

特集記事・1

鉄鋼業におけるAI・IoT技術の最前線

第三次人工知能ブームを超えて

— 鉄鋼業におけるシステム化を考える —

Beyond the Third Artificial Intelligence Era
—Toward Advanced Systems Technology in the Steel Industry—

寺野隆雄

Takao Terano

産業技術総合研究所 招聘研究員
東京工業大学 名誉教授

1 はじめに

私が、鉄鋼協会において計測・制御・システム部会のメンバーとして活動を始めてから、ほぼ20年が経過している。手元の資料によると、「大規模複雑系へのシステムズ・アプローチ」¹⁾の報告書に私が著した報告記事がある。この時の「鉄鋼生産・運用・物流計画問題のモデリングと最適化研究会」(1998年度から2001年度)が、最初であったと記憶している。この研究会以前から鉄鋼会社では、ORの最適化手法を含む種々のシステム化技術を活用して、業務の高度化を進めていた。この事情については、技術的には鉄鋼便覧²⁾に詳しいが、中心となる技術シーズは、今日まで以下のように変化してきた。メタヒューリスティックス・数理計画、サプライチェーンマネジメント、ナレッジマネジメント、グリッドコンピューティング、サービスサイエンス、クラウドコンピューティング、WEBインテリジェンス。

一方、鉄鋼業のニーズの変化は次のようにまとめられる：大規模一貫最適化、異常・故障及び緊急オーダー対応再スケジューリング、複数の評価項目に対する複雑性の取り扱い、2007年問題に伴う技術伝承・人材育成教育、少数熟練者の活用と非熟練者の熟練化促進、人とシステムの信頼構築、環境負荷コストを含めた生産体制の総合評価。

このように、システム技術に関しては、2000年以前から鉄鋼業全般にわたっていろいろな試みがなされていた。しかし、これらの報告には、人工知能という用語は見られない。我が国では、1980年代にピークを迎えて第二次人工知能ブームの時には、各社で、高炉操業支援をはじめとするエキスパートシステムの開発が盛んになされていたにもかかわらずである。我々は、すでに人工知能の技術に一度は注目し、それを捨て去っているのである。このような経緯を踏まえて、

本稿では、現在の第三次人工知能ブームについて論ずる。なお、本稿の内容は、これまで私が著した解説記事³⁻⁵⁾の内容に基づいている。

本稿の構成は以下のとおりである。まず、人工知能の三回のブームの特徴を振り返りつつ、この基本的な考え方を説明する。ついで、最近の人工知能技術の特性を四種類に分類し、我々の研究例を引用しながら述べる。ついで、システムの高高度化をはかるという観点から、現実の問題を実用システムとして実現するための方法論について論ずる。最後に、結論と課題について述べる。

2 人工知能の3回の盛衰

人工知能の研究は、ダートマス会議に始まり、第一次、第二次のブームとその後に訪れた凋落を経て、現在、第三次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⁾を挙げる。以下では、1956年に開催されたダートマス会議の提案書⁸⁾を紹介し、その後に起こった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

私が人工知能の概念を知ったのは、学部学生の頃である。しかし、1970年代半ばのころは、計算機科学、数理工学、システム工学などの複数の学問領域で、人工知能はも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。以下で述べるように、もともと人工知能の研究は、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。

人工知能研究が開始されたころには、「知能」の研究の難しさは理解されていなかった。また、「知能」の明確な定義もなかった。そうした中で、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化したところが、人工知能研究の非常に興味深い性質である。

AIの研究の中で、役にたちそうところが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とブームが去るというサイクルが繰り返される。鉄鋼業のシステム化における人工知能の位置づけにも、これと同様な傾向がみられる。

2.2 ダートマス会議と第一次の人工知能ブーム

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、今でも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、機械に知能を持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 (Neuron Net) (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素朴で、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てサミュエル (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わが国でも陽の目をみるといいと思うのだが…。

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。

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である。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、当時の計算機的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、第一次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次の人工知能ブーム

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ところであった。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た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、ユーザとしての生産企業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、第一次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。これにはふた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たつものである。

