人工知能

AIの基礎から知的探索へ

From Fandamentals to Intelligence Searches

趙　強福・樋口龍雄 著

Artificial Intelligence

共立出版

人工知能

AIの基礎から知的探索へ

From Fundamentals to Intelligent Searches

趙　強福・樋口龍雄 著

共立出版

まえがき

最近，人工知能（AI: artificial intelligence）はマスメディアなどにより大きく取り上げられその話題に事欠かない。AI やロボットの活用を通して未来は明るいとする楽観論や，雇用が多く失われるとする悲観論など，それぞれの立場からのさまざまな論説がなされている。これに関連して，著者は 1920 年チェコの劇作家カレル・チャペックが「ロッサムの万能ロボット」という劇の中で使われたロボットを思い起こす。楽観的な会社の経営者とは立場を異にする現場責任者は，失業の問題を心配する。やがて労働者の解雇が始まり，魂を得たロボットは反乱を起こす。まさに今，ロボットのように知能を有するシステムが身近に出現し，われわれ人間社会に古くて新しい問題を提示している。

近年，急速な発展と広がりを見せた AI 関連分野は，ますます高度化・細分化の傾向にあり，とりわけ初学者には全体像を見通すことが困難になっている。AI を健全に発展させるためには，中心となる概念をしっかり理解し，さまざまな知識や技術をその中心概念で結び付けることが不可欠である。実際，世の中にあるさまざまな問題は，それを適切に定式化さえすれば，すなわち，数式や計算機言語などで表現すれば，探索アルゴリズムで解決することができる。解決できない問題があるとすれば，なぜその問題が解決できないのか，それを証明することも探索問題に帰着できる。したがって，「探索」は，AI の中心的概念であり，AI の全貌を理解するための「カギ」の役割を有する。本書は探索に着目し，その観点から人工知能の全体像が理解できるように工夫されている。

AI は多様な分野に関係するので，興味をもたれる読者の専門分野も異なることが予想される。本書はこのような広範囲の読者に対しても，またふさわしい教科書にしようと企図している。各章ごとにできるだけ多くの例題と演習問題を用意している。それらを一つずつ解いていくうちに，その章に関する基礎的事項が習得できるよう配慮されている。著者の下記ホームページでは，演習問題の解答例を掲載するとともに，本書の修正，追加なども随時掲示して時宜に適うようにしている。

http://www.u-aizu.ac.jp/~qf-zhao/AI-textbook/Homework-Answer/index.html

読者がAIの習熟を通して，活力ある健全な科学技術の発展に貢献されるとともに，AI社会に向けた社会や人間のあり方についても，それぞれの立場で思いを巡らされることを期待する。また，本書の刊行までにお世話になった共立出版の方々に深く感謝する。

2017年6月

著者

目　次

1　人工知能の歴史と現状　1

1.1　AI の萌芽 …… 1
1.2　第 1 の波 …… 3
1.3　第 2 の波 …… 4
1.4　第 3 の波 …… 5
1.5　AI の定義 …… 6
1.6　本書の構成 …… 9
参考文献 …… 11

2　問題の定式化と探索　13

2.1　問題の定式化 …… 13
2.2　単純探索アルゴリズム …… 18
2.3　経路のコストを考慮した探索 …… 21
2.4　ヒューリスティック探索 …… 24
　2.4.1　最良優先探索 …… 24
　2.4.2　A* アルゴリズム …… 26
2.5　探索問題の一般化 …… 29
2.6　おわりに …… 35
参考文献 …… 36

3　論理と推論　37

3.1　命題論理 …… 37
　3.1.1　論理式の定義 …… 37
　3.1.2　論理式の解釈 …… 38
　3.1.3　命題論理の法則 …… 39
　3.1.4　論理式の種類 …… 40
　3.1.5　論理式の標準形 …… 41

3.1.6　命題論理における形式的推論 …… 43
3.1.7　定理証明 …… 45
3.1.8　定理証明と探索 …… 46
3.2　第1階述語論理 …… 47
3.2.1　述語論理の基本要素 …… 48
3.2.2　項の定義 …… 50
3.2.3　素式 …… 51
3.2.4　論理式 …… 51
3.2.5　論理式の節形式 …… 51
3.2.6　節集合 …… 54
3.2.7　導出原理 …… 55
3.2.8　反駁証明 …… 56
3.2.9　ホーン節 …… 58
3.2.10　AI 言語 Prolog …… 60
3.3　おわりに …… 61
参考文献 …… 62

