

人工知能研究の過去・現在・未来 ——人工知能から人口知能へ



寺野 隆雄

産業技術総合研究所・千葉商科大学
tterano@computer.org

人工知能の研究は、人間の知的な行動を人工的に（計算機上で）実現しようという試みから始まっている。ここで問題となるのは「知能」とは何かが定義されていないことである。その結果、問題解決に必要な情報である知識や知能をうまく扱うような技術が確立すると、はじめは人工知能の研究であったはずのものが、他の研究領域として確立し、人工知能研究から独立していつてしまう。

人工知能研究が開始された頃には、このことは明確には理解されていなかった。人間の知能の本質を明らかにしようという人工知能（AI）の立場と、人間の知能の性質を明らかにした上で、その能力をコンピュータ利用によって高めようという知能増幅器（Intelligence Amplifier; IA）のせめぎあいの中で研究開発が進展していくところが人工知能の非常に興味深い性質である。したがって、AIの研究の中で、役に立ちそうなところがIAになり、それが成功を収めると独立した研究分野になっていき、人工知能とは思われなくなる。さらに、具体的な応用例で失敗が続く、もしくは、思ったような成果が出ないとなるとブームが去るというサイクルが繰り返される。

最近の人工知能研究は、認識論（Epistemology）、存在論（Ontology）、進化論、エージェント社会論の観点から整理することが可能である。認識論の立場からは深層学習を含む機械学習の方法が得られ、存在論の立場からは、webサイエンスや検索・情報推薦の方法が得られる。進化論の立場から、制約の少ない汎用の最適化手法・探索手法

が得られ、エージェント社会論の観点から、エージェント・ベース・モデリングの方法が得られる。

エージェント・ベース・モデリングの特徴は、i) ミクロ的な観点においてエージェントが（個別の）内部状態をもち、自律的に行動・適応し、情報交換と問題解決に携わる点、ii) その結果として対象システムのマクロ的な性質が創発する点、iii) エージェントとエージェントを囲む環境とがミクロ・マクロリンクを形成し、互いに影響を及ぼしあいながら、システムの状態が変化していく点にある。この特性により、実験が不可能な社会・経済現象に関する知見が得られる。この分析には、統計物理の手法が利用されることもある。

物理学と人工知能のアプローチは少し異なる。物理学では、自然を観測し、現象を計測することで、できるだけ簡潔かつ一般性の高い理論を導こうとする。これに対して、人工知能では、人間を観測し、その知的行動の原理を示す理論を導くと同時に、工学的・社会的問題を対象に、問題解決に導くシステムをデザインしようとする。

その一方、Laughlinが著した『物理学の未来』（*A Different Universe—Reinventing Physics from the Bottom Down*—, Basic Books, 2005）においては、物理現象の「創発的性質」に焦点が当てられており、この考え方は、人工知能研究、特に、エージェント・ベース・モデリングの方法論に関連が深い。この点において、今後、物理学と人工知能の両分野が融合して新たな学問領域が創発する可能性があると考えられる。

—Keywords—

人口知能：

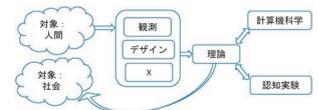
人間の集団行動が表す知的行動のこと。英語ではPopulation Intelligence, Group Intelligenceに相当する。「人工知能」の変換間違いのまま使われることもあるが、意外に知能の本質を表している。

機械学習：

（大量の）データを利用して問題解決に必要な情報を抽出しようという人工知能の理論・技術のこと。深層学習が流行りではあるが、統計的機械学習やベイズ推定などの理論は、統計物理学の考え方に近い。

エージェント・ベース・モデリング：

エージェントと呼ぶソフトウェアを複数利用することによって、対象システムのボトムアップなモデル化を試みる手法。近年、社会現象を分析する手段として普及が進んでいる。社会物理学・経済物理学との関連も深い。



人工知能の研究アプローチ。

1. はじめに

この種の解説ではあまり書かないのだが、ちょっと私が解説を書くことになった背景を述べておきたい。きっかけは、人工知能学会と物理学学会が相互乗り入れする形ではじまった協力関係に基づいて、2018年6月に行われた人工知能学会全国大会のパネル討論であった。なお、同様のパネル討論が2019年6月の人工知能学会全国大会でも行われている。

そこで、「物理学とAI」というテーマで、現象の認識と理解をテーマに興味深い討論がなされ、他方、人工知能学会誌でも特集号が発刊された。¹⁾ そこから、私は物理学とは何だろうかということで、入門書を改めて読み直してみた。^{2,3)} そして、これらから感じたことに基づいてこの解説を準備することになった。結果として、以下では、人間と人工物、自然科学と情報科学の境界領域にあるはずの人工知能の思想と技術の変遷を私自身の研究歴と関連付けて述べることにする。

私は、長年、人工知能研究の中でも、主としてアプリケーションを中心に研究を続けてきた。^{4),5)} 最近、個々人の知能の自動化あるいはその支援を目的とする人工知能 (Artificial Intelligence) の領域から人口知能 (Population Intelligence) の領域へと興味が行移している。「人工」と「人口」という字句の誤りは、ワープロの普及した現在ではしばしば見られ、マスコミなどの正式な(?) 文書の中でもしばしば登場する。しかしながら、「人口知能」という用語は、間違っているようで本質をついている。すなわち、人が大勢いる/要素が沢山ある場合の「知能」とはどういう概念であり、どのような適用が可能かというのは大きな研究テーマである。そして、これにしたがって、魅力的な新しい研究領域が形作られつつある。Human Computing, Agent-

Approach, Social Network Analysisなどはこの例となる。また、このような考え方をすることによって、多数の粒子、あるいは、エージェントの相互作用を巨視的な観点から扱う統計物理の考え方とそれをどのように現実に適用していくかという問題にも接近できるようになる。この例が、社会物理学 (Socio-Physics), 経済物理学 (Econo-Physics) である。