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てシステムである。」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は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、独立性の強いふた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。

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、当時の計算機的能力が低かったことによる。そして、このブームは、第一次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、せつ

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。これは、当時の鉄鋼各社の高炉操業支援エキスパートシステムにみられる。エキスパートシステムが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。技術の未熟さを顧みずに、システムの実現を急ぎすぎたのである⁴⁾。

2.4 機械学習・ニューラルネットワークと第三次の人工知能ブーム

第二次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世紀にはいり、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、第三次の人工知能が訪れる。

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。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、2018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試みる。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 物事を認識する手法としての人工知能

3.1.1 認識論の立場から

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。第二次人工知能ブームのときには、この手段としては、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、第二次人工知能ブームは終焉した。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。

一方、コネクションイズム (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が課題となる。この能力が、コンピュータの性能向上に伴って、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。

また、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。

3.1.2 深層学習を利用したニュース記事の分析

最近の我々の研究の中で、深層学習を利用したものに、金融分野のニュース記事と株価との関連性を分析した例がある。ニュース記事のテキスト情報を用いることで、これまで数値情報のみでは計測が困難であった情報と資産価格変動との関連性の解明に貢献することが期待されている。また、金融機関やニュース配信会社においてもテキスト分析を用いたサービスが提供され始めている。そこで、ニュースのテキスト情報に焦点をあて、金融テキストの有効な分析手法及びテキスト情報を用いた株式価格分析への応用可能性について研究を行った。

この研究では、ニュース配信会社から日々配信されるロイターニュースのテキスト情報を構文解析した後に得られる単語ベクトルを、深層学習法のひとつである Recursive Neural Tensor Network を用いて学習し、ニュースごとのスコアを算出する。これに基づいて、各ニュース情報を指標化し、これと株価情報との関連性を分析する。分析の結果、得られた指標を利用することで、ニュース記事のポジティブ・ネガティブな情報の種類によって、株価変動への影響を精度よく予測することが可能となる (Fig.1)。

我々のグループでは、大量の良質なデータが得られないこと、機械学習に膨大な計算時間を要することが理由で、深層学習を研究に利用することは少ないが、この例では、ニュース記事、株価データの入手が可能であったため、研究を実施することが可能であった。

3.2 大規模情報を扱う手法としての人工知能

3.2.1 存在論の立場から

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

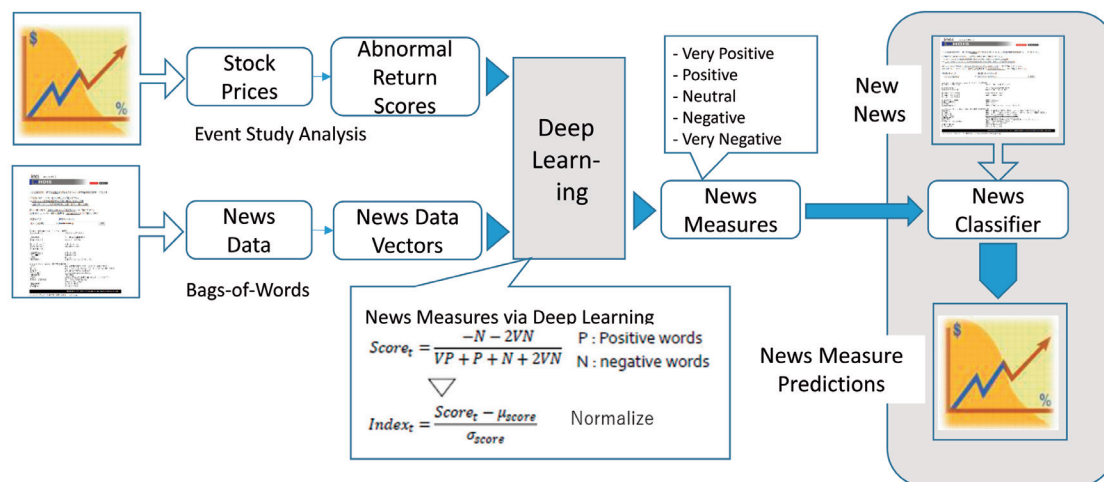


Fig.1 Financial News Analysis by Deep Learning

表わ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、第二次人工知能ブームの終わりに、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¹⁸⁾。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、中央集権的な手法では、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。

