

## 2.1.3 エージェント技術

### (1) 研究開発領域の定義

自ら判断し行動する主体<sup>1)</sup>をコンピューターシステムとして実現したものをエージェントと呼ぶ。広い意味では人工知能 (AI) そのものであるが、特に自律性・自発性・社会性・反射性といった特性がエージェントの特徴として取り上げられる。すなわち、「自分自身の動作の目標を設定して動作したり (自律性、自発性)、他のエージェントと協力して組織を構成して問題解決を実行したり (社会性)、種々の変化や変動を察知して適応的に動作したり (反射性) する処理体<sup>2)</sup>」がエージェントとみなされる。その自律的メカニズム (自律エージェント)、複数主体の協調 (マルチエージェントシステム)、人間とのインタラクション (インターフェースエージェント)、社会的活動・現象のシミュレーション (マルチエージェントシミュレーション) などを実現しようとするのが、本研究開発領域である。

エージェントの定義・特徴		政策的課題	
<ul style="list-style-type: none"> <li>● エージェントは自ら判断し行動する主体をコンピューターシステムとして実現したもの</li> <li>● 自分自身の動作の目標を設定して動作したり(自律性、自発性)、他のエージェントと協力して組織を構成して問題解決を実行したり(社会性)、種々の変化や変動を察知して適応的に動作したり(反射性)する特徴を持つ</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 大規模コンピューティング基盤・データ基盤の整備・強化</li> <li>● 産学連携：実社会・実用現場でのデータ取得・検証</li> <li>● さまざまな分野の学際的な研究</li> <li>● マルチエージェント、対話エージェント、HAIの間の連携</li> </ul>	
	マルチエージェントシステムおよびシミュレーション	対話エージェント	ヒューマンエージェントインタラクション (HAI)
領域の意義	<ul style="list-style-type: none"> <li>● さまざまな社会活動・現象のモデル化とそれを用いたシミュレーション・予測</li> <li>● それを通して、社会活動・現象のより正確な理解や制度設計・意思決定への活用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 普段使っている言葉(自然言語)でコンピューターに指示や意図を伝えられる</li> <li>● ハンズフリー・アイズフリーで使える</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 外見や応答の仕方も含めて、ユーザーそれぞれが心理的・認知的に受け入れやすいインターフェースエージェント設計</li> <li>● 自然性・親密性・効率性等の向上</li> </ul>
研究開発の動向	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 1980年代は分散人工知能、1990年代にマルチエージェント、2000年代は経済パラダイム志向、2010年代は社会実装志向(電子商取引、電力・交通・災害対策等のシミュレーション)</li> <li>● マルチエージェントシステムの合意形成のための交渉と協調：深層学習を用いた自動メカニズムデザイン、仲介均衡、自動交渉、不完全情報ゲーム、セキュリティゲーム等</li> <li>● マルチエージェント深層強化学習・逆強化学習</li> <li>● マルチエージェント社会シミュレーション</li> <li>● トップランク国際会議としてAAMAS、コンペティションANAC、国内ではJAWS等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● タスク指向型対話から非タスク指向対話(雑談)へ、言語・音声のみでなくマルチモーダル対話へと広がり</li> <li>● パイプライン構成から深層学習ベース大規模言語モデルの対話エージェントへ：Google Meena、Meta Blender、OpenAI ChatGPT</li> <li>● SIGDIAL、ICMI等の国際会議のほか、コンペティションではAlexa Prize、日本発の対話ロボットコンペティションや対話システムライブコンペティションも</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 人間の心理・認知、自然言語だけでなくエージェントの外見・非言語情報まで総合的なインタラクションに着目した日本発の研究領域</li> <li>● 国内でHAIシンポジウム、日本発の国際会議HAI</li> <li>● 仮想エージェント、ロボット、人間同士のコミュニケーションを研究</li> <li>● HAI設計論：エージェントのデザイン、擬人化と適応ギャップ、メディアの等式、ナッジとブースト、意図スタンス</li> </ul>
科学技術的課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 人間の判断・行動のモデル化の限界</li> <li>● 将来予測の精度よりもWhat-IF分析による起こり得る問題に対する事前対策を重視</li> <li>● 深層強化学習・逆強化学習のマルチエージェント・多目的最適化問題へ適用拡大</li> <li>● 実社会におけるさまざまな課題解決・価値創造</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● タスク指向型対話：多様な話題や不定形タスクへの対応</li> <li>● 非タスク指向型対話：話題共有から情報共有・価値観共有した対話へ</li> <li>● マルチモーダル対話データセット構築</li> <li>● 大規模言語モデルベースの発展</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 受け止め方の個人差を吸収する設計方法論・評価方法</li> <li>● キラーアプリケーションの探索</li> <li>● 人間・エージェント間の信頼関係確立</li> <li>● HAIの知見をマルチエージェントシミュレーションや対話エージェントに展開</li> </ul>

図 2-1-5 領域俯瞰：エージェント技術

### (2) キーワード

自律エージェント、マルチエージェントシステム、マルチエージェントシミュレーション、インターフェースエージェント、ヒューマンエージェントインタラクション、対話エージェント、対話システム、分散人工知能

### (3) 研究開発領域の概要

#### [本領域の意義]

「2.1.1 知覚・運動系のAI技術」と「2.1.2 言語・知識系のAI技術」が、「見る」「聴く」「考える」「話す」「動かす」「学ぶ」といった、一人一人の人間の知能が持つある側面を実現することに重点を置いているのに対して、本節の「エージェント技術」は、自律的に行動するAIをベースとして、それが他者 (他のAIや人間) や社会・環境とインタラクションするという側面にアプローチしている。それによって、例えば、以下のようなことを期

待できる。

複数のエージェントが相互にインタラクションするマルチエージェントシステムの枠組みを用いて、さまざまな社会活動・現象をモデル化することができる。そして、そのモデルを用いたシミュレーションを通して、起こり得ることを予測したり、モデルの妥当性を検証したりすることで、そのモデルが対象とする社会活動・現象に対するより正確な理解や意思決定への活用が可能になる。昨今、機械学習技術を用いたビッグデータ解析が予測や意思決定に盛んに活用されるようになったが、社会活動・現象のような複雑な振る舞いをする対象に対しては限界がある。その原因としてマイクロ・マクロループの存在が指摘されている<sup>3)</sup>。社会活動・現象におけるマイクロ・マクロループとは、個人の行動の集積がマクロなレベルの社会全体の動きを生成し、さらに、社会全体の動きがマイクロなレベルの個人の行動を変化させていくような循環を意味する。これが存在するため、ある期間のビッグデータから規則性を見いだしたとしても、将来の動きはその規則性から外れていってしまうということが起こる。この問題に対して、マルチエージェントシステムによるシミュレーションでは、構成論的アプローチを取ることで、よりダイナミックに動きを捉え、多面的な理解・予測をすることが可能になる。