本稿の構成は以下のとおりである。まず、解説のタイトルにあわせて、人工知能の歴史を述べ、何が問題であったのかについて論じる。次に、現在の人工知能研究の主要な項目について基本的な考え方を示す。そして、今後、より重要になると思われる人工知能研究の重要な側面であるエージェント・ベース・モデリングの特性について論ずる。その上で、対象が自然か人工物かという観点から人工知能の研究と物理学の研究の接近方法の違いについて述べる。最後に結論を述べる。

2. 人工知能の歴史

人工知能の研究は、ダートマス会議に始まり、第一期、第二期のブームとその後に訪れた凋落を経て、現在、第三期のブームとなっている。この経過については、さまざまな文献に優れた解説がある。⁶⁾ ここでは、人工知能学大事典の第1章 [1-1] 総論⁷⁾ を挙げておく。この総論は我が国の代表的な人工知能研究者によって記述されており、私にはこれ以上の説明をできる自信はない。ただ、私自身の考え方を整理するために、人工知能大事典の内容をつまみ食いしながら人工知能の歴史をまとめた年表を図1に示す。この内容について詳しく述べるとそれだけでこの解説の長さを超えてしまうので、説明は避けるが参考にしていただければ幸いである。

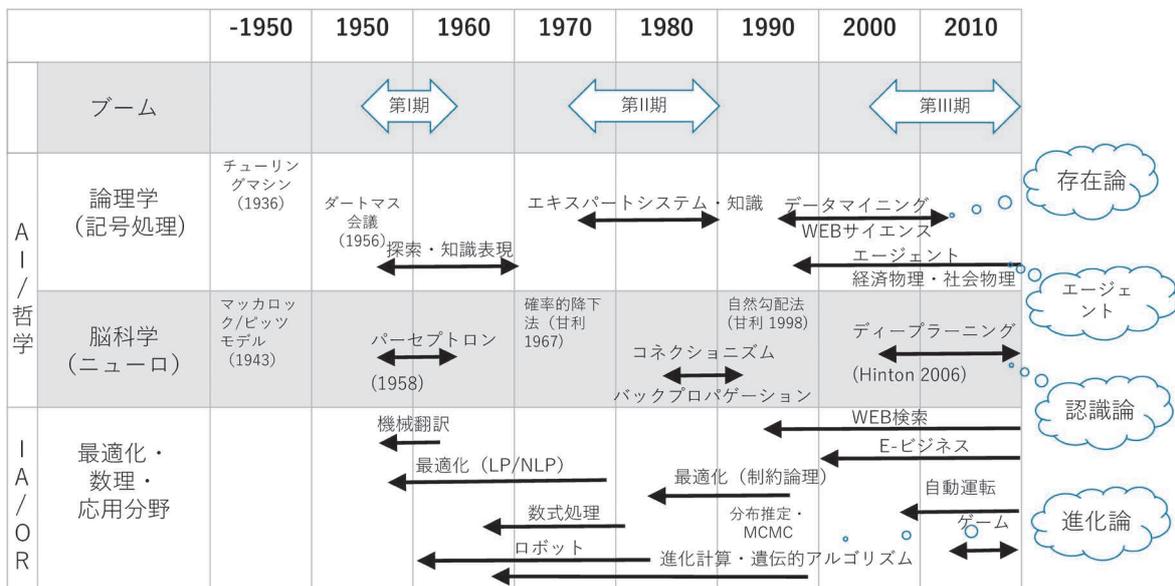


図1 人工知能研究の歴史。

以下では、この年表のはじめに記述した1956年に開催されたダートマス会議の提案書⁸⁾を紹介し、その後起こった3回のブームの特徴とその凋落の理由について私なりの解釈を加えることとする。

2.1 人工知能の先端性について

私が生まれたのは1952年であり、人工知能の誕生以前である。そして、我々は、1952年から連載が始まった鉄腕アトムのマンガにもっとも影響を受けた世代である。我が国では、私と同年代の人工知能研究者で、鉄腕アトムの影響を受けた者が非常に多い。いつかは鉄腕アトムを作るのだという夢をもった少年が多かったのである。1952年から2019年まですでに65年以上経過している。第一期の人工知能ブームは経験してはいないものの、その後何が起こったかは、身をもって体験しており、歴史を語る資格があると考え次第である。

私が人工知能の概念を知ったのは、学部学生の頃である。今では、考えられないことかもしれないが、1970年代半ばの頃は、第一期の人工知能ブームは完全に終わっていた。人工知能はまともな研究分野とは思われておらず、そのような研究に励むことが許される雰囲気は、大学にも民間の研究所にもなかった。同年代の研究者(の卵)たちと、なかば隠れキリシタンのように当時の最新の論文を使って輪講会を実施していたことを思い出す。そこで出会ったのがAIUEOという(昔の)若手の研究グループである。我々は、30歳を過ぎたら人工知能のようなやくざな領域から足を洗ってまともな研究の道に入ろうと言いながら、英文誌AIジャーナルなどを中心にいろいろな論文を輪読していた。これらの勉強は、我々自身の研究上は何の役にも立たないはずであった。ところがである。現在のところ、我が国の人工知能研究の重鎮となっているのは、(いまだに)この世代である。⁴⁾

人工知能の研究は、人間の知的な行動を人工的に(計算機上で)実現しようという試みから始まっている。そのおおもとは、ゴーレムという泥人形であったり、からくり人形であったり、また、フランケンシュタインだったりする。しかし、ここで問題となるのは「知能」とは何かが定義されていないことである。

人工知能研究が開始された頃には、このことは明確には理解されていなかった。人間の知能の本質を明らかにしようという人工知能(AI)の立場と、人間の知能の性質を明らかにした上で、その能力をコンピュータ利用によって高めようという知能増幅器(Intelligence Amplifier; IA)のせめぎあいの中で研究開発が進展していくところが人工知能の非常に興味深い性格である。したがって、AIの研究の中で、役に立ちそうなところがIAになり、それが成功を取めると独立した研究分野になっていき、人工知能とは思われなくなる。さらに、具体的な応用例で失敗が続く、もしくは、思ったような成果が出ないとなるとブームが去るというサイクルが繰り返される。