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持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持ち、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ともなって、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。

3.2.2 オンライン書店むけ書籍推薦システムの事例

書籍を対象にリコメンド・サービスを提供する場合には、典型的な手法であるコンテンツ方式と協調フィルタリング方式のどちらも適用可能である。ただし、それぞれの手法の欠点から、適用する場合において次の点が懸念される。

- ・コンテンツ分析方式では、リコメンドされる書籍が、顧客が過去に購入した書籍に類似したものばかりになる可能性

が高い。

- ・協調フィルタリング方式では、書籍販売では対象とするコンテンツ数が膨大であるため、リコメンド・サービスの対象となる顧客数も相当な規模でなければ、質の高いサービスが期待できない。

我々が開発したシステム TwinFinder では、コンテンツ分析方式を用いるが、リコメンド情報の幅を広げる工夫をすることにより、コンテンツ分析方式の欠点を解消することを狙う。書籍販売のような対象コンテンツ数が非常に大きな業種において、顧客規模が小さい場合にも、質の高いリコメンド・サービスが提供可能になる。

一般的に、テキスト・ドキュメントを対象としたコンテンツ分析型リコメンデーションでは、顧客興味の表現である顧客プロフィールやコンテンツの特徴表現として、キーワード・ベクトルが用いられる。TwinFinder は、顧客の購買履歴と書籍情報を用いて、顧客プロフィールのキーワード・ベクトルを生成する。その後、顧客プロフィールと書籍特徴の類似度を計算し、類似度が高い書籍をリコメンドする (Fig.2)。特に、TwinFinder では、顧客数が、書籍種類に対して、比較的少数な場合でも、うまく動作するように設計しており、膨大な書籍情報のインデックス化は、バッチ処理で行い、購買時の顧客の検索情報と在庫の書籍情報とのマッチング処理は、リアルタイムで計算できるようにしている。

3.3 探索手法としての人工知能

3.3.1 進化計算の考え方

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嘴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改善するという手続きの繰り返しでより良い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¹⁹⁾。

もし、与えられた問題が構造を持たないものならば、それ

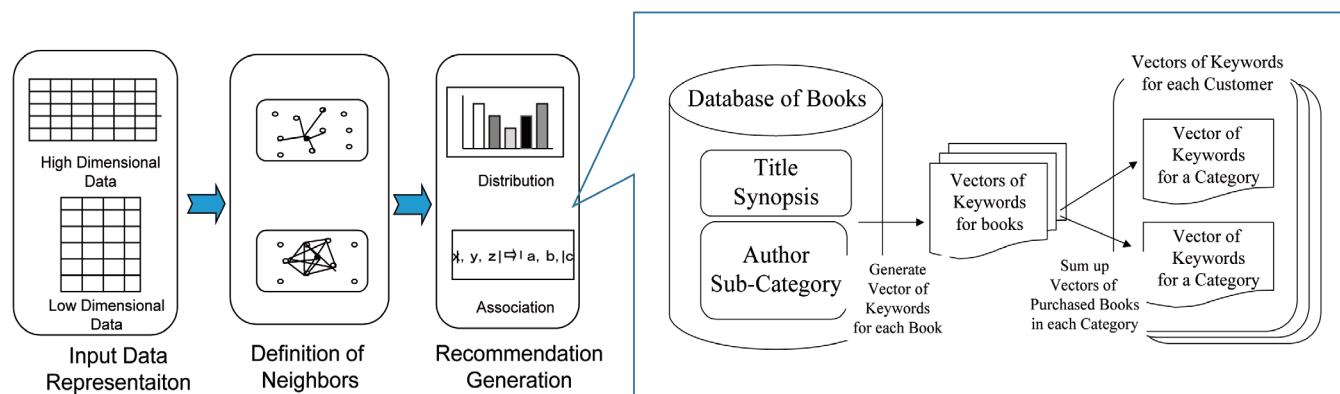


Fig.2 Recommendation System for a Book Store

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。

最近では、遺伝的アルゴリズムを、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する。そして、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。これらは、統計的機械学習の諸手法と関連性が深く数多くの研究がなされている。