また、インターフェースエージェントは、人間とのインタラクションやユーザーインターフェースにおいて、自然性・親密性・効率性を高める。例えば、普段使っている言葉（自然言語）でコンピューターに指示や意図を伝えられるインターフェース（対話エージェント）ならば、階層的なメニューから探したり、特別のコマンド入力・操作方法をあれこれ覚えたりする必要がない。しかも、ハンズフリー・アイズフリーで使える。さらに、自然言語での対話に限らず、人間とインターフェースエージェントあるいは物理的身体を持つロボットとの関係を総合的に考えるヒューマンエージェントインタラクション（HAI）に関する知見を取り込むことで、外見や応答の仕方も含めて、ユーザーそれぞれが心理的・認知的に受け入れやすいインターフェースエージェントの設計が可能になる。

## 【研究開発の動向】

論文1)では、エージェント技術に関する研究を次のような4種類に分類している。

一つ目は、実世界において自律的に環境を観測し、判断し、行動することを可能にする計算モデルの研究である。知能ロボットが典型的な応用例であり、BDI（信念、願望、意図）モデル、強化学習、サブサンプレクチャーなどが研究されてきた。

二つ目は、多数のエージェントの協調や競争の計算モデルの研究である。電子商取引、電力マネジメントなどに応用されている。黑板モデル/契約ネット、自動交渉、メカニズムデザインなど、マルチエージェントシステム研究として活発に取り組まれている。

三つ目は、人間（一人あるいはグループ）と言語的・非言語的な対話を行い、社会的役割を演じるインターフェースエージェントの研究である。自然言語による対話を実現する対話エージェントや、言語や擬人化のインターフェースに限ることなく、人間の心理・認知面を重視して総合的に人間とエージェントのインタラクションのあり方を考えるHAIの研究が進められている。

四つ目は、エージェントを用いたシミュレーションである。個々の行動主体を適切な粒度でモデル化し、そのインタラクションから生じる複雑な現象を観察する。

一つ目は二つ目の基礎にもなっており、四つ目は二つ目のマルチエージェントシステムを用いる。また、三つ目のうち対話エージェントは、自然言語処理（「2.1.2 言語・知識系のAI技術」で詳細記載）を基礎としており、HAIとは技術発展の流れが異なる。そこで、以下では、自律エージェントを含むマルチエージェントシステムおよびシミュレーション、対話エージェント、HAIに分けて、研究開発の動向を述べる。

### ① マルチエージェントシステムおよびシミュレーションの研究開発動向

初期のエージェントの研究分野は分散人工知能と呼ばれていた。1980年に米国で分散人工知能ワークショップDAI（Distributed Artificial Intelligence Workshop）の第1回が開催され、これは1994年

までほぼ毎年開催された。当初は、分散した問題解決器の間で解くべき問題を共有し、協調しながら問題を解く分散協調問題解決の方法論に取り組みの中心があったが、その後、各問題解決器が自律性を備え、それぞれが独立の目標を持つようなケースへと取り組みが広がり、マルチエージェントシステムと呼ばれるようになる。1989年から欧州を中心にマルチエージェントに関するワークショップMAAMAW (European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World) が開催されるようになった。1995年にはマルチエージェントシステム国際会議ICMAS (International Conference on Multi-Agent Systems)、1997年には自律エージェント国際会議AGENTS (International Conference on Autonomous Agents) が始まり、それらは2002年に統合されてAAMAS (International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems) となり、この研究分野の中心的な国際会議となっている。日本国内でも1991年に日本ソフトウェア科学会に「マルチエージェントと協調計算」(MACC) 研究会が立ち上がった。このMACC研究会を中心に、2002年からJAWS (Joint Agent Workshop & Symposium) がスタートし、現在では、電子情報通信学会「人工知能と知識処理」研究専門委員会、情報処理学会「知能システム」研究会、人工知能学会「データ指向構成マイニングとシミュレーション」研究会、IEEE Computer Society Tokyo/Japan Joint Chapterとの共同による学会横断的なイベントとして運営されている。他にも主要な国際会議として、PRIMA (International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems)、IEEE ICA (International Conference on Agents)、PAAMS (International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems) がある。日本が主導して立ち上げたロボカップにおいても、サッカーシミュレーションやレスキューシミュレーションを中心に、マルチエージェント研究の応用の評価が進められている。PRIMAは当初の名称をPacific Rim International Workshop on Multi-Agentsとし、また、IEEE ICAはJAWSの国際セッションのコミュニティによって創設されたものであり、日本が中心的な貢献をして、アジア地域におけるエージェント研究の活発化につなげてきた面を持つ。

このようにエージェント研究のコミュニティが発展し、マルチエージェント間交渉、マルチエージェントシミュレーション、マルチエージェント学習、マルチエージェントプランニング、メカニズムデザイン、エージェント指向ソフトウェア工学など、マルチエージェントシステムをベースとした技術開発も広がりを見せている<sup>1</sup>。2000年～2010年頃には、マルチエージェントが経済パラダイムと相性が良いことが注目され、ゲーム理論や計算論的メカニズムデザインがオークションやマッチング問題に適用されて、実用的な成果を上げた<sup>2</sup>。2010年代になると、社会活動・現象を扱い、実際に社会に実装することが強く目指されるようになってきた。電子商取引、電力マネジメント、交通シミュレーション、ワイヤレスセンサーネットワーク、災害対策(避難・群衆誘導)などへの適用が行われている<sup>6), 9), 29)</sup>。このような社会活動・現象を扱う上で、マルチエージェントシステムの中に人間も含めてモデル化すること(例えば、人間にどうインセンティブを与えるか、人間の限定合理性<sup>3</sup>をどう考慮するかなど)が検討されるようになった。また、マルチエージェントの研究コミュニティでは、国際会議と合わせて、コンペティションを通じた技術検証・改良も取り組まれて

- 1 マルチエージェントシステムやエージェントシミュレーションの技術開発や応用分野の広がりについては、人工知能学会誌や情報処理学会誌の特集号<sup>4), 5)</sup>に掲載された一連の解説論文に詳しい。
- 2 マルチエージェントシステムにおいて、その系が複数の利己的なエージェントで構成される場合、系の設計者は個々のエージェントの行動を直接制御することはできない。その代わりに、エージェント間の関係、つまりゲームのルールを設計することで、間接的にエージェントを制御しようというのが、メカニズムデザイン<sup>1), 6), 7), 8)</sup>の考え方である。オークションやマッチング問題への適用事例を含め、詳しい内容を「2.3.4 メカニズムデザイン」に記載している。
- 3 限定合理性 (Bounded Rationality) は、ノーベル経済学賞を受賞したHerbert A. Simonが1947年に提唱した概念で、人間は合理的に行動しようとしても、認知能力の限界やさまざまな制約により、限られた合理性しか持ちえないことを意味する。

## 2.1

俯瞰区分と研究開発領域  
人工知能・ビッグデータ

きた。特に注目されるものとしては、前述のロボカップ<sup>4</sup>のほか、2000年代には電子商取引、オークション、サプライチェーンマネジメントなどに関するTAC (Trading Agent Competition) が開催され、2010年からは自動交渉エージェントに関するANAC (Automated Negotiating Agents Competition) が開催されている。

