社会（あるいは知識基盤社会、知識創造社会）と呼ばれる。知識生産あるいは知識産業という概念は、プリンストン大学の F. マッハルプにより 1962 年に提唱された。彼は「知識を生産すること」は「発見すること」「設計すること」「計画すること」だけでなく、「普及させること」「伝達すること」を含むと拡大解釈した。この拡大解釈により、知識産業は研究開発、コミュニケーション、メディア、教育、情報サービス、情報機器、サービス産業を包括することになった。日本では島根大学の野田哲夫教授の試算で、知識産業（商業、金融保険、不動産、運輸、通信放送、公務、サービス）の対 GDP 推計値は 63.3%（2000 年）から 66.9%（2005）とアップしている。

このような時代にふさわしい人工知能の教科書として、1998 年に発足した北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科の講義をまとめたのが本書である。知識科学研究科の学生は世界各国から来ており、日本人学生と留学生の比率が 50%であり、文系出身学生と理系出身学生の比率はそれぞれ 50%である。博士前期課程を修了した学生はほとんど企業に就職する。そこで求められているのは、形式知を駆使した論理的思考能力と、ディベート能力を中心とするグローバルコミュニケーション能力である。知識が付加価値を生み出す時代であるが、フィールドの問題は文系・理系と分かれているわけではない。換言する

と、フィールドの問題は、ある意味ですべて文理融合問題である。知識には暗黙知と形式知があるが、フィールドの問題を解決するには、暗黙知から本質的な形式知を抽出する表出化あるいは発想の能力が大切である。

ここで、知識とはなにかを定義する。データ、情報、知識、メタ知識の区分は、1983年に第1著者（國藤）によってなされた。マシン、個人、グループ、あるいは組織のような抽象的実体を「エージェント」と呼ぶ。あるエージェントによる処理を前提に、アナログあるいはデジタルに表現、符号化し、入出力となるものを「データ」と呼ぶ。データの中で、特定のエージェントにとって、意味のあるひとまとまりを単位化したものを「情報」と呼ぶ。それぞれの情報を各エージェントの持つ価値体系に従って価値付けし、情報間の関係性およびその有効範囲を明確に示したものを「知識」と呼ぶ。知識に関する知識を「メタ知識」と呼ぶ。主観的知識が客観的知識になるには、複数のエージェント間の知識同定プロセスの認知を要する。

人工知能の研究には、シンボリズムに基づく研究とコネクショニズムに基づく研究の二つの流れがあるが、本書はシンボリズムの立場に立つ。現在のコンピュータが述語論理のサブセットであるブール代数（命題論理）でできていること、合理的・論理的思考を訓練するのに述語論理を学んでほしいことから、われわれはシンボリズムの立場をとった。本書では、シンボリズムを理解するために、述語論理を基礎から学ぶ。

アメリカの記号学の提唱者 C. パースによると、人間による推論には、発想（アブダクション; abduction）、演繹（ディダクション; deduction）、帰納（インダクション; induction）がある。ギリシャ時代のアリストテレス以来、学問の正当な方法論として洗練されてきたのは、論理学や数学の基礎につながる演繹のみであった。イギリスの産業革命で、やっとな機械の帰納的設計法が見直され、その本質が統計的仮説検定論として確立したのは、第2次世界大戦後である。発想あるいはアブダクションといわれる推論法は、象牙の塔の秘宝として学問化が遅々として進まなかったが、第5世代コンピュータプロジェクト（1982～1993）における第1著者グループの活躍により、アブダクションやインダク

ションの機能を持つ論理プログラミングの研究が、世界各国でなされるようになってきた。その実現に刺激を与えたのが、われわれの開発したメタ推論機能やメタプログラミングという方法論である。もちろん、アリストテレスが形而上学の中で還元法（リトロダクション; retroduction）と呼ばれる思考法の重要性を指摘していることは、忘れてはならない。還元法は、今風にいうと、アブダクションというよりアナロジーであろう。

