

2.1.8 認知発達ロボティクス

(1) 研究開発領域の定義

認知発達ロボティクスは、ロボットや計算モデルによるシミュレーションを駆使して、人間の認知発達過程の構成論的な理解と、その理解に基づく人間と共生するロボットの設計論の確立を目指した研究領域である。発達心理学や神経科学などの経験主義的な学問分野と、人工知能 (AI) やロボティクスなどの構成論的な学問分野が融合した学際的な研究領域として取り組まれている。なお、本研究領域の名称として、認知発達ロボティクス (Cognitive Developmental Robotics) のほか、認知ロボティクス (Cognitive Robotics)、発達ロボティクス (Developmental Robotics)、エピジェネティックロボティクス (Epigenetic Robotics) が用いられることもある。

<p>目標 ロボットや計算モデルによるシミュレーションを駆使して、人間の認知発達過程の構成論的な理解と、その理解に基づく人間と共生するロボットの設計論の確立を目指す</p>	<p>取り組み状況の国際比較</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 日本発の研究領域、日本と欧州が中心で米中は現状関心が薄い ● ただし、深層学習が言語獲得等に発展、認知発達に近づきつつある
<p>研究開発動向</p> <p>研究コミュニティの形成</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 人間は教師あり学習のみをしているわけではなく、身体性と身体的・社会的相互作用を通して、自律的にさまざまな認知能力を発達させている ● このような「発達」の重要性認識に基づいて2000年頃に日本から提唱 ● 2000年WDLワークショップをきっかけとして、二大国際会議ICDLとEpiRobが発足、2011年に2つはIEEE ICDL-EpiRobに統合 ● 国内ではJST ERATO浅田共創知能システムプロジェクトが研究発展を牽引 <p>研究領域の広がり</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 個体単体での認知発達：身体の運動能力の発達を身体・外界の力学的な相互作用から理解、胎児や新生児の発達過程をシミュレーション検証 ● 個体間の相互作用を通じた認知発達：生態的自己→対人的自己→社会的自己という3段階、ミラーニューロン(ある行動を自分で行う場合と他者が行う場合の双方に反応する神経細胞)が重要な役割 ● 予測符号化：現時刻・空間の信号から将来や未知空間の信号を予測できるように、予測誤差最小化原理に基づき、その対応関係(内部モデル)を学習 ● 記号創発ロボティクス：身体性に基づく言語獲得プロセスを機械学習のモデルを用いて表現し、ロボットに実装して構成論的に理解 <p>研究開発のためのプラットフォーム</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 子供サイズのヒューマノイド型のロボットプラットフォームiCubやNAO、国内では、トヨタHSRやロボットシミュレーターSIGVerse、コンペティション等の基盤に <p>注目される技術トピックス</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 予測符号化・自由エネルギー原理：認知発達の共通メカニズムとして期待 ● 自他認知と共感・意識：身体性・他者との関係の中で情動・主観面に対して構成論的にアプローチ ● 他者・環境とのインタラクションによる記号創発・言語獲得、集成的予測符号化 	<p>科学技術的課題</p> <p>①認知発達のさまざまな側面の原理探究</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 感覚・運動・社会性・言語・推論・共感・意識等の認知発達の各側面の解明はまだ部分的で、基礎的な実験・試作が継続して必要 ● 深層学習ベースの大規模な基盤モデルとの対比、身体性や環境との相互作用という面からの探究が重要 <p>②総合的な認知発達モデルの構築と自律・発達するロボットの設計論の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 部分的に分かってきた原理を組み上げて、総合的な認知発達モデル、自律・発達するロボットの設計論を構築、それを牽引する新たなフラグシッププロジェクト <p>③認知発達ロボティクスの応用開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 人間との親和性・共生能力の高いAI応用システムやロボットの実現 ● 発達障害(ASD)、精神・神経疾患の解明や治療・予防への貢献 <p>政策的課題</p> <p>①学際的な研究推進・人材育成</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 発達心理学・神経科学等とAI・ロボティクス等の融合 ● ソフトウェアからハードウェアやデバイスまでのシステム的な垂直統合 <p>②倫理的・法的・社会的課題(ELSI)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 自律的発達に関わる安全性・制御可能性の懸念 ● 人間の認知発達過程の理解が進んだとき、その活用に関する倫理的な配慮が必要になること ● 人間に特徴的な言語獲得を含む自律的な認知発達を伴うロボットやAIシステムが実現されたときに、人間はそれをどう受け止めるかという心理的な問題 <p>③長期的基礎研究投資のマネジメント</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 基礎科学的側面と工学的側面のバランス

図 2-1-12 領域俯瞰：認知発達ロボティクス

(2) キーワード

認知発達、身体性、社会的相互作用、知覚・運動能力獲得、言語獲得、記号創発、予測符号化、予測誤差最小化原理、自由エネルギー原理、ミラーニューロンシステム、共感、意識、発達障害、構成論的手法、ロボット設計論

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

現在実用化されているAI・ロボティクスの応用システムと人間の知能を比べると「発達」という面に大きなギャップがある。例えば、現在多くのAI応用システムで用いられているのは教師あり学習技術であるし、現在の産業用ロボットの動作はプログラムで明示的に規定されたことを繰り返しているにすぎない。それに対して人間は、生まれてから幼児期に、明示的な刺激と認識結果の対応関係としての教師データを与えられずとも、外界のものを認識して行動する能力や、言語を話し理解する能力を獲得していく。そのような人間の知能の発