なお、(4) 注目動向として、[新展開・技術トピックス] ①②③でマルチエージェントシステムの合意形成のための交渉と協調、マルチエージェント深層強化学習・逆強化学習、マルチエージェント社会シミュレーション、[注目すべき国内外のプロジェクト] ①でセキュリティーゲームを取り上げる。

## ② 対話エージェントの研究開発動向

音声対話技術を用いたインターフェースは、まず、タスクや利用シーンを限定した形で実用化が進んだ。このような限定によって、扱うべき語彙・文型・文脈を現実的な規模に抑えることができる。例えば、コンタクトセンターでの問い合わせ応答や、旅行会話の音声翻訳などが挙げられる。Nuance、IBM、NECなどから法人向けソリューションが提供されたほか、情報通信研究機構 (NICT) で開発された個人旅行者向け多言語音声翻訳アプリケーションVoiceTraは、スマートフォンアプリケーションとして、民間企業や、スポーツイベントでの案内、病院診察での外国人対応などに使われている。

この間、スマートフォンが普及したことで、そのフロントエンドのインターフェースとして音声対話アシスタントが使われるようになった。2011年にリリースされたAppleのSiriや2012年にリリースされたNTTドコモの「しゃべってコンシェル」がその代表である。また、2014年にMicrosoftがWindowsのフロントエンドとして、対話インターフェースを持つCortanaをリリースした。同年にはAmazon Echo (アシスタントソフトウェアAlexa)が発売され、家庭向けの音声対話アシスタント内臓スピーカー (スマートスピーカーやAIスピーカーとも呼ばれる) という新しい製品形態が生まれた。同種の製品として、その後、2016年にGoogle Home (アシスタントソフトウェアGoogle Assistant)、2017年にLINE Wave (アシスタントソフトウェアClova) などが続いた。さらに、アシスタント型の対話 (タスク指向型対話) よりも雑談型の対話 (非タスク指向型対話) が中心の「チャットボット」(Chatbot)<sup>5</sup>と呼ばれるソフトウェアも利用が広がりつつある。企業にとっての新たな顧客接点として、SNSやメッセージアプリケーションでチャットボットが会話の相手になるという使われ方もされている。

以上のような対話インターフェースは、厳密な意味での自律性を必ずしも備えてはいないが、知識ベースを備えたり、擬人化された外見や性格を持っていたり、ユーザーとの対話から学習したりといった知的な機能を持つことから「対話エージェント」とも呼ばれる。

技術面に目を向けると、近年はニューラルネットワーク・深層学習の適用が進んだ<sup>10)</sup>。従来、音声認識、言語理解、対話制御、応答生成、音声合成というモジュールをパイプライン接続する構成が取られていたが、各モジュールを深層学習でモデル化するという置き換えが進んだ。さらに、パイプライン構成を取らずに、深層学習によって入力文から応答文を直接出力するEnd-to-End構成も取られるようになってきた。

最先端の対話エージェントは、自然言語処理分野で発展したトランスフォーマー (Transformer) という深層学習モデル (詳細は「2.1.2 言語・知識系のAI技術」参照) をベースとし、極めて膨大な量のテキストデータを学習に用いている。2020年1月にGoogleが発表したチャットボットMeena (ミーナ)<sup>11)</sup> は、ソーシャルメディア上での会話データ341ギガバイトから、ニューラルネットワークのパラメーター26億個を学習した。Facebook (現Meta) が同年4月に発表したチャットボットBlender (ブレンダー)<sup>12)</sup> は、

4 日本から1993年に提案され、1995年にスペシャルセッション、1996年にプレ大会が開催され、1997年を第1回として、以降毎年開催されている。

5 会話 (Chat) とロボット (Bot) を組み合わせた造語。

掲示板サイトRedditの会話データ15億件から最大94億パラメーターを学習した。さらに、同年6月にはOpenAIから、3000億件のテキストデータから1750億個のパラメーターを学習した言語モデルGPT-3が発表された<sup>13)</sup> (Microsoftがその独占ライセンスを取得)<sup>6)</sup>。2022年11月には、その改良版であるGPT-3.5を用いたChatGPTがWeb公開された (詳細は [国内外の注目プロジェクト] ②を参照)。

なお、対話エージェント技術に関する国際的な研究発表・議論の場としては、SIGDIAL (Annual Meeting of the Special Interest Group on Discourse and Dialogue) やICMI (ACM International Conference on Multimodal Interaction) があるとともに、ACL (Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics) をはじめとする自然言語処理分野の国際会議や、NeurIPS (Conference on Neural Information Processing Systems) をはじめとする機械学習分野の国際会議で発表されている。また、共通タスクを設定して方式や性能を比較するコンペティション型のワークショップも活発に開催されている。近年は、非タスク指向型対話に関するコンペティション (Amazonが開催するAlexa Prize<sup>14)</sup> など) が注目されている。

さらに、言語や音声のみではなく、対話で扱うメディアを画像などにも広げたマルチモーダル対話の研究も盛んになりつつある。対話相手の内面状態などの情報を推定する技術は社会的信号処理 (Social Signal Processing) と呼ばれ、ICMIやInterspeechなどの国際会議で研究発表やコンペティションが行われている。これらの技術を用いた対話システムの研究は今後盛んになる分野であり、コミュニケーションロボットの研究とも接点がある。対話システムライブコンペティションは、2022年の第5回からマルチモーダル表出を含むマルチモーダル対話へと発展している。また、対話ロボットコンペティションは、ロボットと対話するシステムに関するコンペティションである。これらは世界に先駆けた日本発の取り組みである。マルチモーダル対話については [新展開・技術トピックス] ④で取り上げる。

### ③ ヒューマンエージェントインタラクション (HAI) の研究開発動向

HAIは人間とエージェントとのインタラクションに重点を置いている<sup>15), 16), 17)</sup>。マルチエージェントシステム研究と比べると、人間の心理・認知といった面からインタラクションを捉えている。対話エージェント研究と比べると、自然言語だけでなく、エージェントの外見や動きなどの非言語情報や人間の心理・認知なども含めた総合的なインタラクションを扱っている。このような立場からHAIという新たな研究分野が日本発で立ち上がり、RO-MAN (IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication)、IROS (IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems)、人工知能学会全国大会などでのオーガナイズドセッションやワークショップを経て、2006年に第1回のHAIシンポジウムが開催された。2013年からは国際会議HAI (International Conference on Human-Agent Interaction) も開催されている。

HAI研究において、人間とインタラクションするエージェントとして、主に三つの形態が考えられている。一つ目は仮想的なエージェントである。その分かりやすい例は、人間の外見を持つ擬人化エージェントであるが、ユーザーや目的によっては、必ずしも擬人化されたエージェントが最良のインターフェースであるとは限らない。二つ目は物理的な身体を持つエージェントであるロボットであり、センサーによって置かれた環境を把握し、アクチュエーターを介した動作によって環境に変化を及ぼすことも可能である。三つ目は人間である。HAI研究では、人間同士のコミュニケーションも研究対象の一つになっている。人間同士のコミュニケーションを解析・理解することは、一つ目や二つ目の形態をデザインする上で参考になるとともに、