3.3.2 進化計算と機械学習を利用したプラント運転知識の獲得

化学プラントの制御システムは、制御理論に基づいて設計され、適切なプラントモデルを想定した操業がなされる。その操作システムは近年では、ビジュアル・プログラミングの手法で部品を接続する形式で、プログラム化される。こうして実現した制御システムでは、通常時には問題は起こらず、プラント操作員の作業も難しくはない。しかし、プラントに異常事態が発生した場合や、操業状態が不安定になった場合は、ベテラン操作員の作業が重要な役割を果たす。このような状況は、事前に設計した制御プログラムでは尽くすことは不可能である。

この問題について、我々が採用した方法は、プラントモデルを利用した時系列データからのデータマイニング手法と、人工知能における機械学習の手法である。学習手法には、学習分類システムを用いる。どちらも、ヒューリスティクスを適用するのに適切な接近法である。

学習分類システムとは、1) 問題解決器として、If-Then

ルール(これを分類子という)を用いるプロダクションシステム、2) 学習機能として強化学習、3) 分類子群を最適化する遺伝的アルゴリズム、4) 学習機能の動きを制御するコントロール機能の4つを利用する複合的な学習システムである。

我々の実現したシステムを適用すると、例えば、時系列データから、ルール形式の知識が得られる。また、ルール獲得方法に工夫を加えることで、プラント異常時の運転員の操作を反映した例外ルールも自動的に得ることが可能で、これにより、設計当初に想定したプラント操作手順を順次改良し、より複雑かつ柔軟な運転支援システムとして実現することができるようになっている (Fig.3)。

3.4 心の社会としての人工知能

3.4.1 エージェントベースモデリング

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²⁰⁾。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や分散処理システムの問題を取り扱うことに向いている。

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、主体的に行為するに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)内部状態を持ち、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