4　エキスパートシステムと推論　63

4.1　プロダクションシステム …… 63
4.1.1　知識の表現 …… 65
4.1.2　観測事実の表現 …… 68
4.1.3　前向き推論 …… 69
4.1.4　前向き推論と探索 …… 71
4.1.5　後ろ向き推論 …… 73
4.1.6　前向き推論と後ろ向き推論の融合 …… 76
4.2　グラフによる知識表現 …… 77
4.2.1　意味ネットワーク …… 77
4.2.2　フレーム …… 81
4.3　おわりに …… 84
参考文献 …… 85

5　しなやかな知識表現と推論　87

5.1　ファジィ論理とファジィルール …… 87
5.1.1　ファジィ集合とファジィ論理 …… 87
5.1.2　ファジィ数 …… 90
5.1.3　ファジィルール …… 91
5.1.4　ファジィ推論 …… 92
5.2　ニューラルネットワーク …… 97
5.2.1　単一ニューロンの仕組み …… 97
5.2.2　多層ニューラルネットワーク …… 101
5.2.3　多層パーセプトロンによる推論 …… 102
5.3　おわりに …… 107
参考文献 …… 108

6　機械学習の基礎　111

6.1　概念学習とパターン認識 …… 111
6.1.1　近傍に基づく概念学習 …… 112
6.1.2　近傍に基づく多クラス認識 …… 116
6.2　一般的機械学習 …… 117
6.2.1　学習の定式化 …… 117
6.2.2　機械学習の例 …… 120
6.3　機械学習の分類 …… 125
6.3.1　教師あり学習と教師なし学習 …… 125
6.3.2　帰納的学習と演繹的学習 …… 126
6.3.3　確率的学習と決定的学習 …… 127
6.3.4　パラメトリック学習とノンパラメトリック学習 …… 127
6.3.5　オンライン学習とオフライン学習 …… 128
6.4　近傍に基づく学習 …… 128
6.4.1　学習ベクトル量子化 …… 129
6.4.2　自己組織ニューラルネットワーク …… 132
6.4.3　R^4 規則 …… 134
参考文献 …… 137

7 グラフ構造に基づく学習 139

7.1 ニューラルネットワークに基づく学習 …… 139
7.1.1 単一ニューロンに基づく学習 …… 139
7.1.2 多層パーセプトロンに基づく学習 …… 143
7.2 決定木に基づく学習 …… 148
7.2.1 決定木の構成 …… 149
7.2.2 決定木による推論 …… 150
7.2.3 単一変量決定木の学習 …… 150
7.2.4 多変量決定木 …… 154
7.2.5 決定木とエキスパートシステム …… 157
7.3 おわりに …… 159
参考文献 …… 160

8 知的探索 163

8.1 単点探索アルゴリズム …… 163
8.1.1 最急降下法 …… 165
8.1.2 タブー探索 …… 167
8.1.3 疑似焼きなまし法 …… 173
8.2 多点探索アルゴリズム …… 176
8.2.1 遺伝的アルゴリズム …… 176
8.2.2 粒子群最適化 …… 182
8.2.3 アリコロニー最適化 …… 184
8.3 おわりに …… 188
参考文献 …… 189

9 これからの展望 191

参考文献 …… 192

索引 195

1　人工知能の歴史と現状

人工知能（AI: artificial intelligence）に関する世界初の国際会議（**ダートマス会議**）が 1956 年に開催されてからすでに 60 年が経過した。1950 年代と 1980 年代にそれぞれ AI の第 1 の波と第 2 の波があった。2010 年代の現在は，AI の第 3 の波が押し寄せているところである。最近，Google の DeepMind 社によって開発されたコンピュータ囲碁プログラムアルファ碁（AlphaGO）が，マスコミで大きく報道され，AI が再び世界の注目を浴びている。本章ではまず AI の歴史を簡単にふりかえることから始め，次に，最近の動向を整理する。これを通して AI を学習する動機付けとしたい。