6 言語モデルは大規模化が進んでおり、2021年10月にMicrosoftとNVIDIAが発表したMegatron-Turing Natural Language Generation (MT-NLG) は、GPT-3の約3倍となる5300億個のパラメーターを持つ。大規模言語モデル (基盤モデル) の動向については「2.1.2 言語・知識系のAI技術」で取り上げている。

エージェントを介した人間同士のコミュニケーション (Agent-Mediated Communication) の改善支援にHAI研究を役立てることにもつながる。

HAIや対話エージェントに関する研究は、AIだけでなく、認知科学、心理学、哲学、ヒューマンインターフェース、ロボティクスなどがクロスする学際的研究分野である。対話エージェントが既に実用の域にあるのと比較すると、HAIはまだ新しい研究分野だが、AI技術がさまざまなアプリケーション・サービスでさまざまな人間 (ユーザー) に利用されていくことを考えると、HAI研究に基づくインターフェースエージェントの設計論は今後ますます重要になっていくと考えられる ([新展開・技術トピックス] ⑤を参照)。

#### (4) 注目動向

##### [新展開・技術トピックス]<sup>7</sup>

##### ① マルチエージェントシステムの合意形成のための交渉と協調

マルチエージェントの交渉と協調は、ゲーム理論を重要な数学的基礎として発展しており、基礎理論面の発展として、深層学習を用いた自動メカニズムデザインと、仲介均衡 (Mediated Equilibrium) が注目される。応用面の発展では、自動交渉、不完全情報ゲーム、セキュリティーゲームが注目される。

メカニズムデザインでは、真実申告最良 (正直に申告すると一番得をする/損をしない) となるように設計するとメカニズムが安定する。これを制約としてメカニズムの設計を自動化する試みが自動メカニズムデザインであり、2019年に発表されたRegretNetという手法<sup>19)</sup> がオークションの収入最大化問題で大きな成果を挙げた。この問題では単一財のケースが1981年に解かれたものの、複数財のケースは40年近く解けずにいた。RegretNetでは、この問題に対して、真実申告最良の制約充足をRegret値 (ある行動を選択したときに他の行動を選択していたらこれくらい効用が得られたはずだという後悔を数値化したもの) の最小化問題として定式化し、深層学習を適用することで、データに基づいてメカニズムが自動設計されるようにした。

仲介均衡は「囚人のジレンマ」問題に仲介者 (Mediator) を導入する。この問題では従来、それぞれのプレイヤーが合理的で、かつ、コミュニケーションができない状態だと、両プレイヤーとも裏切るという均衡に落ちてしまうことが知られていた。しかし、仲介者が入ると、両プレイヤーとも仲介者に合意することが均衡となり、協力するという可能性が示された。

自動交渉は、それぞれの効用関数 (いわばそれぞれの価値観) を持った複数のエージェントが相対する状況において、一定の交渉プロトコルに従ってうまく合意案を見つける技術である。ある問題について、複数のステークホルダーの間で対立したり、協調しようとしたりするとき、交渉プロトコルや効用関数を定めてエージェントに代行させて自動交渉を行うならば、人間同士が交渉するよりも、その条件で考えられる最適な合意点に高速に到達できると期待される。交渉理論を踏まえたモデルベースの方式のほか、機械学習ベースの方式も開発されている<sup>8)</sup>。国内では、産業競争力懇談会 (COCON) による提言、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) のプログラムや内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) によって取り組みが推進され<sup>9)</sup>、衝突を回避して安全に飛行するドローンの運航管理や、サプライチェーンにおける受発注会社間の商取引条件の調整 (SCM) などで実証実験も行われた。特に後者は、ANACでのSCMリーグの立ち上げ (2019年)、自律調整SCMコンソーシアムの発足 (2021年) にも発展した。海外でも

7 2022年1月26日に開催した俯瞰ワークショップ「エージェント技術」での発表・議論をもとにしており、詳細は同ワークショップの報告書<sup>18)</sup>を参照。

8 前述の国際自動交渉エージェント競技会ANACを共通の場として技術発展が進んできた<sup>20)</sup>。

9 COCONからは2018年に「人工知能間の交渉・協調・連携」の提言<sup>21)</sup>が出された。NEDOプログラムでは「ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト」(2017年度～2021年度)、SIPプログラムでは「AI間連携によるバリューチェーンの効率化・柔軟化」(2018年度～2022年度)が実施された。

2019年創業の米国 Pactum 社が、取引条件交渉から契約文書の取り交わしまで一気通貫のソリューションを提供する自動交渉AIを開発し、2020年にウォルマートで試験運用を開始するなど、国際的に取り組みが活発化している。

不完全情報ゲームは、プレーヤーがゲームの進行に必要な情報を全ては知ることができないタイプのゲームである。チェス・囲碁のような完全情報ゲームでは、ゲーム木（ゲームにおける可能な打ち手と状況を木構造で表現）における自分の位置が分かるが、不完全情報ゲームではその位置が一つに定まらないため、状況の評価がはるかに複雑で難しくなる。完全情報ゲームでは、囲碁においてGoogle DeepMindのAlphaGo<sup>22)</sup>が2016年から2017年に世界トップランクプロに圧勝して大きな話題になったが、不完全情報ゲームについても、その代表であるポーカーにおいて、米国カーネギーメロン大学のLibratus<sup>23)</sup>というソフトウェアが2017年に2人制ゲームで人間に勝利し、さらに、それを発展させたPluribus<sup>24)</sup>というソフトウェアが2019年に6人制ゲームでもプロに圧勝した。ここでは、Regret値の最小化戦略が用いられ、反実仮想（観測され得たけれど実際には観測されなかった）Regret値を用いてモンテカルロ木探索を行うモンテカルロCFR（Montecarlo Counterfactual Regret Minimization）が開発・適用されている<sup>25), 26)</sup>。

セキュリティーゲームについては [注目すべき国内外のプロジェクト] ①で取り上げる。

## ② マルチエージェント深層強化学習・逆強化学習

マルチエージェントにおいて、各エージェントがどのように振る舞うかを定める意思決定規範の設計は、重要な課題である。この課題に有効な技術として、深層強化学習・逆強化学習が注目されている。

強化学習（Reinforcement Learning）では、エージェントが、ある状態で、ある行動をしたとき、その結果に応じた報酬が与えられる。そして、行動と報酬の受け取りを試行錯誤的に重ねることを通して、より多くの報酬が得られるよう行動を決定する意思決定方策を学習する。強化学習の中に深層学習を組み込んだものが深層強化学習（Deep Reinforcement Learning）であり、上述のAlphaGoに用いられた。囲碁のようなボードゲームでは、状態や行動に関する不確実性がないことや、過去の膨大な棋譜データに基づいた時系列行動と勝敗の蓄積があることから、報酬関数を定義することが比較的容易であるため、報酬関数に基づいた逐次的意思決定戦略（方策）を持つエージェントを設計できる。