2.2 ダートマス会議と第一期の人工知能ブーム

話をもとに戻そう。人工知能研究のきっかけとなったダートマス会議の提案書は、近年Stanford大学のwebページから入手することができる。⁸⁾これは、当時29歳であったマッカーシー(J. McCarthy)と、その後人工知能の研究とともに主導するミンスキー(M. Minsky)、ロチェスター(N. Rochester)、それに、情報理論を開拓したシャノン(C. E. Shannon)の共著となっている。シャノンはすでに大御所となっていたので、権威づけのために共著にされていたのかもしれないが、真相はわからない。提案書の主旨は、マッカーシーが所属していたダートマス大学において1956年の夏2か月間の研究集会の実施のために、必要な費用の申請を行うものである。総額は、当時の金額で\$13,500と見積もられている。会議に呼ぶ候補者として、50名弱の有名無名の研究者のリストがついている。研究集会の後、成果報告書を作成するという記述もある。

さて、提案書では、機械に知能をもたせる研究としての「人工知能」という新しい研究領域を立ち上げることがゴールであると明記し、そのために情報理論の概念を適用し、オートマトンの概念と脳のモデルを統合すると述べている。具体的な研究テーマとしては以下の3つが挙げられている: 1) 計算機械に創造性、オリジナリティをもたせること、2) 計算機械に発明や発見の能力を与えること(この項目は若干他の項目よりも詳しく、発明や発見のためには、データからの抽象化能力をもたせ、ゴール達成の仕組み、予測の仕組みなどを実現したいということが述べてある)、3) ランダムネスを取り扱える機能をもたせること、そのためには、ニューロン・ネット(Neural Netという用語はない)の研究が必要なこと。

これら提案書の記述は非常にナイーブでその後の研究の難しさとそれを克服するための研究の発展とは比べ物にならない。しかしながら、若造の研究者のこの不十分な提案に対してロックフェラー財団は資金を提供し、1956年にこの集会は実施されることになった。強引に新しい研究領域を立ち上げようという若者の熱意が身を結んだのである。参加者には、後にノーベル経済学賞を受賞したサイモン(H. Simon)、彼と同時にチューリング賞を受賞したニューウェル(A. Newell)、チェッカーの強化学習プログラムなどを開発したサミュエル(A. Samuel)など10名強が含まれる。(このようなスケールでの提案が現在の我が国でも陽の目をみるとよいと思うのだが……)

いずれにせよ、この会議の結果、人工知能が歩き始めるのである。しかし、提案書に含まれていた報告書は提出されることはなかった(これも研究者としては望ましい結果である)。代わって、後に出版されたのが、『コンピュータと思考』という書籍である。⁹⁾これには、当時の人工知能に対する期待と熱気があふれた論文が収録されており、英文では、最近も再販されている。ちなみに、この書籍の印税をもとに、若手人工知能研究者に与えられる最高の賞と

して Computer & Thought Award が創設された。

この人工知能研究の提案と前後して研究が開始されたのが、冷戦時代に対応するために軍が膨大な資金を提供した機械翻訳のプロジェクトがある。応用分野が明確な工学的な研究分野の結果は、必ず、デュアル・ユースの性格をもつ。すなわち世の中での役に立つような研究は必ず軍事的にも役立つのである。そんな中で、チョムスキー (N. Chomsky) の生成文法が提案され、後の自然言語解析の基礎を与えている。しかしながら、当時の計算機の能力は機械翻訳に利用するにはあまりにも低く、1966年に機械翻訳の可能性を否定する ALPAC レポートが提出されることがきっかけとなって、人工知能研究のバラ色の夢は終わることになる。ダートマス会議から10年強で、第一期の人工知能ブームは終焉する。

2.3 エキスパートシステムと第二期の人工知能ブーム

私が、仕事として人工知能の研究開発に携わるようになったのは、電力中央研究所に勤務し、1980年に第5世代コンピュータプロジェクトが ICOT という研究機関で華々しく始まった頃であった。これは、米国で、1977年に「知識は力である」というファイゲンバウムのスローガンのもとにエキスパートシステムの開発が始まってからしばらく経ってからのことであった。ICOT のワーキンググループでは、著者は、電力業界のシステムに詳しい専門家という位置づけであったが、複数参加したエキスパートシステムを中心としたグループは非常に熱心で、最初は、当時のコンピュータ・電機メーカーの研究者のレベルの高さに驚かされたことをおぼえている。⁴⁾

エキスパートシステムは、第一期の人工知能ブームが終わった後に、比較的少数の研究者によって開発・蓄積されてきた、探索・推論の技術、知識表現の技術を実問題へ適用しようという試みであった。これには2つの定義づけが可能である。¹⁰⁾ 第一の定義は専門家のタスクを代替するというシステムの機能面を強調する。第二の定義は、それ以前のプログラミング技術には用いられなかったシステム構成上の特徴を強調する。これはシステム開発者の立場に立つものである。

第一の定義は次のようなものである。「エキスパートシステムとは人間の知性を用いなければ解けないような特定分野の問題を解決するのに、専門家の経験的知識 (Heuristics) を計算機に組み込んで、人間に代わって、あるいは人間を支援して問題解決を遂行することを目的としたシステムである」。この定義は、対象とする問題領域の特定のタスクを効率的にこなしていくためには、その領域の専門家の知識が重要な役割を果たすという知識工学の考え方に基づいている。これが「知識は力である」というスローガンに象徴されている。

第二の定義は次のようなものである。「エキスパートシステムとは、問題解決に知識を陽に利用するシステムであり、知識とそれを扱う仕組みとを、それぞれ知識ベースと

推論機構として分離し、独立性の強い2つの要素からシステムを構成するソフトウェアである」。この意味では、エキスパートシステムを知識ベースシステム (Knowledge-Based System) あるいは、知識システム (Knowledge System) と呼ぶ。このような観点からは、推論機構と知識ベースの実現にはどのような手段をとっても良いわけで、ファジィ推論、論理プログラミング、制約プログラミング、ニューラルネットワークなどさまざまな手法が使われる。同じく、知識ベースの実現には、フレーム、オブジェクト、意味ネットワーク、スクリプト、ブラックボードなどさまざまな手法が開発されてきた。