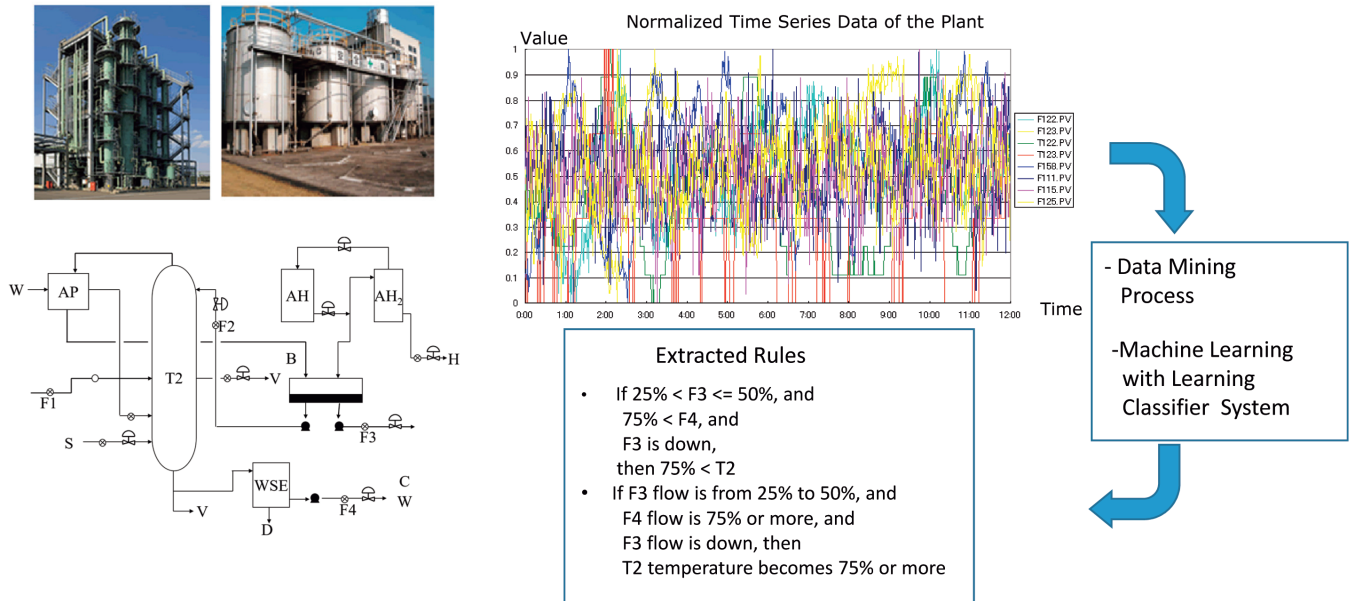


Fig.3 Extracting Plant Operation Knowledge through Learning Classifier System

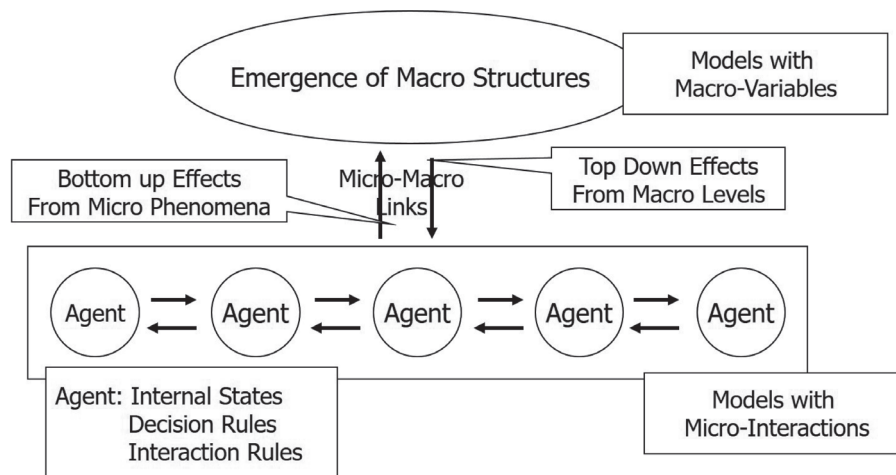


Fig.4 Framework of Agent-Based Modeling

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ながら、システムの状態が変化していく点にある^{25,26)}。

Fig.4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、株式の取引を行うに人々をエージェントとみなす。すると、個々の取引というマイ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、マイ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。

3.4.2 エージェントモデルと装着型センサを利用した組み立て工程の分析

近年、センサや計算機の高性能化や低価格化により大量のデータをリアルタイムに収集し解析することが可能になってきている。そこで本研究では、セル生産ラインの作業者を対象とした、装着型センサを用いて動作データを収集し分析することで、リアルタイムに生産進捗と作業履歴を計測するシステムを提案した。さらに、このデータをエージェントシミュレーションと同期させることで、生産管理の高度化に資