しかし、報酬値はスカラー量として与える必要があるため、定性的な感覚の定量化や、複数の目的を両立させるような場合には、それぞれの目的に対する報酬値の重みを定義することは容易ではない。特に、複数の目的下での問題解決は、そのままマルチエージェント系の学習に大きく関わっており、実用に向けた課題として、報酬関数設計が重要となる。

報酬設計に有効な手法として逆強化学習（Inverse Reinforcement Learning）が注目されている。逆強化学習では、エキスパートの振る舞いの履歴など、良い見本となる意思決定系列から報酬関数を推定する。例えば、ロボットアームの制御、自動運転、人間や動物の行動解析などで報酬関数の推定が試みられている。また、エージェント単体だけでなく、2体系やN体系などマルチエージェントシステムへの拡張も行われている<sup>27)</sup>。マルチエージェント強化学習においては、上述した複数の目的間にトレードオフがある場合（エージェント間の競争）の問題は顕著であり、加えて以前から議論されてきた同時学習の問題、スケラビリティなど、単一エージェントの場合では生じない課題は、シミュレーション、合意形成などに応用する上でも重要であり、これに対する新たな理論、アルゴリズムの提案が見られる<sup>28)</sup>。

## ③ マルチエージェント社会シミュレーション

マルチエージェント社会シミュレーション（Multi-Agent Social Simulation: MASS）は、人の行動や判断を模倣できるエージェントを多数用意し、コンピューター上に作った仮想的な都市や社会でそのエージェントたちを行動させ、集団としてどのような振る舞いが生じるかを分析・研究する取り組みである<sup>29)</sup>。

さまざまな社会現象・社会活動の分析や理解に役立つとともに、起こり得るさまざまな可能性を事前に知ること、適切な対策立案・社会制度設計や、多数のステークホルダー間の調整に活用できる。公共交通サービス、感染症対策、都市・地域設計、防災・減災、電力・金融・物流市場設計など、さまざまな分野への適用が進んでいる。

注目される最近の適用事例として、オンデマンド交通サービス SAVS (Smart Access Vehicle System) と COVID-19 感染シミュレーションを挙げる。SAVSでは、刻々と変化する車両と人・物の移動状況において、全ての空間移動と希望時間を同時に満たす車両の走行ルートを瞬時に計算する。タクシー運転手の収入の平等性を考慮した配車によって、パフォーマンスをあまり落とさずに収入格差を改善し得ることも、シミュレーションから分かった。また、COVID-19 感染シミュレーションは、内閣官房のプロジェクト「COVID-19 AI・シミュレーションプロジェクト」<sup>10</sup>で実行されている。感染症流行を記述する数理モデルとして SIR モデル<sup>11</sup>などが知られているが、感染は社会に一律に広がるわけではなく、地域や団体の特性・行動パターンなどさまざまな要因によって、感染の広がり方が不均一になる。エージェントシミュレーションでは、そのようなさまざまな要因を取り込んだり、経済活動への影響や医療リソース問題などを考慮したりといった、より現実の現象に近い分析・予測が可能になる。

#### 4 マルチモーダル対話システム

マルチモーダル対話システムでは、テキストに加えて、声の様子（韻律情報など）、見えている画像・映像情報、筋電・触覚・生理指標などのセンサー情報などが用いられる。研究課題は、(a) 入力に関する状況認識と、(b) 出力に関する表出に分けられ、さらに (a) は、(a-1) 対話相手をマルチモーダルで観測して対話する場合と、(a-2) 対話相手と自分が同じ対象を観測しながら対話する場合に分けられる。

(a-1) では、対話相手の表情・声色や話すタイミングなどから、感情、態度、リーダーシップ、エンゲージメント（参加度）などを推定して、対話の仕方に反映する。カウンセリング対話や面接の練習などの応用が開発されている（例えば University of Southern California の SimSensei<sup>31)</sup>）。

(a-2) は、応用シーンとして、ショッピング時に商品画像を見ながらの対話、メタバース内での対話、サービスロボットへの指示、自動運転車への指示などが考えられている。ここでは、対話文中の指示語に対する画像・映像との照応解析や状況認識が必要になる。この照応解析や状況認識は、画像より映像の方が難しく、屋内の限定空間よりも屋外のオープン空間の方が格段に難しい。

(b) では、特に対話相手となるロボットや仮想エージェントの表情のコントロールが重要である。ムーンショット目標1の「アバター共生社会」プロジェクトの中で、エージェントの表出を含むアバターコミュニケーション研究が進められている。

#### 5 HAI 設計論

HAI 研究の主要な目標の一つは、人間とインタラクションするエージェントの設計論である。HAI は比較的新しい研究分野であり、この設計論が確立されたとはまだ言えないが、エージェント自身の外観や機能、エージェントと人間の間でやり取りされる情報、エージェントと人間の関係などの観点から、設計において考慮すべき事項や指針が徐々に見いだされつつある<sup>15), 16), 17), 32)</sup>。そのいくつかを以下に示す。

a. エージェントのデザイン：外見の選択（人型・動物型など、人型の場合も性別・性格など、実写風・ア

10 プロジェクトによるシミュレーション結果や研究成果は <https://www.covid19-ai.jp/ja-jp/> で公開されている (accessed 2023-02-01)。

11 人口集団を感染のステージにより、感受性保持者 (Susceptible)、感染者 (Infected)、隔離者・回復者 (Removed/Recovered) という3種類に分け、感染に係る状態の時間的な変化をボトムアップにモデル化したもので、それら3種類の頭文字を取って「SIRモデル」と呼ばれている<sup>30)</sup>。



ニメ風などのどれを用いるか、親しみやすさと知性の印象が重要)、表出される情報の表現の選択 (自然言語による発話、非言語な表情、ジェスチャーなどのどれを用いるか、タスクの種類や環境にも依存)、機能レベル (学習機能やユーザーの状態・意図の理解機能など) を適切に選択する必要がある。

- b. 擬人化と適応ギャップ: 擬人化エージェントはユーザーがその機能や能力を推測しやすい反面、ユーザーが期待した機能・能力と実際との間に生じるギャップがリスクとなる。
- c. メディアの等式 (Media Equation) : メディアの世界と現実を無意識のうちに同一視してしまうという人間の心理が、エージェントに対しても起こり得る。
- d. ナッジ (Nudge) とブースト (Boost) : 行動経済学で提唱された概念で、ナッジはそっと行動を促すというもので<sup>12</sup>、ブーストはよく考えるように促すというものである。エージェントが人間に寄り添いながら、人間の意思決定・行動変容を支援しつつも、最終的には人間自身が判断してほしいという立場だが、悪用されるリスクもあり、倫理面の配慮や適正な選択構造の設計が求められる。
- e. 意図スタンス : 哲学者 Daniel Dennett は、人間が対象の振る舞いを理解し予測する際に、物理スタンス (物理現象として振る舞いを理解)、設計スタンス (設計仕様から振る舞いを理解)、意図スタンス (振る舞いの目的・意図から理解) という三つの心的姿勢を使い分けるとしている。HAI は上記 a~d のような点をコントロールしながら、意図スタンスにも踏み込んだ設計を行う。