演繹推論の頂点に立つのが、コンピュータ上に実装されるプログラミング言語である。リフレクション機能を持つプログラミング言語を使用すれば、アブダクションやインダクションの機能を持つプログラミング言語が実現することを、本書を熟読して体験してほしい。しかしながら、このようなアプローチはインタプリタの上にインタプリタを実装することになるので、実行性能が1桁落ちる。そこで、この分野の専門家になろうという読者は、パーシャル・エバリュエーション・メソッドやナレッジコンパイルという高級技法もマスターしてほしい。いずれにせよ、Prolog や Lisp のような言語でラピッドプロトタイピング、プロトタイピング、実用システム開発という開発経験を体得していただければ、著者一同の望外の喜びである。

1.2 本書の構成

本書の構成を説明する。本書は9章で構成されている。

述語論理に基づいて問題を解決するには、問題を状態空間（2章）内の探索（3章）問題に帰着しなければならない。探索アルゴリズムとしては、グラフ探索とゲーム木探索を学ぶ。ついで、命題論理（4章）と述語論理（5章）の基礎を学ぶ。すでに述語論理をマスターした読者は、4章と5章をスキップしていただきたい。

本書の特徴は、述語論理のサブセットであるホーン論理に基づく Prolog（8章）の本質的理解と徹底的の利活用である。論理による問題解決をするには導出原理（6章）を理解し、かつ、フレーム問題へのその適用（7章）を学ばなければ

ばならない。論理による問題解決，人工知能特有の知識表現（9章）は，すべて Prolog の演繹推論機能やメタ推論機能を用いて実現される。

各章の理解を確たるものにするために，すべての演習問題に解答を付けた。読者は，解答を見ることなく，教科書の各章の内容のみからその章の演習問題を解くように努力されたい。

シンボリズムの立場では，情報は Prolog のファクトで表現し，知識は Prolog のルールで表現していることになる。メタ知識は Prolog のメタ推論機能で表現される。人工知能で最も重要な探索空間を制限するヒューリスティックスも，メタ知識の一種である制約や評価関数付きのメタ推論機能で実現される。なお，パズルやゲームを人工知能プログラミング言語で解いた多くの経験者の声を傾聴すると，マシン用のヒューリスティックスと人間用のヒューリスティックスは明らかに異なる。評価関数の構築法も，ゲーム木探索に見られるように，人間の頭脳は序盤・中盤・終盤と探索戦略を変えている。いかにして問題をデジタルな状態空間に表現するか，いかにしてその状態空間内での状態遷移関数であるオペレータを見出すか，いかにして評価関数を人間の頭脳から獲得するかは，最難関の課題である。このことは，どのように人工知能研究が進展しようと不変である。

2

状態空間

状態 (state) とは、ある物事のある時点における有り様を表すものである。そのある一つの状態を 2 次元マップ上のある地点に配置し、また他の状態を別の地点に配置していったら、状態が変わる様を 2 次元マップ上の位置の変化として表したものを状態空間 (state space) という。この章では、問題を状態空間として表して解く方法について説明する。

2.1 状態空間による問題の解法

例えば、つぎのような例を考えてみる。

例 2.1 ペットを飼うときの 1 か月の餌代は、イヌでは 2 千円、ネコでは 1 千円かかるとする。ある家庭では、イヌもしくはネコを合わせて 3 匹飼っていて、月に 5 千円の餌代がかかっているとす。この家庭で飼われているイヌとネコの数はいくつか？

この例を数学を用いて解く場合には、例えば x をイヌの数、 y をネコの数として、つぎのような連立方程式を立てる。

$$x + y = 3 \tag{2.1}$$

$$2000x + 1000y = 5000 \tag{2.2}$$

これを解いて、 $x = 2$ 、 $y = 1$ を得る。よって、この家庭にはイヌが 2 匹、ネコが 1 匹いることがわかる。では、つぎに以下のような問題を考えてみる。

例 2.2 図 2.1 のように A, B, C, G の 4 枚のシートがあり、その上に 1~5 までの数字が書かれたカードがある。カードは、最初はシート G 以外のシートに配置されているとする。以下のルールを守りながら、数字が小さいものが上になるように、シート G の上にカードの山を作る手順を示せ。

ルール

- 一度に 1 枚のカードしか移動できない。
- 移動できるカードは、カードの山の最上位にあるカードだけである（上に他のカードが載っているカードは移動できない）。
- 移動できる場所は、山のないシートの上か、移動しようとしているカードの数字よりも一つ数の大きいカードが山の最上位にあるシートだけである。