ここで、注意しておきたいのはニューラルネットの手法のみでも高度なシステムは実現できる点である。当時流行していたバックプロパゲーション手法を利用したシステムは、ここでいうエキスパートシステムのフレームワークとは異なる。

機械学習の基本的な方法もこの時代に開発されているが、それらは、あまりエキスパートシステムには利用されなかった。それは、大量のデータを自動的に収集する仕組みがなかったこと、インターネット上のデータの利用方法が明らかになっていなかったこと、当時の計算機の能力が低かったことによる。そして、このブームは、第二期の人工知能ブームと同様に10年と少しで、1990年代初頭に突然終わりを告げる。我が国では、表面的には、第5世代コンピュータプロジェクトが成功とはいえない状況で終了したこと、いわゆる平成バブル景気がはじけることによって企業の先端システムに対する研究投資が一気になくなってしまったことによる。

しかし、技術的には少し事情が異なる。要は「専門家の経験的知識」を収集し、定式化することが非常に難しく、せっかく実用化したシステムもすぐに古くなってしまったのである。エキスパートシステムという用語が少なくともマスコミから消えていった理由は、ルール形式で書かれたシステムは、「知識」の可読性が良いという歌い文句とはうらはらに、実際のところ、非常に個性が高く、保守性に乏しいというシステムだったのである。

例えば、高炉の運転支援のために専門家の知識を「炉のA点の溶鋼の赤色であれば、コークス量を増やすべきである」という記述は、そのまま記号として知識ベースに格納でき推論に利用できる。しかし、計測法の精度が上がり、「溶鋼が赤色」という情報が「摂氏1,000度」と測定できるようになった場合は、このような専門知識は、制御式などまったく別の方法で記述し直さなければならない。知識ベースが巨大な場合は、これは非常に手間のかかる作業となる。

物理学の領域では、適切なモデルをもとに理論を整え、実際の適用を考えるわけであるが、専門家の経験知識そのままでは、科学技術の基本原則に立ち返ることができず、システムを実現することになるのである。⁴⁾

2.4 機械学習・ニューラルネットワークと第三期の人工知能ブーム

第二期の人工知能ブームが終焉した後、人工知能研究者はふたたび静かな研究に戻る。私自身は、システム技術の研究者としての立場をとることにしていた。¹¹⁾ この状況が一変するのが、1980年代から細々と研究が続いていた以下の3つの領域で成果が急激に目に見えてきたからである：1) ニューラルネットワークの研究グループの成果。2) ベイズ推定などの統計的手法を発展させた統計的機械学習の成果。3) 大規模な知識ベースとしてのweb情報とビッグデータの利用技術の確立。その結果、21世紀に入り、難しいとされていた実問題がこれらの技術で解かれるようになり、第三期の人工知能ブームが訪れる。

より具体的には、ニューラルネットワーク、深層学習によるパターン認識精度の飛躍的向上、囲碁・将棋などの完全情報ゲームの実力の向上、それに自動運転などの問題である。これらの中心となったのが、GAFA (Google, Apple, Facebook, Amazon) などの豊富な資金をもつ民間企業であったことも大きな特徴である。物理学のような既存の学問領域では、国家の研究資金が大きな役割を果たしてきたのと大きな違いである。そして、2019年の今日までこのブームは継続している。以下の章では、現在の人工知能技術の特徴を私なりにまとめてみたい。

3. 最近の人工知能研究のまとめ

純粋な人工知能研究は、人間を対象とする。そして、自己・知能・思考・認識・学習・成長などの概念を明確にしようとする。結果として、哲学と非常に近い、もしくは、哲学そのものといった様相を示す。たとえば、ホフスタッター (Douglas R. Hofstadter)^{12,13)} やデネット (Daniel C. Dennett)¹⁴⁾ などの著書はこのような問題を我々に深く考えさせる良書である。が、ここでは、IA (知能増幅器) に近い立場で最近のAI (人工知能研究) の特徴をまとめることとする。なお、以下の説明を補うものとして、翻訳書がすでに出版されている定評のある教科書を挙げておく。¹⁵⁻¹⁷⁾

3.1 認識論としての人工知能研究——物事を認識する方法として

認識論 (Epistemology) では、知的活動において、世界の事象が感覚を通じていかに認識されていくかが主題となる。人工知能では、この認識の手段を研究することが中心となる。第二期人工知能ブームのときには、この手段として、専門家の経験的知識を、記号としてルールなどで表現することが中心であった。そして、対象物のパターンさえも記号で可能な範囲で処理することが試みられた。しかし、このルールによる認識を適格に行うことは難しく、知識獲得・管理に関する課題ゆえに、第二期人工知能ブームは終焉した。一方、これに対して相補的な方法が、ニューラルネットワーク、ファジィ推論、グラニューラーコンピューティングなどである。

コネクショニズム (connectionism) では、脳のニューラルネットワークを計算のモデルとして用いて、知能に迫ろうという立場をとる。そのために、脳の神経回路網を数学的に単純化させたモデルをコンピュータ上で計算する。神経素子のモデルとしては、多入力、一出力の非線形計算関数を用いる。この素子に含まれる、重みのパラメタをさまざまな方法で、変化させることによって、入出力関係が変化する。これが、一神経素子の学習を表す。ニューラルネットワークでは、各素子は自律分散的に動作し、素子をどう組み合わせるか、それに適したデータをどう準備するか、どのような計算法を利用するかが課題となる。第二期の人工知能ブームの時は、バックプロパゲーションという計算法が多く用いられた。この基本的なアイデアは、甘利俊一によって1967年に発表されたものであることは意外に知られていない。¹⁸⁾ いずれにせよ、実用システムを実現するためには、計算能力不足が問題となった。

ニューロンの階層を非常に増やすことが、コンピュータの性能向上に伴って可能となり、実問題まで適用できるようになったのが、最近の深層学習である。

さらに、パターン認識に関連しては、統計学や統計力学の理論との関連が深化しており、統計的機械学習という領域が、人工知能とは離れた学問領域として成立しつつある。これらは、ニューラルネットワークや、後で述べる最適化や探索の理論的な研究とも関連が深い。