#### [注目すべき国内外のプロジェクト]

##### ① セキュリティーゲームの社会適用

Milind Tambe らのチーム (Teamcore)<sup>13</sup> は、マルチエージェント技術・ゲーム理論に基づく「AI for social good」のための研究開発に取り組んでいる。特に有名なのは、セキュリティーゲームとしての定式化に基づくロサンゼルス空港の警備計画アプリケーション ARMOR の成功である。セキュリティーゲームは、テロリストなどの攻撃者から空港などの重要施設を守るために、適切な警備員配置を決定する警備計画問題である<sup>1), 6), 7), 8), 33)</sup>。警備側・攻撃側ともに人員リソースは有限であり、かつ、互いに相手の動きを読み合い、最も効果的な人員配置を行おうとする。これはゲーム理論におけるシュタッケルベルグ (Stackelberg) ゲームとして定式化でき、均衡を計算することで、効果的な警備員配置の計画が可能になるというものである。この研究成果をきっかけとして、セキュリティーゲームはマルチエージェントシステム研究におけるホットトピックとなり、理論展開と具体的応用が広く発展した。

Teamcore では、上述のような治安問題の他にも、次のような問題に取り組んでいる。公衆衛生問題では、HIV リスク行動削減、結核予防、母子保健などに対して、ソーシャルワーカーや公衆衛生のリソースに限りがある条件下で、社会的ネットワークの効果を最大化する取り組みが進められている。保全問題では、絶滅の危機にひんした野生動物を保護するためのレンジャー配置計画をセキュリティーゲーム (グリーンセキュリティーゲーム) として扱うシステム PAWS (Protection Assistant for Wildlife Security) が開発され、世界 100 か所以上の国立公園で使われている。他にも、サイバーセキュリティー、森林保護、ウイルスに対する薬設計、ソフトウェアコードテスト、交通システムなどへの適用も考えられている。このようなさまざまな社会的課題に対して実用的な成果を展開していることは注目される。

##### ② ChatGPT

2022年11月末にOpenAIからChatGPTがWeb公開された。OpenAIが2020年6月に発表した大規

12 ナッジのもともとの意味は「ひじで人を軽く突く」というものである。そこから、人々の行動を強制的に変えるのではなく、少しの刺激を与えることで自発的に望ましい行動を選択するように促すことを指すために使われるようになった。

13 以前は南カリフォルニア大学情報科学研究所 (USC/ISI : University of Southern California/Information Sciences Institute)、現在はハーバード大学に属している。

模言語モデル<sup>14</sup> (基盤モデル) GPT-3の改良版であるGPT-3.5に、人間のフィードバックを用いた強化学習RLHF (Reinforcement Learning from Human Feedback) を加え (InstructGPT)、対話システムとしてファインチューニングされたものだという事である。入力された質問に対して、まるで人間が書いたかのような自然な文章で、詳しくもっともらしい説明を返してくれて、用途に応じたテキスト (論文・電子メール・プログラムコードなど) の作成にも活用できる。GPT-3もユーザーからの例示をもとに (Few Shot Learning)、同じような内容を返すことができたが、ChatGPTはそれらがチャットという分かりやすいインターフェースで統一されている。また、差別的発言・性的発言・暴力的発言などの不適切な発言を避けるための仕組みも組み込まれている<sup>15</sup>。公開後の反響が大きく、2か月でアクティブユーザー数が1億人を記録したということである (1億人に到達するのにFacebookは4年半、TikTokは9か月かかった)。ただし、その性能に驚く一方、誤った内容をもっともらしく回答するケースも見られ (特に計算や演繹推論で間違えるケースが見られる)、誤って信じてしまうリスクやそれが悪用されるリスクが懸念される。

## (5) 科学技術的課題

### ① マルチエージェントシステムおよびシミュレーションの技術課題

近年、マルチエージェントシステムによるモデル化やそれを用いたシミュレーションは社会活動・現象への適用が進み、前述のようなさまざまな社会的問題解決に効果を示しつつあるが、その一方、いくつかの技術的な課題が残されている。まず、シミュレーションに用いるエージェントのモデルの限界である。社会活動・現象に人間の行動が含まれる場合、その個々の人間の判断・行動を完全にモデル化することは難しい。そのため、現状における一つの方向性として、将来予測の精度よりも、むしろ、さまざまな条件でシミュレーションを繰り返すことで、どんな条件・要因で何が起こり得るのかを知る「What-If分析」の手法を技術的に確立し、発生し得る問題を予測して事前に対策を打てることの意義を重視する研究開発の方向が重要である。

エージェントのモデル設計 (意思決定規範の設計) の難しさに対しては、深層強化学習や逆強化学習が注目されている。その発展方向として、前述したエージェント単体からマルチエージェント (N体系) への適用拡大に加えて、複数の競合する目的を持つ多目的最適化問題へ適用を拡大する多目的強化学習・多目的逆強化学習が研究されている。また、エージェントが物理世界で動作する場合 (ロボットや自動運転車など)、物理的な制約やノイズを考慮したモデル設計が必要になる。このような取り組みによって、より多様で複雑な現実世界の問題を扱うための枠組みへの発展が期待される。

また、マルチエージェントシステムの枠組みを用いて、どのような社会課題解決や新たな価値創造に取り組むか、ということも重要な点である。人々の集合知を高める「ハイパーデモクラシー」<sup>34)</sup> が提案されているほか、地球環境問題なども視野に入れた取り組みも期待される。

### ② 対話エージェントの技術課題

タスク指向型対話・非タスク指向型対話ともに深層学習の適用が進み、対話における話題の広がりや対話の自然さが改善されてきた。しかし、タスク指向型対話では、まだ特定の話題で話すということしかできておらず、多様な話題や不定形タスクに対応できるような発展が求められる。非タスク指向型対話では、一問一答から話題の共有というレベルへ発展してきたが、さらに情報の共有、そして価値観の共有への発展が求められる<sup>10), 35)</sup>。窓口対応のようなくまなく情報状態が定義できないようなタスクや、エピソードなどを

14 その詳しい動向については「2.1.2 言語・知識系のAI技術」の [新展開・技術トピックス] ①を参照。

15 2016年にMicrosoftのチャットボットTayが、悪意のあるユーザーとの対話によって不適切に訓練されて、問題発言を連発するようになってしまい、一日で公開停止となった。このような問題を回避するため、差別的・性的・暴力的などの要素を検出・フィルタリングする仕組み (Content Moderation API) が用意された。

共有するといったタスクはまだできていない。そのためには、互いの理解を積み重ねていくための共通基盤（コモングラウンド<sup>36)</sup>）の研究が重要になる。