1.1　AI の萌芽

人間は他の動物よりも知能が高いゆえに，道具が使える。道具が使えるゆえに，人間はきばがなくても「武器」を持って野獣を倒すことができ，こうらがなくても「家」の中で安心して暮らせ，つばさがなくても「飛行機」に乗って空を高く飛べる。人間は，長い歳月をかけて，さまざまな道具を発明し，それらを改善してきた。道具には，人間の「身体能力」を伸ばすものが多い。身体能力と言えば，もともと人間は他の動物に比べて不器用である。速く走れないし，高く飛べない，木登りも下手である。しかし，人間はさまざまな道具を使うことによって，山を削ったり，海を埋めたり，宇宙空間で泳いだりすることができる。

さまざまな発明の原動力は，人間の知的能力，すなわち，知能である。逆に，人間の知能自身も，さまざまな発明を通して強化されている。人間は，紙とペンを発明することによって，記憶力を伸ばし，算盤（そろばん）を発明することによって，計算能力を強化し，論理的思考方法を発明することによって，判断能力を高めた。人間は昔から知的活動を助ける道具を開発してきたが，「本気で」知能を「創る」ことを目指したのは，20 世紀に入ってからのことである。

最初は，アラン・チューリング（Alan Turing），クロード・シャノン（Claude Shannon），ジョン・フォン・ノイマン（John von Neumann）ら先駆者がいた。彼

らは直接に知能を作ることはできなかったが，その基礎理論を築いた。例えば，チューリングは，計算を形式的に行うための**チューリングマシン**（Turing machine）を考案した。これは最初の形式的計算モデルであり，形が簡単であるにもかかわらず，あらゆる計算可能な問題の解を記述することができる［1］。チューリングは，**チューリングテスト**（Turing test）も提案した。これが，機械の知能を検証する方法として広く知られている［2］。シャノンは，サンプリング定理，情報理論，論理回路などを考案し，情報通信技術の基礎を作り上げた［3］。フォン・ノイマンは，コンピュータと最も関連の深い人である。なぜなら，ほとんどのコンピュータは，フォン・ノイマンのモデルに従って作られたからである。フォン・ノイマンはゲーム理論，そしてそれをもとにしたオペレーションズ・リサーチなどについても大きく貢献した。

同じ時期に，知能の源である脳に関する研究も盛んに行われた。脳に関する研究自体は昔から行われていたが，脳を模倣して機械を作ろうとする研究は，やはり，20 世紀に入ってからのことである。その代表人物は，ヨーロッパではウィリアム・グレー・ウォルター（William Grey Walter）とウィリアム・ロス・アシュビー（William Ross Ashby），アメリカでは，ノーバート・ウィーナー（Norbert Wiener），ウォーレン・スタージス・マカロック（Warren Sturgis McCulloch），ウォルター・ピッツ（Walter J. Pitts），フランク・ローゼンブラット（Frank Rosenblatt）らである。

ウォルターは，最初に脳波について考察したが，複雑そうな知的振る舞いは，もしかすると簡単なメカニズムで生成されているのではないか，という仮説を確認するために，世界初のロボット tortoises（亀型ロボット）を開発した［4］。これは知的ロボットに関する研究の発端であると言える。一方，アシュビーは，複雑な振る舞いをするシステムに関する理論を検討し，一般システム理論を提案した［5］。ウィーナーは，脳と機械における制御と通信について考察し，脳のようなシステムを**サイバネティックシステム**（cybernetic system）と称し，そのようなシステムが持つべき性質を論じた［6］。マカロックとピッツは，脳の中にある基本素子，すなわちニューロンの働きについて調べ，ニューロンの最初の数理モデルを提案した［7］。ローゼンブラットは複数のニューロンを利用して，**パーセプトロン**という，世界初の学習ができる回路を作った［8］。

このように，20 世紀の前半において，多くの科学者が知能について研究し，多くの知見を得た。そのころ，AI という言葉こそ明示的に使われていなかったが，

ロボット，コンピュータ，学習回路などが開発され，AIの芽がいよいよ伸びようとしていた。

1.2　第1の波

1950年代に，ジョン・マッカーシー（John McCarthy），マービン・ミンスキー（Marvin Minsky），ハーバート・アレクサンダー・サイモン（Herbert Alexander Simon），アレン・ニューウェル（Allen Newell）らがAIの第1の波を引き起こした。「AI」という言葉もマッカーシーによって提唱された。マッカーシーは，**LISP**（list processor）というコンピュータ言語を考案した［9］。LISPを使えば，さまざまな問題を，リストの再帰的処理によって解決することができるので，AIの世界においてはLISPが最も良く知られている言語の一つである。ただ，LISPで作られたプログラムには，多数の括弧があるので，LISPが「いらいらさせる大量の括弧」（lots of irritating superfluous parentheses）であると皮肉る声もある。