3.2 存在論としての人工知能研究——大規模情報を扱う手法として

存在論 (Ontology) では、世界の事象の存在自体を問題とする。人工知能の領域では、オントロジーとは、言語として表された諸概念を明確に定義・記述して、体系化し、階層的に整理したものを意味する。このような語彙の体系を整えることは、百科事典を編集すること以上に、非常に手間のかかる作業である。ところが、第二期人工知能ブームの終わり頃、人工知能が常識を備えかつ自発的に学習可能になるには、一度は、人間の手で、基本的な知識体系をコンピュータ上に組み込む必要があるという主張があった。

この信念のもとで、レナート (Douglas Lenat) は、既存の百科事典や新聞が含む情報のすべてを整理し、大規模知識ベースを実現しようというプロジェクト Cyc を主催した。¹⁹⁾ 人手によって百科事典の内容をすべて記号化して、知識ベースにしようとしたのである。この Cyc プロジェクトは現在も継続しているようであるが、実問題に適用したという結果は聞いたことがない。中央集権的な人手による手法では、実際のところ、この種の大規模な知識を収集管理することは難しいということであろう。

今日的には、このような大規模な知識は、インターネット上の整理されたウェブ情報の集まりに相当すると考えてよい。このような大規模な知識を利用できるようになったのは、事実上、誰でもが編集に参画できる百科事典プロジェクト Wikipedia が開発されたからである。実際に、

Wikipediaでは、説明に使う概念の体系が、(上述した人工知能における)オントロジーとして準備されており、その概念に従ったエディタを利用することで、コンピュータや事典の編集の知識をもたない各領域の専門家が、充実した内容の記事を投稿できるようになっている。

さらには、非定型なデータを柔軟に扱うための共通の仕組みとしてLinked Open Data (LOD) が大きな役割を果たしている。LODでは、データ項目の各々が、ウェブページに相当するアドレスをもち、相互参照することで非常に複雑な情報を体系的に利用することが可能となっている。

また、Googleをはじめとするさまざまな検索エンジンがインターネット上で利用できるようになったことも、大規模な情報を柔軟に管理・操作する方法を提供している。これらの集大成をビジネスとして取り込むことをねらったのが、IBM社のWatsonプロジェクトである。さらには、これらの技術の発展に伴って、天文学のデータのようなビッグデータを扱うことが可能となり、さらに、さまざまな推薦エンジンが開発されることによって、新しいビジネスにつながっていったと考えられる。

3.3 進化論としての人工知能研究——生命の進化に触発された探索手法

環境の変化に対応する生物の進化の速度は意外に速い。スモッグが激しかった19世紀のロンドンにおいては、黒い蛾が数多く出現したし、ガラパゴス諸島では、わずかな気候の変動によってフィンチという鳥類のくちばしの形状が数年単位で変化することが報告されている。このような生物の進化のプロセスを計算アルゴリズムとして利用する立場が、進化計算あるいは遺伝的アルゴリズムと呼ばれる領域である。人工知能研究における伝統的な領域である探索問題に関連して、進化計算の手法も人工知能研究の一分野とするのが適切と考える。

進化計算では、自然界で世代を超えて創発する偶然性を手順の中に取り入れて確率的な動作をさせる点が特徴的である。この原理は比較的単純である。すなわち、与えられた問題に対してそれを満足する新しい解候補を多数生成し、その中から良いものを選び出し、それをさらに遺伝的操作によって組み替えては、改善するという手続きの繰り返しで解を得るものである。これが効果的に働くのは、多点を用いた探索であること、与えられた問題の隠れた構造をビルディング・ブロックとして解を構成することが理由である。すなわち、進化計算では、部分解の適切な組み合わせによって、より良い解が逐次生成され、最適解に至るはずであるとの仮定がある。²⁰⁾

もし、与えられた問題が構造をもたないものならば、それに対する解法はランダムな探索の適用以外には存在しない。しかし、問題に隠れた構造が存在しその組み合わせによって解が構成されるのであれば、遺伝的演算の適用によって求解に要する手間は著しく軽減されるはずである。これをビルディング・ブロック仮説という。従来の(連続

関数の)最適化手法が対象問題について微分可能性などの問題構造を仮定していたのに対して、遺伝的アルゴリズムでは、問題に内在する階層性とビルディング・ブロックを仮定して手法を構成する。

初期の遺伝的アルゴリズムは、問題をビット列などの離散データとして表現し、これを組み替えることで徐々に解を改善する方法が中心であった。しかし、連続値を扱うような最適化問題では、これは不十分である。最近では、遺伝的アルゴリズムは複数の評価点を同時に用いて、解候補を改善するという多点探索手法として理解される。そして、背後に解空間の確率構造を仮定し、確率的な探索によって解空間の分布全体を推定しようという接近法が主流になってきている。分布推定アルゴリズム(Distribution Estimation Algorithms)に関する一連の研究はこれにあたり、MCMC(Markov Chain Monte Carlo)法や、統計的機械学習の諸手法と関連性が深くなってきている。非常にホットな研究領域である。

3.4 心の社会としての人工知能研究——組織知能と社会物理学

ミンスキー(Marvin Minsky)がSociety of Mind(心の社会)を著して、ニューロンのような単純な素子から、いかにして、人間の「知能」のような複雑な構想が産まれたかを論じたのは、1986年のことである。ここでは、彼は、エージェントという小さな構成要素が集まって知能を作り上げるという思考実験を行っている。²¹⁾これ自体は興味深い議論であるが、彼のモデルは、脳の知能を実現するというよりもむしろ社会問題を取り扱うことに向いている。次章にその内容について述べる。

4. エージェント・ベース・モデリングと社会シミュレーション

社会や組織の問題にシミュレーションを用いる研究は古くから行われている。もっとも古い研究に、Cyert, Marchによる“Behavioral Theory of the Firm”²²⁾がある。その後、混沌とした組織の意思決定行動に関するゴミ箱モデルがCohen等によって提案された。²³⁾また、社会におけるマクロレベルの変数の変化に注目するシステムダイナミクスのようなトップダウンの技法も存在する。これが、地球規模の社会・経済・環境問題を対象とする国際的な研究グループであるローマ・クラブの「成長の限界」²⁴⁾のモデル開発に用いられたことはよく知られている。^{25,26)}