マルチモーダル対話の研究では、音声・テキスト対話に比べて、対話研究用データセットの構築・公開が進んでいないことが課題である。シングルモーダルよりもコストがかかり、話者のプライバシーへの配慮も必要である。先駆的な取り組みとして、2020年に、(a-1) 対話相手をマルチモーダルで観測して対話する場合については、大阪大学産業科学研究所が構築したデータセットHazumiが公開された。(a-2) 対話相手と自分が同じ対象を観測しながら対話する場合については、ショッピングタスクのデータセットSIMMC (Situating and Interactive Multimodal Conversations) がFacebook Research (現Meta Research) から公開された。今後さらに対話研究用データセットの拡充が求められるとともに、どのような評価尺度を用いるべきかについての研究も重要である。

また、前述したように日本発の世界的にも新しい取り組みとして、マルチモーダル対話システムのライブコンペティションや対話ロボットコンペティションが行われている。2022年はどちらも大規模言語モデルをベースとしたシステム (LINE社が開発) が優勝したが、このような対話システムにおいて大規模言語モデルをどのように使っていくかは大きな課題である。

### ③ HAIの技術課題

HAIはユーザーの心理・認知特性と関わりが深く、受け止め方の個人差が大きいことが、設計論の確立という面では難しさがあると考えられる。この課題に対して、従来のHCI (Human-Computer Interaction) の方法論への批判的観点から、多くのHAI研究では大規模な参加者実験による一般性の評価を行うことで対応している。一方、HAIの重要課題として、基礎的な観点から、ケーススタディー研究が多く、統一的な設計論が確立されていないこと、工学的な観点からは、インパクトのあるキラーアプリケーションが見えていないことなどが挙げられる。AI技術がさまざまなアプリケーション・サービスで幅広く利用されていくことを考えると、インターフェースエージェントの設計におけるHAIの側面は今後ますます重要なものになっていく。[新展開・技術トピックス] ⑤で述べたような設計上の留意点や指針に関する基礎的な知見を、今後も積み上げていくことが必要である。併せて、心理学・哲学的な面からの理論構築も含めて、人間とエージェントの間の信頼関係確立のための設計技法も重要になるであろう。

また、HAIの考え方が効果的に働く応用分野として、医療、介護、福祉、教育、ビデオゲームなどが考えられる<sup>15)</sup>。このような応用を通して、設計論や要素技術を検証していくとともに、新たな技術課題や知見が生まれてくるものと思われる。さらに、既に実用化が進んでいるマルチエージェントシミュレーションや対話エージェントに対して、HAI研究から得られた知見を加えることで、新たな価値を生み出すという方向の展開が期待できる。

## (6) その他の課題

### ① 大規模コンピューティング基盤・データ基盤の整備・強化

[注目すべき国内外のプロジェクト] ②に記載したように、最先端の対話エージェントの言語モデルは、膨大な量のテキストデータから学習したものである。この規模の学習処理を実行できるのは、OpenAI、Meta、Googleのような極めて大規模な計算資源を保有する組織だからこそである。また、マルチエージェント社会シミュレーションも、今後、エージェント数やシミュレーション条件のバリエーションが増えると、計算量が組み合わせ的に増大する。このようにエージェント研究には大規模なコンピューティング基盤やデータ基盤が必要になっており、これはもはや大学の一研究室で確保できる規模のものではなくなってきている。産業技術総合研究所のABCIや理化学研究所の富岳のように、国内の研究機関が共同利用できる大規模コンピューティング基盤・データ基盤の継続的な整備・強化が必要である。

## ② 産学連携および分野横断の研究開発推進

マルチエージェント社会シミュレーションや対話エージェントの研究開発では、実社会・実用現場でのデータ獲得や検証が不可欠であり、産学連携はそのための手段として、今後もいっそう推進されるであろう。また、HAIや対話に関する研究は、AI、ヒューマンインターフェース、ロボティクス、認知科学、心理学、哲学など、さまざまな分野の学際的な研究分野であり、分野横断の研究コミュニティとして発展してきている。さらに、現状では、マルチエージェントシステム/シミュレーションと対話エージェントとHAIとの間の連携はまだあまり強くないが、今後、これらの間の知見共有・技術統合のための連携も有効なはずである。ここで述べた種類の分野横断の研究開発の推進体制の重要性が高まっていくと考える。

### (7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	HAIは日本発の研究分野である。自動交渉エージェントに関するANACでも日本の貢献が見られる。対話分野の国際会議では一定数の論文が採択されているが、エージェント基礎研究全般として研究者層や国際学会での存在感はまだ弱い。
	応用研究・開発	○	↗	オンデマンド交通・避難計画などの交通・人流シミュレーションでの実用化が見られる。エージェント研究者も関わっている人狼ゲームやロボカップ、対話ロボットやマルチモーダル対話システムなどのコンペティションも日本が先導している。
米国	基礎研究	◎	→	他のAI分野と同様に研究者層が厚く、エージェント分野のAAMASや対話分野のSIGDIALやICMIの採択論文数も圧倒的1位である。
	応用研究・開発	◎	→	セキュリティゲームでの実用化をはじめ、エージェント技術の先端的な応用が進んでいる。大規模学習による対話エージェントでは圧倒的優位性を示しており、Meta、Amazon、Microsoftなどからの論文発表も多い。
欧州	基礎研究	◎	→	米国に次いで研究者層が厚い。特に英国の存在感がある（AAMASの採択論文数では米国に次いで英国が2位をキープしている）。欧州はマルチモーダル対話も比較的強い。
	応用研究・開発	○	→	DeepMindがマルチエージェントシステムのトップカンファレンスで発表しているほかは、企業から目立った研究成果の発表は見られない。
中国	基礎研究	○	↗	AAMASの採択論文数は徐々に増加している。自然言語処理・対話関連はACL・EMNLPで米国と並んで2強。
	応用研究・開発	○	↗	AI分野全体では米中2強の状況であるが、対話分野（タスク指向・非タスク指向）で企業（Tencent、Alibabaなど）の取り組み・発表が活発であることを除いて、エージェント分野全般での中国の存在感はまだそれほどではない。しかし、中国のAI応用は急速に拡大しており、エージェント応用研究面も伸びつつある。
韓国	基礎研究	△	→	AAMASの採択件数もごくわずかである。SIGDIAL・ICMIでも目立った活動は見られない。
	応用研究・開発	△	→	目立った活動は見られない。
イスラエル	基礎研究	◎	→	バルイラン大学などはメカニズムデザインやゲーム理論などの基礎研究でトップレベルである。
	応用研究・開発	△	→	企業から目立った研究成果の発表は見られない。