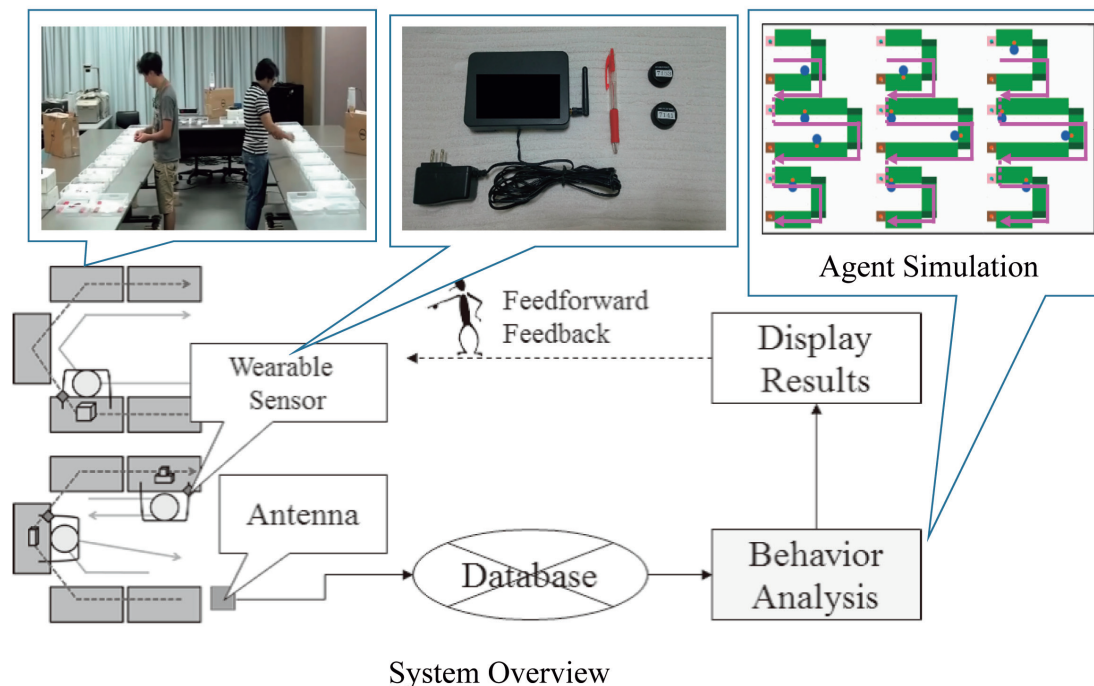


Fig.5 Management System for Sell-Type Production Line with Sensors and ABS

するシステムを実現した。セル生産ラインは、作業者のスキルによって生産効率が大きく変動するが、フレキシブルな対応が可能のため多品種少量生産に適した生産方式である。本システムは作業者がセンサを着用するため、設備を使用しないようなセル生産ラインでも生産進捗や作業履歴の計測が可能である。さらに、安価に購入できるIoT機器を利用することでコストの増加も抑えられる利点がある。

このシステムは、ウェアラブルセンサから得られる Beacon の電波受信強度データから作業者の位置を分析して製品1個単位の生産時間を計測する機能と、3軸加速度データを分析して作業者の移動・停止の動作推定から作業履歴の1つである異常動作の有無を計測する機能を実装することで実現される。本研究ではさらに、システムの実用性を高めるために、Beacon の電波受信強度データと加速度データそれぞれに対して効果的なデータ前処理と分析手法を組み合わせる。これによって、実際のセル生産ラインで得たデータを基に分析することができる (Fig.5)。

4 システム化による問題解決に関する議論

前章までの人工知能技術に関する考察に基づいて、改めて、問題解決とそのシステム化という観点から考察する⁵⁾。問題とは、理想と現実との差異のことであり、理想と現実とが一致すれば問題は解決される。そのためには、さまざまな

理論や、手法、知識が必要となる。従来、工学はこのような問題解決に必要な知識を顕在化し、誰でもが使えるような形に定式化することを目標に進歩してきた。

そこで、工学の扱うべき問題を、構造 (Structure) と定義 (Definition) という2つの軸で整理してみよう。世の中に存在する問題は、通常、構造が不明確で定義が明確 (Ill-Structured & Ill-Defined) でないものである。問題解決システムを社会実装するためには、これを構造も定義も明確なもの (Well-Structured & Well-Defined) にしなければならない。たとえば、自動運転システムを社会実装するには、さまざまな工夫を凝らす必要がある。これには、一般的に2つのやり方が考えられる。悪構造な問題を良定義な問題に変換してから社会実装にもっていくやり方と、悪定義な問題を良定義な問題に変換してから社会実装にもっていくやり方である。

前者は、学術的な接近法である。たとえば、よくわからない二人間の争いの問題を定義が明確な囲碁・将棋のゲームに変換し、これをコンピュータシステムとして実装する方法がこれである。このような問題では、解きたい問題の定義は明確ではあるものの、どのように解けばよいのかわからなかったために、従来は、人工知能の問題として扱われていた。ここで対象となる「知能」とは、アルゴリズムとしてどれだけ効率的に実装できるかという点に存在する。多くの数理計画・整数計画に定式化されるオペレーションズリサーチ (OR) の問題はこの範疇にはいる。そしてこのような問題は、アルゴリズムをうまく設計するという意味で情報科学的接近が中