この研究結果によると、21世紀の世界は、人口爆発や資源不足でかなり悲惨な状況になると予測され、未来研究を発展させる原動力となった。エージェントによる社会シミュレーションにもその意味で大きな影響を与えている。

エージェント・ベース・モデリングでは、「エージェント」は、内部状態と意思決定・問題解決能力、ならびに通信機能を備え、主体的に行為するソフトウェアである。このエージェントを複数集めることによって、対象システム

のボトムアップなモデル化を試みる。そしてこのインタラクションに基づく創発的な現象やシナリオを分析しようとする。その特徴は、i) ミクロ的な観点においてエージェントが(個別の)内部状態をもち、自律的に行動・適応し、情報交換と問題解決に携わる点、ii) その結果として対象システムのマクロ的な性質が創発する点、iii) エージェントとエージェントを囲む環境とがマイクロ・マクロリンクを形成し、互いに影響を及ぼしあいながら、システムの状態が変化していく点にある。²⁶⁾

ミクロなインタラクションからマクロな状態が創発するという考え方は、統計物理学を知る人々にはごく自然である。エージェント・ベース・モデルでは、このマクロな状態をミクロな存在であるエージェントが認識し、自らの行動を変化させることが可能である。このように粒子が主体性をもち行動を変える可能性があるという考え方は、エージェント・ベース・モデルの特徴である。

すなわち図2に示すような、エージェント間のマイクロレベルのインタラクションで創発するマクロな現象、ならびに、それがトップダウンにエージェントに影響を与えることになる。たとえば、株式の取引を行う人々をエージェントとみなす。すると、個々の取引というミクロな行動によって、金融市場の価格の変化というマクロな現象が創発することになる。さらに、金融市場の価格というマクロ

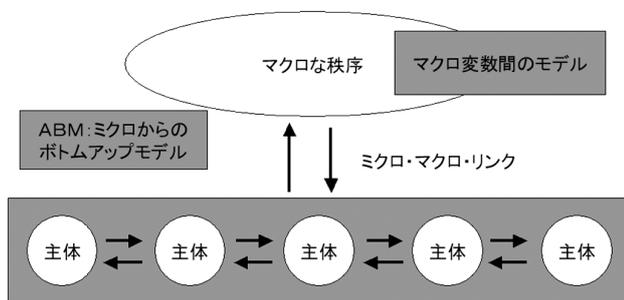


図2 エージェント・ベース・モデル (ABM) の構造。

表1 エージェント・ベース・モデリングから得られた興味深い知見。

- ・ゆとり教育は間違っている
- ・社会的インタラクションからグループリーダーが生まれる
- ・一般にフリーライダーは秩序を乱すが、情報財については別である
- ・知識は共有すべきである
- ・経営学の解説どおりに優良企業はできない
- ・貨幣は信用以外のなものでもない
- ・人間は間違うがカシコイ
- ・取引に強い機械学習エージェントは作れない
- ・規制のない状況において金融市場は乱高下する
- ・リスク管理が金融システムを危くする
- ・牧羊犬でも複雑系は御せる
- ・流行はカオスをもたらす
- ・ABMは社会アンケートを補完することができる
- ・社会ネットワークはマーケティング戦略に大きな影響を与える
- ・ABMとゲームを融合することで新たなビジネス教育が可能となる
- ・ABMで最適な人事政策を見積もることができる
- ・社会規範は行政組織の間接的な関与で整備することができる
- ・マイルレージポイントシステムは集中化する
- ・企業の改善活動と不祥事は、規則を破るという点で同根である
- ・ABMで歴史上の隠れた事実を推測することができる
- ・ABMで考古学上の仮説を生成することができる

な情報が個々のエージェントの意思決定に大きな影響を与える。このように、ミクロな現象とマクロな現象がからみあって非常に複雑な動きをするのが現実の社会である。²⁷⁾ これらのモデリングには、統計力学的な手法も有効であり、経済物理学の領域では、エージェント・ベース・モデリングと統計力学的手法を併用した研究も多く実施されている。

表1に、我々の研究を中心としたエージェント・ベース・モデリングから得られる興味深い現象をまとめる。興味を引くようなキャッチコピーで成果を表現しているが、これらの内容は、様々な学会・研究会で発表したものであり、このような結論を得るには、それなりに多くの仮定が存在している。詳しくは、我々の成果をとりまとめた文献を参照されたい。^{4, 26)}

5. 物理学研究のアプローチと人工知能研究のアプローチの違い

私なりに、まとめた物理学と人工知能のアプローチは、図3のようにまとめられる。物理学では、自然を観測し、現象を計測することで、できるだけ簡潔かつ一般性の高い理論を導く。これには、新しい数学の概念を作ったり、利用したりすることも必要となる。さらに、技術的には新しい測定器を作ったり、利用したりすることも必要となる。こうして作られた理論を現実問題に適用し、新たな観測へとループが繰り返される。物理学では、現実問題は自然現象と同義になると考える。

人工知能では、人間もしくは人間の行動を対象に、それらを観測し、計測することから研究が始まった。その結果、さまざまな手法が開発され、一見、理論的な枠組みが出来上がった。これが、新しい計算機科学の分野を構築するきっかけになり、また、人間や生物を対象とした認知科学・実験心理学の方法をもたらした。そして、技術としての人工知能が、さまざまな現実問題に適用されることとなった。こうしてできたはずの理論は、物理学のそれ(現実問題=自然現象)とは異なり、直接的に個人としての人間に反映されることは少ない。

人工知能の応用をめざすところで、個々の人間というよりは、社会全般との関連が深くなっていくのである。したがって、人工知能の研究においては、理論が直截的に元の研究対象であった人間に帰ることは少なく、むしろ、さまざまな応用領域へと発散していく。