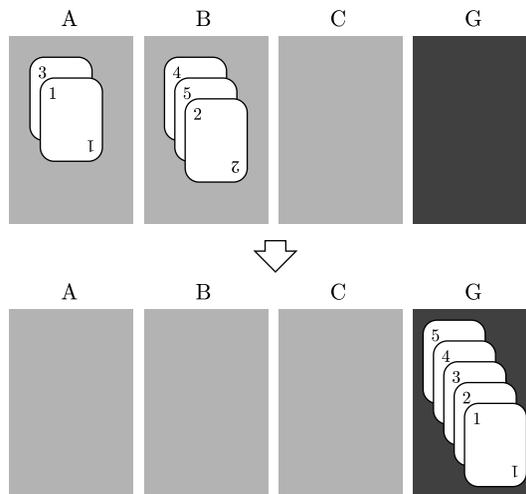


図 2.1 カードを移動して、カードの山をシート G に数字の順に積み上げる問題。移動できるカードは一度に 1 枚であり、山の最上位のカードしか移動できない。移動先は、山のないシートか、移動しようとしているカードよりも一つ数の大きいカードが山の最上位にあるシートだけである。

あ と が き

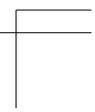
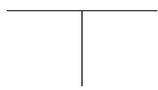
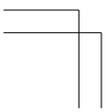
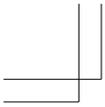
本書は第1著者（國藤）が北陸先端科学技術大学院大学に1992年に奉職して以来、20年間にわたる人工知能の講義をまとめたものである。最初は情報科学研究科院生向けの講義を行っていたが、途中1998年から知識科学研究科院生向けの講義に切り替えた。知識科学研究科の院生は半分が文系出身であることから、理系のみならず文系の学生にもわかる人工知能の教科書となった。学部時代に論理学をきちんと学んだことがない学生も多く、命題論理や述語論理の章を追加している点も、本書の特徴である。また、人工知能研究は実際にプログラミング言語で実装してみないと体得できないので、記号処理プログラミング言語であるPrologの章も含んでいる。

なお、参考にした人工知能の教科書は枚挙にいとまがない。名著と思われるのは、N. J. ニルソン「人工知能」、R. B. バナージ「問題解決の理論」、P. H. ウィンストン「人工知能」、上野晴樹・石塚満「知識の表現と利用」、小林重信「知識工学」、R. コワルスキー「論理による問題の解法」、E. シャピロ「Prologの技芸」、S. ラッセル「エージェントアプローチ人工知能」である。特に教科書あるいは参考書として長年利用した太原育夫「人工知能の基礎知識」に感謝する。これらの人工知能教科書の本質的なところを参考とし、第2著者（中田）、第3著者（羽山）の講義録を参考に洗練したものが本教科書である。また、Prologの章は東京工業大学の奥村学教授とタマサート大学のT. タナラック准教授、熊本県立大学の金井貴准教授の講義録をベースとした。

索引

【あ】		【く】	常識	130	
アルファ・ベータ探索	54	偶然的命題	71	状態	5
【い】		グラフ	7, 26	状態空間	5, 7
意味木	78	【け】		初期状態	27
意味ネットワーク	175	継承	177	真	11, 61
インタプリタ	174	経路	26	真理値表	63
【え】		ゲーム	45	【す】	
枝切り	55	—の木	26, 45	推論	10, 80
エッジ	7, 26	結論	10, 80	スコアレム標準形	108
演繹推論	80	限量記号	90	【せ】	
【お】		【こ】		節形式	74
オペレータ	17	恒偽命題	71	節集合	74
オントロジー	181	恒真命題	10, 71	セマンティック Web	179
【か】		コスト	27	宣言的な知識	113, 114
解釈	90	個体	88	選言標準形	74
開世界仮説	183	個体定数	13, 88	全称記号	90
仮説推論	184	個体変数	13, 88	前提	80
かつ	65	個体領域	89	【そ】	
関数	88	【さ】		存在記号	90
冠頭形	95	最良優先選択	28, 41	【た】	
【き】		作業記憶	174	ダイクストラ法	28, 37
木	26, 45	作用域	91	縦型探索	27, 33
—の根	78	【し】		妥当	72, 82
—の葉	78	式	14	単一化置換	110
偽	61	充足可能	72	探索	10, 26
記号	14	充足不能	72	探索アルゴリズム	10, 26
記号化	62	主語	88	【ち】	
帰納推論	80	述語	12, 88	知識	173
競合解消	174	述語論理	12, 88	知識表現	173
		条件	10		