ミンスキーは，知識を従来の論理形式ではなく，グラフ形式で表現する**フレーム**（frame）を考案し，人間の問題解決過程をよりわかりやすくしようとした［10］。フレーム構造はその後，ウェブページ，オントロジー（ontology）などへ変形し，知識工学の基礎になった。ミンスキーは，初期のパーセプトロンの弱点を見つけた人でもある［11］。サイモンとニューウェルは**汎用の問題解決システム**（GPS: general problem solver）の提案者であり，問題を解決する一般理論を築いた［12］。このGPSによると，任意の問題は**探索問題**に帰着することができ，**手段目標分析**（MEA: means-ends analysis）に基づいて，解を見つけることができる。もちろん，さまざまな物理的制限があり，このような万能機械はいまも実現されていない。

AIを実用化したのが，エドワード・アルバート・ファイゲンバウム（Edward Albert Feigenbaum）である。ファイゲンバウムは，サイモンの弟子であり，当然GPSの利点と弱点を詳しく知っていたはずである。彼が提唱したのは，すべての問題を解決するシステムではなく，ある領域の問題しか解けない**エキスパートシステム**（expert system），すなわち「専門家システム」である［13］。エキスパートシステムは，GPSと同じようにMEAをコア技術として利用するが，解決する問題の範囲が限られたので，より使いやすくなった。

これらのAIシステムは，記号と論理をもとにプログラミングされたものであ

るために，学習能力がない。与えられた問題を解決するためには，人間の専門家はシステムにさまざまな知識を教える必要がある。AI は本来，人間の脳のように，みずから学習する必要がある。しかし，ローゼンブラットによって作られたパーセプトロンは，線形分離問題しか解けないので［11］，脳を模倣するニューラルネットワークに関する研究は AI の第 1 の波に乗れなかった。

1.3　第 2 の波

AI の第 1 の波の勢いは，20 世紀 80 年代になると，徐々に衰え始めた。その根本的な理由は，やはり，知識獲得というボトルネックであった。もともと，第 1 の波の最大目標は，「知識さえあれば，機械も人間と同様に推論することができることを証明し，その推論方法を確立すること」であった。この目標は，当時の研究者たちの努力によって見事にクリアしたと言える。しかし逆に言えば，有効な知識獲得方法がなければ，機械は何もできないこととなる。

AI の第 2 の波を引き起こしたのが，**ニューラルネットワーク**（NN: neural network）である。1986 年に，デビッド・ラメルハート（David E. Rumelhart）の研究チームが，**誤差逆伝播法**（BP: back propagation）を提案し，これによって複雑な知識も学習によって獲得できる**多層パーセプトロン**（MLP: multilayer perceptron）が構築可能となった［14］。実際，多層システムを構築する手法として，甘利俊一が 1967 年に BP を提案したが，当時の通信技術があまり発達していなかったため，同じアルゴリズムが異なる分野の人たちに何度も再発見されていた。

ニューラルネットワーク（NN）の復帰によって，「人間らしい計算」（human-like computing）や「自然計算」（natural computing）などが連想され，**ファジィ論理**，**進化計算**などの重要性も改めて認識された。実際，ファジィ論理は 1965 年，ロトフィ・ザデー（Lotfi Zadeh）によって提案された［15］。**進化的プログラミング**と**進化戦略**も，1960 年代に，それぞれローレンス・J・フォーゲル（Lawrence J. Fogel）とインゴ・レチンバーグ（Ingo Rechenberg）らによって開発された［16, 17］。少し遅れて，**遺伝的アルゴリズム**が，ジョン・H・ホランド（John Henry Holland）によって提案された［18］。その後，**遺伝的プログラミング**がジョン・コザ（John Koza）によって提案された［19］。1990 年代に，ファジィ論理も進化計算も，AI の第 2 の波に乗せ，大きく前進した。

ニューラルネットワーク，ファジィ，進化はあわせて，**しなやかな計算**（soft computing）と呼ばれる。実際，しなやかな計算はAIの第2の波の象徴でもあった。しなやかな計算を利用すれば，機械も人間と同じように知識を学習し，獲得することができるという期待があった。しかし，問題は予想したよりも難しく，しなやかな計算だけでは，なかなか実用的なAIシステムを得ることはできなかった。