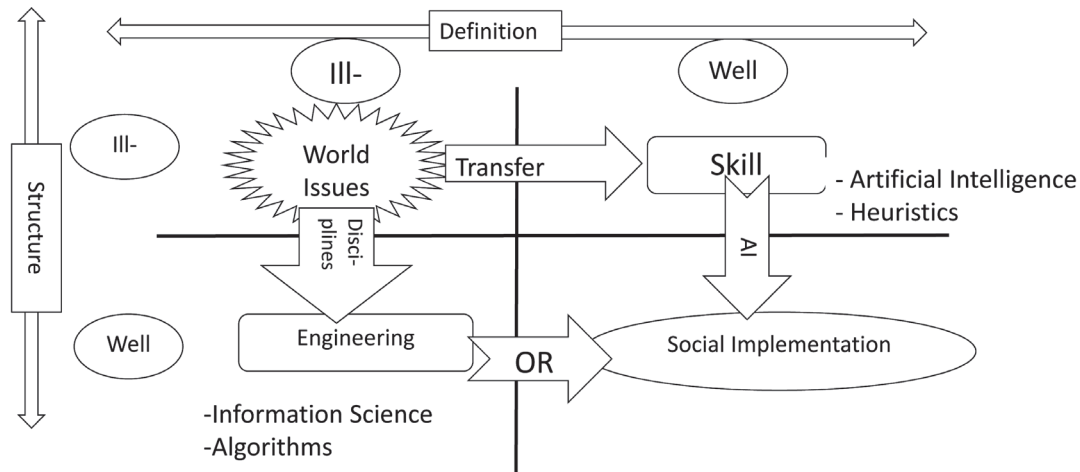


Fig.6 Implementing Socio-Technical Systems in Two Approaches

心となる。

それに対して、後者は、「わざ」として伝承されるような問題に対する接近法である。たとえば、自動車の運転がうまいとか、プラント操作がベテランでなければできないといった問題がこれに相当する。エキスパートシステムをはじめとする第二次の人工知能ブームの時は、この解決に、専門家の経験的知識を、直接、コンピュータシステム上に実現しようとした。これは、人間の知的活動をコンピュータに実装するという点において、まさに、人工知能の適用だったわけである。

こうして考えると、現在の（機械）学習を中心とした人工知能の手法も情報科学的な方法と人工知能的な方法とに分類できる。情報科学的な方法は統計学から発展した統計的機械学習手法であり、人工知能的な方法は深層学習を用いたニューラルコンピューティングの方法である。前者は理論的に明快であり、どこに限界があるのか比較的明確であるのに対して、後者は、様々な分野ですばらしい成果を出しているにもかかわらず、何故うまくいくのか不明確であるという性質を持つ。

実は、情報科学的な接近法と発見的手法による接近法との差異はさほど明確なものではない。機械学習の概念が情報科学・工学の観点から明確に定式化されたのは、最近であり、アルファ碁が発表されるまでは、囲碁のプログラム化には専門家の知識が不可欠であると思われていたのであるから。

以上の考察はFig.6のようにまとめられる。

「知能」の問題に立ち返ると、社会実装・システム化に必要な問題解決に必要な情報は、新しい手法や定式化の方法が考えだされるたびにその性質が変化していく。以前は、プログラム言語のコンパイラが「知的」な作業を援ける「自動プログラム」と考えられていたのである。すなわち、「知能」を扱う人工知能の方法は、時代とともに変化していき、原理が明

らかになるごとに、発見的な方法から情報科学へと変わってきたのである。

5 おわりに

本解説では、鉄鋼業におけるシステム技術を高度化するという観点から、人工知能理論・技術のこれまでの進歩を述べ、最近の人工知能技術の動向と関連する我々の研究例を紹介した。さらに、与えられた問題を定式化し、システム化する上で、参考となる方法論について考察した。はじめに述べたように、鉄鋼業においては、ビジネス環境、自然環境の急速な変化に伴って、より柔軟で高度なシステムの必要性は今後もますます重要になると考えられる。そこでは、人間と機械が協調し、ともに成長しあうような方法論が必要である。人工知能技術だけの問題ではない。