【て】		【む】		<i>A*</i> algorithm	28, 43
手続き的な知識	113, 121	無向グラフ	26	【B】	
デフォルト推論	182	【め】		best-first search	28, 41
【と】		命題	61	breadth-first search	27, 34
導出原理	100	命題論理	10, 61	【C】	
導出反駁木	104	メタ推論	167	clausal form	74
同値	69	【も】		clause set	74
【な】		目標状態	27	closed world assumption	
ならば	68	問題	14		183
【ね】		—の表現	14	common sense	130
根	78	【や】		compound proposition	62
【の】		山登り法	28, 40	conclusion	10, 80
ノード	7, 26	【ゆ】		conflict resolution	174
【は】		有向グラフ	26	conjunction	65
葉	78	ユニフィケーション	110, 144	conjunctive normal form	74, 96
排他的選言	67	【よ】		contingency	71
ハノイの塔	164	要素命題	62	contradiction	71
幅優先探索	27, 34	横型探索	27, 34	cost	27
【ひ】		【り】		【D】	
非単調論理	182	両立的選言	67	declarative knowledge	
否定	65	リレーショナルデータベース	178		113, 114
【ふ】		【れ】		deduction	80
深さ優先探索	27, 33	連言標準形	74, 96	default reasoning	182
複合命題	62	【ろ】		depth-first search	27, 33
フレーム言明	130	論理記号	10	dijkstra's algorithm	28, 37
フレーム問題	114, 133	論理結合子	62	directed edge	26
プロダクションシステム	173	論理式	10	directed graph	26
プロダクションルール	173	【ら】		disjunction	66
【へ】		【A】		disjunctive normal form	74
閉世界仮説	183	abduction	184	【E】	
【ま】		alpha-beta pruning	54	edge	7, 26
または	66	<i>A*</i> アルゴリズム	28, 43	encode	62



— 著者略歴 —

國藤 進 (くにふじ すすむ)

- 1971年 東京工業大学工学部制御工学科卒業
1972年 東京工業大学工学部制御工学科研究生修了
1974年 東京工業大学大学院理工学研究科制御工学専攻修士課程修了
1974年 富士通株式会社国際情報社会科学研究所勤務
1982年 新世代コンピュータ技術開発機構研究所主任研究員
1986年 富士通株式会社国際情報社会科学研究所第二協力開発室長
1992年 北陸先端科学技術大学院大学教授
1994年 博士(工学)(東京工業大学)
2010年 東京大学大学院総合文化研究科客員教授(至現在)
2011年 北陸先端科学技術大学院大学副学長
現在に至る

羽山 徹彩 (はやま てっさい)

- 2001年 同志社大学工学部知識工学科卒業
2003年 北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士前期課程修了
2006年 北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士後期課程修了, 博士(知識科学)
2006年 北陸先端科学技術大学院大学助手(2007年~助教)
2012年 金沢工業大学講師
現在に至る

中田 豊久 (なかだ とよひさ)

- 1993年 東京工科大学機械制御工学科卒業
1993~ 日本電気ロボットエンジニアリング株式会社勤務
1995年 リング株式会社勤務
1996~
1997年 株式会社日本総研テクノス勤務
1997~ 株式会社ソリトシシステムズ勤務
2000年
2002年 北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士前期課程修了
2003~
2004年 株式会社本田技術研究所勤務
2006年 北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士後期課程修了, 博士(知識科学)
2006~ 北陸先端科学技術大学院大学
2008年 産学官連携研究員
2008年 新潟国際情報大学講師
現在に至る

知識基盤社会のための人工知能入門

An Introduction on Artificial Intelligence for Knowledge-based Society

© 公益社団法人 計測自動制御学会 2012

2012年5月25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 國藤進
中田豊久
羽山徹彩

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

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 978-4-339-03366-3 (新宅) (製本: 愛千製本所) G

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