1.4　第3の波

21世紀になってから，AIの第2の波も弱まり，多くの人がAIの実現可能性について懐疑的になった。しかし，科学者たちはさまざまな視点から打開策を探り続けた。意外にも，AIの第3の波を引き起こした主役は，**インターネット**であった。最初に，われわれはインターネットが「情報の高速道路」（information highway）としか考えなかった。しかし，インターネットの目覚ましい進歩によって，大規模な分散計算（distributed computing）が可能となった。これによって**クラウド計算**（cloud computing）が発展し，そのお陰で，ビッグデータの保存と処理も現実的となった。

実際，クラウド計算とビッグデータは，AIシステムが知識を獲得（学習）するためのバーチャル環境を提供している。すなわち，AIシステムは，われわれ人間と同じ世界で同じように学習する必要がなく，バーチャル環境で学習することができる。いま，さまざまなAIがクラウドサーバーに実装され，「かれら」が「仕事」をしながら学習し，成長している。良く知られているのは，Googleの情報検索システム，Amazonの商品レコメンドシステムなどがある。世界を驚かせたGoogle DeepMind社のアルファ碁を支えているものも，単体のシステムではなく，複数のクラウドサーバーのクラスタ（かたまり）である［20］。

元々，これまでにさまざまなゲームソフトが開発されているが，囲碁はAIができないゲームの一つだと多くの研究者が信じていた。なぜなら，囲碁をプレーする際，次の手を打つには，たくさんの選択肢があるためである。従来の方法を使う場合，膨大な計算が必要とされる。しかし，アルファ碁は，多層ニューラルネットワーク，すなわち，**深層学習**（deep learning）を使用することによって，プロ棋士のヒューリスティックを学習することができ，人間と同じように，「勝負勘」を持つことができる。しかも，アルファ碁は，プロ棋士の棋譜を学習するこ

とだけではなく，バーチャル環境の中でシミュレーションをして，自己対戦による自己学習ができる。これによって，アルファ碁がますます上手になり，人間よりも強くなることができる。

このように，AI の第 3 の波を象徴したのがクラウド計算と**ビッグデータ**であり，その背後にあるのがインターネットである。クラウド計算は，計算環境を提供しただけではなく，その中に大量でさまざまなデータを寄せ集めることによって学習環境をも提供する。この学習環境の中で，AI システムが自ら学習し，成長することができる。

また，アルファ碁は，囲碁をプレーするために「設計」されているが，問題を変え，その問題を定式化さえすれば，アルファ碁と同じ仕組みを持つ AI システムはさまざまな問題を上手く解決することができる。さらに，問題を与えるだけで，**問題の定式化**自体も，クラウド環境の中で AI が学習によって獲得できるようになる日はそれほど遠くないのではないかと思われる。このような時代になると，われわれ人間が，AI のことを知らずにはいられない。これからわれわれは，知能の仕組みを知り，人間の弱みと強みを知り，AI と共生共存しなければならない。

1.5　AI の定義

これまで，われわれは「知能」と「AI」を定義なしに使用してきたが，そもそも知能と AI は何か，それを科学的に定義する必要がある。まず「知能」を定義してみよう。「知能は，論理的に考える，計画を立てる，問題を解決する，抽象的に考える，考えを把握する，言語機能，学習機能などさまざまな知的活動を含む心の特性のことである」[21, 22]。この定義の中で，「問題解決」が中心であり，他の要素は問題を解決するために必要とされる「知能の特徴」である。

いま，問題解決とは何かを考えよう。実際，問題解決は，問題の「**実行可能解の集合**」(feasible set) の中から，最適な解を見つける探索問題である。すなわち，世の中のすべての問題は，探索問題に帰着し，解があれば，それを探索によって見つけることができる。面白いことに，解があるかどうかを証明する問題も，探索問題に帰着できる。論理的に思考することは，システム（脳）の中に記憶された知識をもとに，「解釈できる，実証できる形で」問題の解を探索することである。計画を立てることは，大きい問題を小さく分割し，それらの「部分問題」