2007年前後には、鉄鋼業でもベテランが大勢退職するという状況がみられた。この状況は、定年延長などの非技術的な手段でなんとか乗り切れたものと考えている。しかしながら、次回はその余裕はない。ここで、意外に参考となるのが我が国で伝統的に行われてきた暗黙的な知識の伝承方法である。たとえば、伊勢神宮などで行われている式年遷宮の考え方がその典型例である。25年という周期をもって、本殿を既存のものそっくり建築しなおすという方法は、ベテランが新人にノウハウを伝え、新人が育つのを待ってそれが繰り返されるすばらしい制度である。鉄鋼業の中でもたとえば、四半世紀を単位にすべてのシステムを再構築するというやり方を考えてみてもいいのかもしれないと思う次第である。

参考文献

- 1) 鉄鋼生産・運用・物流計画問題のモデリングと最適化－大規模複雑系へのシステムズ・アプローチ－, 日本鉄鋼協会計測・制御・システム工学部会編, (2002)
- 2) 鉄鋼便覧-第5版-, 第5巻, 日本鉄鋼協会, (2016)
- 3) 寺野隆雄: 人工知能研究の過去・現在・未来-人工知能から人口知能へ, 物理学会誌, (2018), 掲載予定.
- 4) 寺野隆雄: 人工知能, 31 (2016) 2, 287.
- 5) 寺野隆雄: 経営システム, 27 (2018) 4, 207.
- 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) 人工知能学大事典, 人工知能学会, オーム社, (2017)
- 8) J.McCarthy, M.L.Minsky, N.Rochester and C.E.Shannon: A Proposal for the Dartmouth Summer research Project on Artificial Intelligence, (1955), <http://www-formal.stanford.edu/jmc/history/dartmouth/dartmouth.html>
- 9) Computers and Thought, ed. by E.A.Feigenbaum and J.Feldman, (2012), 阿部統, 横山保 (訳): コンピュータと思考. 好学社, (1969)
- 10) 寺野隆雄: 計測と制御 (特集: 人工知能の現在と将来), 42 (2003) 6, 458.
- 11) 寺野隆雄: 計測と制御 (ミニ特集: データマイニングの最前線), 12 (2002) 5, 315.
- 12) D.R.Hofstadter: Godel, Ecsher, 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－, 白揚社, (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, (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, Y.Bengio and A.Courville: Deep Learning, MIT Press, (2016), 岩澤有祐 他 (監修): 深層学習, KADOKAWA, (2018)
- 18) D.Lenat and R. V. Guha: Building Large Knowledge-Based Systems: Representation and Inference in the Cyc Project, Addison-Wesley, (1990)
- 19) 寺野隆雄: 計測と制御: 特集: スマートワールド実現のための新たなシステムズアプローチ, 55 (2016) 8, 692,
- 20) M.Minsky: The Society of Mind. Simon & Schueter, (1986), 安西裕一郎 (訳): 心の社会, 産業図書, (2008)
- 21) 五島圭一, 高橋大志: ニュースと株価に関する実証分析－ディープラーニングによるニュース記事の評判分析－, 証券アナリストジャーナル, 54 (2016) 3, 76.
- 22) 寺野隆雄: 情報処理, 44 (2003) 7, 696.
- 23) S.Kurahashi and T.Terano: Learning Classifier Systems - 10th International Workshop, Iwcls 2006 and 11th International Workshop, Iwcls 2007-, ed. by J.Bacardit et al., Springer LNCS 4998, (2008), 269.
- 24) M.Kitazawa, S.Takahashi, T.Takahashi, A.Yoshikawa and T.Terano: SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration. 10. 536-543. 10.9746/jcmsi.10.536, (2017)
- 25) 寺野隆雄, 倉橋節也: 人工知能学会誌, 15 (2000) 6, 966.
- 26) 寺野隆雄: 人工知能学会誌, 18 (2003) 6, 710.
- 27) R.R.Axelrod: The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration. Princeton University 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)

(2018年10月15日受付)