また、人工知能研究においては、工学的な側面からシステムをデザインする姿勢が重要であり、これが自然界の原理原則を解明しようという物理学の態度と異なってくる。図中のXは、一意には決定できない理論構築に必要な要素を示す。現在のところ、私自身Xが具体的に何であるかを明示することはできない。しかし、それは、前章で述べたような、認識論・存在論・進化論・社会論のような(一見関係がなさそうな)理論に相当すると考えている。

一方、Laughlinが著した『物理学の未来』²⁸⁾では、伝統

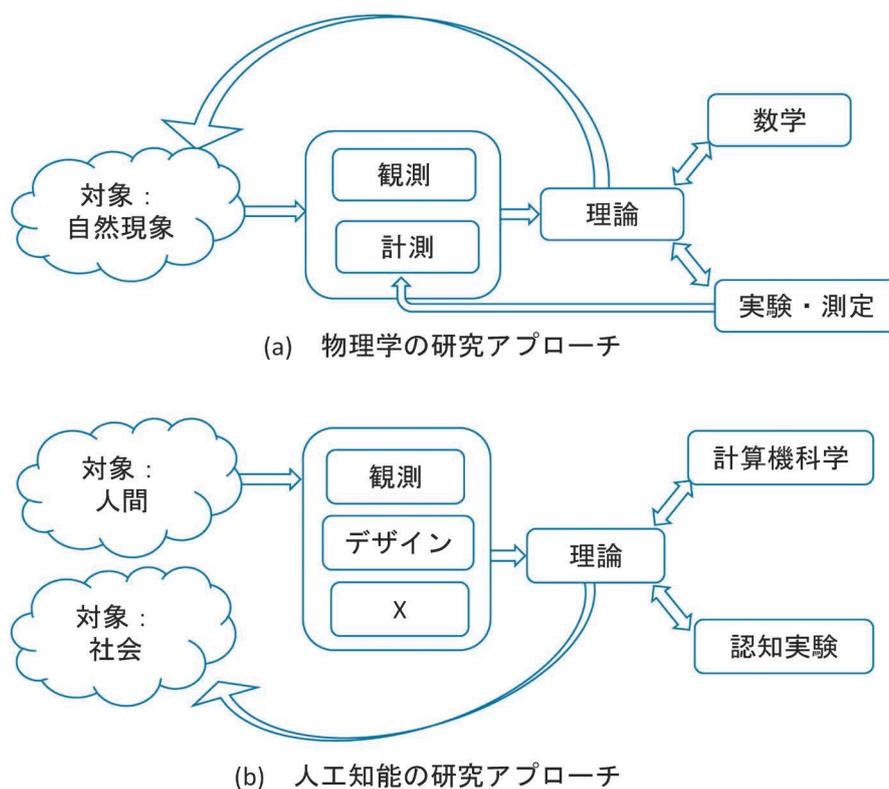


図3 物理学と人工知能の研究アプローチの違い。

的な物理学研究における「要素還元主義」を離れ、自然界における「創発現象」の重要性が主張されている。すなわち、自然は基本にあるひとつの法則によって決定されるのではなく、自己組織化 (Self-Organization) という強力で一般性の高い規則によって規定されていることをさまざまな事例を用いて論じている。このような考え方は私には新鮮であった。物理学には要素還元主義的思考が基本にはあるが、“科学と要素還元主義 (Reductionism) が同義” という考えは、社会的問題を直接に扱う必要性が高くなった現在においては、非現実的である。

また、蔵本由紀は『新しい自然学』²⁹⁾において、非線形科学の説明を中心に据え、要素そのものではなく、要素間の関係性を記述する重要性を指摘している。ここでも、社会的問題を扱う上でのヒントが記されていると思われる。これは、まさに「人口知能」の基本的な考え方であり、もっとも先進的な部分において、少なくとも一部は、物理学と人工知能の両者の思想に類似した点が見られるのは興味深い。

6. おわりに

本解説では、人間と人工物、自然科学と情報科学の境界領域にあるはずの人工知能の思想の変遷を私自身の研究経験と関連付けて解説した。人工知能の研究は、ほぼ10年に1回の棚卸をやってきた。研究のブームが一気に終了し一見不毛な時代が続くのである。そしてこの不毛な時代の地道な努力が次のブームの種を形作る。これは、外部環境の変化、コンテキストの変化によって生じる。これは、物

理学の問題でも人工知能の問題でもない。理学・社会科学・工学の最新の研究成果と、景気動向や政治状況も含む世の中の動向によってきまる。⁵⁾

最近では、研究資金の問題もあって、学問の世界においても、パラダイムの変更もしくは追加が求められている。残念ながら、人工知能学会の解説においては、知能増幅器 (Intelligence Amplifier) としての新しい人工知能理論の適用の解説は有用ではあったが、学問領域の全体を俯瞰する議論は不足していたように感ずる。今後、人工知能研究や物理学の研究から、どんな新しい学問領域が生まれてくるのだろうか？

いずれにせよ、両分野の交流は必要不可欠である。物理学からは、高度な計算機利用技術としての人工知能の利用を考えるのは当然であろう。従来は高度な計測技術が物理学の理論形成に役立ったように、一方、計測技術の進歩は、図3に示したように物理学によって支えられてきた。それと同様に、物理学が人工知能に与える影響は、厳密なモデル作りとそれを支えることが可能な理論的裏付けである。文献1に紹介されているように、経済物理学にみられるような精緻なモデル化の方法は社会問題の性質を明確にするのに有用である。

さらに、それに加えて、従来の物理学研究にみられる対象物の本質を知るといった分析的な立場を超えて、社会システムを含む大きくて複雑なシステムをデザインするという合成的な立場から対象物について考察するという工学的なアプローチもますます重要となると考えられる。²⁰⁾