を順番良く解決することによって，もとの問題の解を探索することである。抽象的に思考することは，実問題を一旦システム（脳）の「内部表現」にマッピングし，システムの中でシミュレーションすることによって解を探索することである。また，言語は，問題，その解，そして解を求める過程を表現するための道具である。そして，学習は，「問題の解をより効率的にまたは効果的に求める方法」を探索する過程である。

システムは，以上の特徴の一部あるいは全部を有するなら，知的であると定義できる。この定義によれば，人間は当然ながら，知的システムである。コンピュータで実現した知的システムは，AI システム，あるいは略して AI である。研究分野として考えた場合，AI は，知的システムを作るための理論，方法，技術などについて探究する学問である。

一概に知的システムとは言っても，システムによって知的レベルが異なるかもしれない。AI が目指すものは，どのようなシステムなのか，これについてさまざまな見解がある。通常，人間が地球上で最も知的であるので，人間のように振る舞うシステムを作ることは AI のゴールであると考える人が多い。ウォルターの亀型ロボットも，チューリングの「人間検証テスト」も，振る舞いに着目して考案されたものである。しかし，振る舞いだけに着目して作られたシステムは，心を持たない可能性があり，本当の知能を持たないかもしれない [23]。逆に，人間のような心をシステムに持たせ，そのシステムが本当の知能を持つのかと聞かれると，そうでもない。例えば，人間のように感情を持つと，人間臭さがあり，人間らしくなるが，さまざまな問題を「合理的」に解決できなくなる可能性もある。すなわち，人間の知能レベルは，われわれが思ったほど高くないかもしれない。

では，知能のレベルを客観的に，数値的に定義できるかどうかを考えよう。例えば，数値的に，システムの知能レベルは，それが解決できる問題の難易度で定義しよう。問題の難易度は，問題の複雑さあるいはそれを解決するために必要とする計算量で計ることができる。すなわち，解ける問題が難しいほど，システムの知能が高いと言える。この定義によると，例えば，2 つの AI システム A と B があるとして，システム B が解決できるすべての問題が A も解決できるが，逆に A が解決できる問題の中で，B が解決できないものがあれば，B よりも A の知能が高いと言える。

しかし，問題の領域を固定すれば，その中にあるすべての問題を解決できるシステムあるいはアルゴリズムがたくさんあるかもしれない。その中で，より効率的なものがより高い知能があると考えられる。例えば，任意の問題を平均1秒で正しく解けるシステムと，平均1時間でやっとできるシステムと比べると，前者の知能が高いと言える。また，効率が同じでも，より効果的なものがより高い知能があると言える。例えば，任意の問題を，ともに1秒以内で解けるが，より良い解を与えるシステムがより知能が高いと言える。例えば，海外旅行のルートを求める問題に対して，旅行に必要とする金額や時間などが少ないルートはより良い解である。このように，システムの知能レベルを数値的に定義するために，さまざまな要素を考えなければならない。たくさんの要素を同時に考えることは人間にとって大の苦手である。この意味で，さまざまな領域で実装されたAIシステムはすでに人間の知能を超えている。

AIがすでに人間の知能を超えていることは，やはり認めたくない。以上の定義は，どこかで間違っているのではないかと思われる。その間違いを探るために，数値的ではなく，別の視点から知能のレベルを考えてみよう。実際，問題が与えられ，それを定式化すれば，それを「機械的に」解決できるので，知能がいらないという考え方もある。例えば，海外旅行問題を考えよう。この問題は，周知の**深さ優先探索**や**幅優先探索**で解決することができる。探索性能を向上するためには，**最良優先探索**などを利用すればよい。この意味で，人工システムの知能レベルは実に低いものである。

多くの問題は，**探索グラフ**で表現でき，単純な機械的操作を繰り返すだけで解決できる。グラフで表現できない問題でも，数式で表現できる問題が多く，このような場合にも，非線形計画法などで解決できる。ここでポイントとなるのが問題の定式化である。人間は，さまざまな問題を分析し，問題を定式化し，道具を利用して問題を解くことができる。しかし，AIシステムの場合は，今のところこのような能力がない。したがって，人工システムの知能レベルはまだ人間以下であると考えられる。

しかし，機械的にできると知能が要らないかというと，そうでもない。システムの内部で機械的にやっているが，外観的には，すなわち，振る舞いから見れば，知的であることが十分ありうる。実際，既存のAIシステムのほとんどはこのようなものである。われわれ人間の脳も，その中を覗くと，ニューロンの働きは非常に単純で機械的である。したがって，問題を機械的に解決しているからといっ