2.1  
俯瞰区分と研究開発領域  
人工知能・ビッグデータ

## (註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

## (註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

## (註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## 参考文献

- 1) 長尾確・大沢英一・伊藤孝行, 「エージェント・マルチエージェントの過去と現在」, 『人工知能』(人工知能学会誌) 35巻3号 (2020年5月), pp. 430-443.
- 2) 木下哲男・他, 「分散協調とエージェント」, 電子情報通信学会知識ベース「知識の森」7群7編. [http://ieice-hbkb.org/portal/doc\\_673.html](http://ieice-hbkb.org/portal/doc_673.html) (accessed 2023-02-01)
- 3) 和泉潔, 「ビッグデータとエージェントシミュレーション」, 『情報処理』(情報処理学会誌) 55巻6号 (2014年6月), pp. 549-556.
- 4) 服部宏充・栗原聡(編), 「特集: エージェント」, 『人工知能』(人工知能学会誌) 28巻3号 (2013年5月), pp. 358-423.
- 5) 青木健児・浅井達哉(編), 「特集: マルチエージェントシミュレーション」, 『情報処理』(情報処理学会誌) 55巻6号 (2014年6月), pp. 528-590.
- 6) 伊藤孝行・他, 「未来の社会システムを支えるマルチエージェントシステム研究 (1) —経済パラダイム, 交渉エージェント, 交通マネジメント—」, 『人工知能』(人工知能学会誌) 28巻3号 (2013年5月), pp. 360-369.
- 7) 松原繁夫, 「マルチエージェントシステムにおける経済学的アプローチ」, 『計測と制御』(計測自動制御学会誌) 55巻11号 (2016年11月), pp. 948-953.
- 8) 岩崎敦・東藤大樹, 「ゲーム理論・メカニズムデザインに関する研究動向」, 『人工知能』(人工知能学会誌) 28巻3号 (2013年5月), pp. 389-396.
- 9) 伊藤孝行・他, 「未来の社会システムを支えるマルチエージェントシステム研究 (2) —電力システムおよびワイヤレスセンサネットワークへの応用—」, 『人工知能』(人工知能学会誌) 28巻3号 (2013年5月), pp. 370-379.
- 10) 東中竜一郎, 『対話システムの作り方』(近代科学社, 2023年).
- 11) Daniel Adiwardana, et al., “Towards a Human-like Open-Domain Chatbot”, arXiv : 2001.09977 (2020).
- 12) Stephen Roller, et al., “Recipes for building an open-domain chatbot”, arXiv : 2004.13637 (2020).
- 13) Tom Brown, et al., “Language Models are Few-Shot Learners”, *Proceedings of the 34th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2020; December 6-12, 2020)*.
- 14) Raefer Gabriel, et al., “Further Advances in Open Domain Dialog Systems in the Third Alexa Prize Socialbot Grand Challenge”, *Proceedings of the Alexa Prize Socialbot Grand Challenge 3* (2020).
- 15) 大澤博隆, 「ヒューマンエージェントインタラクションの研究動向」, 『人工知能』(人工知能学会誌) 28巻3号 (2013年5月), pp. 405-411.

## 2.1

俯瞰区分と研究開発領域  
人工知能・ビッグデータ

- 16) 山田誠二・小野哲雄,『マインドインタラクション:AI学者が考える《ココロ》のエージェント』(近代科学社, 2019年) .
- 17) 山田誠二 (編), 「特集: 進化するHAI: ヒューマンエージェントインタラクション」, 『人工知能』(人工知能学会誌) 24巻6号 (2009年11月), pp. 809-884.
- 18) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター, 「俯瞰ワークショップ報告書: エージェント技術」, CRDS-FY2021-WR-11 (2022年3月) .
- 19) Paul Dütting, et al., “Optimal Auctions through Deep Learning”, *Proceedings of 36th International Conference on Machine Learning (ICML 2019; June 9-15, 2019)*, pp. 1706-1715.
- 20) 藤田桂英・森頭之・伊藤孝行, 「ANAC: Automated Negotiating Agents Competition (国際自動交渉エージェント競技会)」, 『人工知能』(人工知能学会誌) 31巻2号 (2016年3月), pp. 237-247.
- 21) 産業競争力懇談会 (COCN), 「人工知能間の交渉・協調・連携」, 「産業競争力懇談会2017年度プロジェクト最終報告」(2018年2月21日) .
- 22) David Silver, et al., “Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search”, *Nature* Vol. 529, No. 7587 (2016) , pp. 484-489. DOI: 10.1038/nature16961
- 23) Noam Brown and Tuomas Sandholm, “Superhuman AI for heads-up no-limit poker: Libratus beats top professionals”, *Science* Vol. 359, Issue 6374 (December 17, 2019), pp. 418-424. DOI: 10.1126/science.aao1733
- 24) Noam Brown and Tuomas Sandholm, “Superhuman AI for multi-player poker”, *Science* Vol. 365, Issue 6456 (July 11, 2019), pp. 885-890. DOI: 10.1126/science.aay2400
- 25) Martin Zinkevich, et al., “Regret minimization in games with incomplete information”, *Proceedings of the 20th International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2009; December 4-9, 2009)*, pp. 1729-1736.
- 26) Marc Lanctot, et al., “Monte Carlo sampling for regret minimization in extensive games”, *Proceedings of the 22nd International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2009; December 7-12, 2009)*, pp. 1078-1086.
- 27) 荒井幸代, 「複数の環境を利用した逆強化学習—推定報酬の精度向上と転移に向けて—」, 『日本ロボット学会誌』 39巻7号 (2021年9月), pp. 625-630.
- 28) Kaiqing Zhang, Zhuoran Yang, and Tamer Basar, “Multi-Agent Reinforcement Learning: A Selective Overview of Theories and Algorithms”, *Handbook of Reinforcement Learning and Control. Studies in Systems, Decision and Control* Vol. 325 (Kyriakos G. Vamvoudakis, et al. (eds.), Springer, 2021), pp. 321-384. DOI: 10.1007/978-3-030-60990-0\_12
- 29) 野田五十樹, 「マルチエージェント社会シミュレーションが浮き彫りにする緊急時避難の課題」, 『学術の動向』 23巻3号 (2018年3月), pp. 42-47. DOI: 10.5363/tits.23.3\_42
- 30) W. O. Kermack and A. G. McKendrick (1927). “A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics”. *Proceedings of the Royal Society A* Vol. 115, Issue 772 (August 1, 1927), pp. 700-721. DOI: 10.1098/rspa.1927.0118
- 31) David DeVault, et al., “SimSensei kiosk: a virtual human interviewer for healthcare decision support”, *Proceedings of the 13th International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS 2014; May 5-9, 2014)*, pp. 1061-1068.
- 32) 山田誠二・寺田和憲・小林一樹, 「人を動かすHAIデザインの認知的アプローチ」, 『人工知能』(人工知能学会誌) 28巻2号 (2013年3月), pp. 256-263.
- 33) Milind Tambe, *Security and Game Theory: Algorithms, Deployed Systems, Lessons Learned*

(Cambridge Press, 2011).

- 34) 伊藤孝行・他, 「ハイパーデモクラシー: ソーシャルマルチエージェントに基づく大規模合意形成プラットフォームの実現」, 『人工知能学会全国大会 (第36回) 予稿集』(2022年), 2H5-OS-11a-01.
- 35) 東中竜一郎, 『AIの雑談力』(KADOKAWA, 2021年) .
- 36) 西田豊明, 『AIが会話できないのはなぜか: コモングラウンドがひらく未来』(晶文社, 2022年) .

## 2.1

俯瞰区分と研究開発領域  
人工知能・ビッグデータ