参考文献

- 1) 人工知能 **33**, 391 (2018)—特集:「物理学とAI」.
- 2) 朝永振一郎, 『物理学とは何だろうか(上・下)』(岩波新書 85 巻, 86 巻, 1979).
- 3) アインシュタイン, インフェルノ著, 石原 純訳, 『物理学はいかに創られたか(上・下)』(岩波新書 R14 巻, R15 巻, 1963).
- 4) 寺野隆雄, 人工知能 **31**, 287 (2016)—研究のネットワークがつかぬとき.
- 5) 寺野隆雄, 経営システム **27**, 207 (2018)—人工知能技術を使いこなすには.
- 6) J. Markoff, *Machines of Loving Grace: The Quest for Common Ground Between Humans and Robots*. (Ecco, 2015); 瀧口範子訳, 『人工知能は敵か味方か』(日経 BP, 2017).
- 7) 人工知能学会編, 『人工知能学大事典』(オーム社, 2017).
- 8) J. McCarthy et al., A Proposal for the Dartmouth Summer research Project on Artificial Intelligence (1955). <http://www-formal.stanford.edu/jmc/history/dartmouth/dartmouth.html>
- 9) E. A. Feigenbaum, J. Feldman, eds., *Computers and Thought* (AAA Press, 2012); 阿部 統, 横山 保記, 『コンピュータと思考』(好學社, 1969).
- 10) 寺野隆雄, 計測と制御 **42**, 458 (2003)—エキスパートシステムはどうなったか?(特集:人工知能の現在と将来).
- 11) 寺野隆雄, 計測と制御 **12**, 315 (2002)—データマイニングの展望(ミニ特集:データマイニングの最前線).
- 12) D. R. Hofstadter, *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid* (Basic Books, 1979); 野崎昭弘, はやし・はじめ, 柳瀬尚紀訳, 『ゲーデル・エッシャー・バッハ—あるいは不思議の環—』(白洋舎, 1985).
- 13) D. R. Hofstadter, *I am a Strange Loop* (Basic Books, 2007); 片桐恭弘, 寺西のぶ子訳, 『私は不思議の環』(白揚社, 2018).
- 14) D. C. Dennett, *From Bacteria to Bach and Back: The Evolution of Minds* (W. W. Norton & Co Inc., 2017); 木島泰三訳, 『心の進化を解明する—バクテリアからバッハへ—』(青土社, 2018).
- 15) S. Russel and P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (2nd Edition) (Prentice Hall, 2002); 古川康一監訳, 『エージェントアプローチ 人工知能 第2版』(オーム社, 2008).
- 16) C. M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning* (Springer, 2010); 元田 浩監訳, 『パターン認識と機械学習(上・下)』(丸善出版, 2012).
- 17) I. Goodfellow, Yoshua Bengio, and Aaron Courville, *Deep Learning* (MIT Press, 2016); 岩澤有祐他監訳, 『深層学習』(KADOKAWA, 2018).
- 18) 甘利俊一, 人工知能 **32**, 827 (2017)—もうちょっとだよな—ディープラーニング.
- 19) D. Lenat and R. V. Guha, *Building Large Knowledge-Based Systems: Representation and Inference in the Cyc Project* (Addison-Wesley, 1990).
- 20) 寺野隆雄, 計測と制御 **55**, 692 (2016)—異分野交流によるイノベーションを進化計算で考える(特集:スマーターワールド実現のための新たなシステムズアプローチ).
- 21) M. L. Minsky, *The Society of Mind* (Simon & Schuster, 1986); 安西裕一郎訳, 『心の社会』(産業図書, 2008).
- 22) R. M. Cyert and J. G. March, *A Behavioral Theory of the Firm* (Prentice Hall, 1963); 松田武彦, 井上恒夫訳, 『企業の行動理論』(ダイヤモンド社, 1967).
- 23) M. D. Cohen, J. G. March, and J. P. Olsen, *Adm. Sci. Q.* **17**, 1 (1972)—A Garbage Can Model of Organizational Choice.
- 24) D. H. Meadows, *Limits to Growth* (University Books, 1972); ドネラ・H・メドウズ, 『成長の限界—ローマ・クラブ人類の危機レポート』(ダイヤモンド社, 1972).
- 25) 寺野隆雄, 倉橋節也, 人工知能学会誌 **15**, 966 (2000)—エージェントシミュレーションと人工社会・人工経済.
- 26) 寺野隆雄, 人工知能学会誌 **18**, 710 (2003)—エージェント・ベース・モデリング: KISS 原理を超えて.
- 27) R. Axelrod, *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration* (Princeton Univ. Press, 1997); 寺野隆雄監訳, 『対立と協調の科学—エージェント・ベース・モデルによる複雑系の解明—』(ダイヤモンド社, 2003).
- 28) R. B. Laughlin, *A Different Universe—Reinventing Physics from the Bottom Down—* (Basic Books, 2005); 水谷 淳訳, 『物理学の未来』(日経 BP, 2006).
- 29) 蔵本由紀, 『新しい自然学—非線形科学の可能性—』(ちくま学芸文庫, 2016).

著者紹介

寺野隆雄氏: 1978年東京大学工学系研究科情報工学修士課程修了。1978年～1989年電力中央研究所勤務。1990年～2004年筑波大学大学院経営システム科学専攻。2004年～2018年東京工業大学大学教授。工学博士。2018年より、産業技術研究所、ならびに千葉商科大学、東京工業大学・筑波大学名誉教授。社会シミュレーション、サービス科学、知識システムなどに興味をもつ。人工知能学会、経営情報学会、社会情報学会、情報処理学会、計測自動制御学会、日本OR学会、プロジェクトマネジメント学会、進化経済学会、日本シミュレーション&ゲーミング学会、横断型基幹科学技術研究団体連合などの理事、学会誌・論文誌編集委員(長)、研究会主査を歴任。IEEE会員、PAAA代表。

(2018年4月26日原稿受付)

Survey of Artificial Intelligence Research, Past, Present, and Future—From Artificial Intelligence to Population Intelligence

Takao Terano

abstract: This article describes the basic concepts of artificial intelligence (AI) and discusses the relationship between physical and AI literature. First, the author introduces the brief history of artificial intelligence research on the first era in 1950-th, the second era in 1980-th, and the third-era, currently developing. Second, he explains basic concepts of AI from epistemological, ontological, evolutionary, and agent society view points. Third, the agent-based modeling approach is introduced with results of his recent reports. Forth, the differences of physical and artificial sciences are discussed. The article concludes that the emergence of new scientific disciplines comes from the interaction of boundary of existing fields, thus, the relationship between physical sciences and AI will play important roles in the future.