て知的システムではないという結論は得られない。

以上の議論からわかるように，視点によっては，AI の知能レベルが人間のそれよりも高いと見ることもできれば，その逆も言える。現時点で人間が自慢できるのが，与えられた問題に対して，それを定式化できる点である。しかし，問題の定式化も，それを問題解決過程の一ステップとして考えれば，機械的に解決できる。したがって，問題の定式化も，人間固有の知能ではない。この意味で，知能のレベルで言えば，AI はいずれ人間を超える時期が来る。

では，AI システムに比べて，われわれ人間が持つ「すごさ」は一体何であろうか。それは，一言で言えば，「**生命**」である。人間は生命であるから，サイバネティックである，すなわち，「**自己ガバナンス**」(self-governance) をする能力がある [24]。人間は，生きるために，時々刻々に環境と自分の状況に合わせ，目標を設定して，その目標を達成するために問題を発見し，解決する。これに対して，AI システムは，生きる動機がなく，生きるための目標設定や問題発見もない。すべての問題が，人間が与えたものである。したがって，AI は，その知能レベルが人間を超えたとしても，人間の道具にすぎない。われわれ人間にとっては，この状態をこのまま永遠に続けてほしい。しかし，人工システムに，知能だけではなく，生命をも持たせるとなると話は別である。それは，進化の自然な流れであるかもしれないが，われわれが真剣に考えなければならない問題でもある。

1.6　本書の構成

本書は，学部レベルで AI の基礎知識を勉強するための教科書として書かれたものである。その内容は主に 3 つの部分からなる。1 つ目は，問題の定式化と探索であり，第 2 章と第 8 章から構成される。2 つ目は，知識表現と推論，第 3 章〜第 5 章から構成される。3 つ目は，学習と知識獲得，第 6 章と第 7 章からなる。第 8 章は，多少難しいので，オプションとすることができる。

具体的に，第 1 章は，AI の歴史と現状について解説する。第 2 章は，簡単な例を使って，問題の定式化方法と，グラフ探索に基づく問題解決方法を説明する。第 3 章〜第 5 章は，それぞれ，論理による知識表現と推論，エキスパートシステム，しなやかな知識表現を紹介する。第 6 章と第 7 章は，それぞれ，パターン認識問題と知識獲得の基本，決定木とニューラルネットワークに基づく知識獲得を紹介する。第 8 章は，高度な知的探索について概説する。第 9 章は，今後の展望

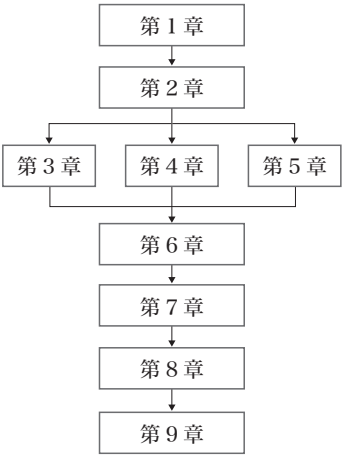

図 1.1　本書の流れ

である。

基本的に，第 2 章から第 7 章までの各章の内容は，およそ 2 回の 90 分の授業で学習することができる。イントロダクションと復習を含めて，およそ 15 回の講義で AI 関連の基礎内容を一通り学習し，把握することができる。グラフ探索や命題論理などについて，アルゴリズム，離散数学などの科目で勉強したとすれば，これらの内容を省き，第 8 章を講義の中に組み込むと良いと思われる。各章の演習問題は，学習内容をより深く理解するために，宿題として使用することができる。演習問題の解答例は以下のホームページから入手することができる：

http://www.u-aizu.ac.jp/~qf-zhao/AI-textbook/Homework-Answer/index.html

また，学習の順番は，基本的に図 1.1 のようになる。第 3 章から第 5 章の各章は，できるだけ独立に学習できるように書かれていて，どれを先に学習しても構わない。

学部の学生ではなく，これから AI の研究を始めようとする「社会人」や，すでに AI の研究者であるがその全体像を知りたい方も，本書を参考書として活用することができる。その場合，本書の内容に限らず，参考文献を積極的に参照することを薦めたい。AI の世界では，まだまだ課題が多く，本書は課題の発見，問題の解決に役に立つことを目的にしているが，ページ数の制限などもあり，意を尽