達という面が、現在のAI・ロボティクスの技術ではまだほとんど実現できていない。そして、この発達に大きく関わるのが身体性や身体的・社会的相互作用だと考えられている。

認知発達ロボティクスは、この点に着目し、身体性や身体的・社会的相互作用を持つ人間の知能の発達メカニズムの解明と実装を目指している。この取り組みによって上述のギャップが縮められれば、自律的にさまざまな認知能力を発達させることができ、人間との親和性・共生能力の高いAI応用システムやロボットが実現可能になる。例えば、家庭・工場などの各環境において、個別に事前設定・事前学習をせずとも、人間との対話を含む日々のマルチモーダルなインタラクションを通して、扱える語彙や認識できる対象を増やし、より適切な応答・行動ができるように発達するロボットやAI応用システムが実現可能になるであろう。

また、人間の知能の発達メカニズムの理解が進むことで、人間に関わるさまざまな学問の発展にもつながる。特に、発達障害、精神・神経疾患の解明や治療・予防への貢献が期待される。他にも、言語学・心理学などとの関わりも深く、また、育児・保育・教育などへの示唆も得られるかもしれない。

脳科学が発展し、脳の状態に関するさまざまなデータ取得と分析、および、それに基づく脳機能の詳細把握が進みつつあるが、人間の知能という複雑なシステムを分析的アプローチだけで捉えるのには限界がある。そこで、対象を観測・分析して記述する分析的アプローチだけでなく、対象を模したシステムを作って動かしてみることで理解する構成論的アプローチとして、認知発達ロボティクスの役割は重要である。

【研究開発の動向】

① 研究コミュニティの形成

認知発達ロボティクスは、上で述べた「発達」の重要性認識に基づいて2000年頃に提唱され、AI・ロボティクスと発達心理学・神経科学などの学際的研究領域として発展してきた^{1), 2), 3)}。この提唱・立ち上げの段階から、浅田稔、石黒浩、國吉康夫、谷淳をはじめとする日本の研究者が大きな役割を果たしてきた。

研究コミュニティの立ち上がりと言える最初のイベントは、2000年4月に開催されたWorkshop on Development and Learning (WDL) である。AI・ロボティクス側から発達に興味を持つ研究者と、人間の側の発達心理学に取り組む研究者が会する機会となった。このWDLをきっかけとして、国際会議 International Conference on Developmental Robotics (ICDL) が設立された。「発達ロボティクス (Developmental Robotics)」という言葉が公式の場で初めて使われたのがこのときだと言われている。

続いて、2001年9月に第1回の International Workshop on Epigenetic Robotics (EpiRob) が開催され、ICDLとEpiRobが認知発達ロボティクスの二大国際学術イベントとなった。その後、2011年にこの二つは統合され、International Conference on Developmental and Learning and on Epigenetic Robotics (IEEE ICDL-EpiRob) が組織され、この研究領域の中心的な研究コミュニティとなっている。

認知発達ロボティクスの日本国内における研究発展を牽引したのが、JST ERATO 浅田共創知能システムプロジェクト (研究総括：浅田稔、研究期間：2005年9月～2011年3月) である⁴⁾。身体的共創知能、対人的共創知能、社会的共創知能、共創知能機構という四つのグループで取り組まれ、いくつかの認知発達過程のモデル化と関与する脳内基盤の対応付けが行われ、また、2歳児までの運動発達プロセスの機能が実装され、ロボット研究者のみでなく幅広い分野の研究者が使用可能な各種ロボットプラットフォームが開発された。

② 研究領域の広がり

このような取り組みの中で、人間の知能の発達のさまざまな側面が研究対象として扱われてきている。まず個体単体での認知発達という側面と、個体間の相互作用を通じた認知発達という側面がある。前者については、例えば、はいはい、寝返り、つかまり立ち、2足歩行、走行、ジャンプなどの身体の運動能力の発達を、身体の特性・制約や外界との力学的な相互作用との関わりから捉えたり、胎児や新生児の発達過

程をシミュレーションによって検証したりといったことが取り組まれている。後者については、個体間の相互作用を通じた認知発達の段階として、生態的自己、対人的自己、社会的自己という3段階があると考えられている。生態的自己は身体と環境の同調を通じた自己の萌芽、対人的自己は養育者からの同調を通じた自他の同一視、社会的自己は複数者との同調・脱同調を通じた自他分離という段階である。このような自他認知の発達においては、ミラーニューロン⁵⁾と呼ばれる脳内の要素¹が重要な役割を果たしていると考えられ、これを鍵としたメカニズムの理解が進んでいる。

また、他者との相互作用においては、コミュニケーションの発達が重要な側面になる。養育者の働きかけによるコミュニケーション発達では、音声模倣、共同注意、共感発達、応答的視線などが着目されている。さらに、人間の社会的コミュニケーションにおいて特に重要なのは言語獲得である。言語は、他者とのコミュニケーションに用いられるだけでなく、推論や想像といった高次の思考に用いられるという点でも、人間の認知発達において重要な役割を持っている。認知発達に対する構成論的アプローチにおいて、特に言語獲得や社会における言語形成にフォーカスした取り組みは、記号創発ロボティクス (Symbol Emergence in Robotics)^{6), 7)} と呼ばれる。記号創発とは、環境や他者との相互作用を通して、記号系をボトムアップに組織化していくプロセスのことであり²、身体性に基づく言語獲得プロセスということもできる。この記号創発のプロセスを機械学習のモデルを用いて表現し、ロボットに実装して構成論的に理解しようという取り組みが進められている。

以上のような認知発達の原理・理論の検討と並行して、研究開発を推進するための共通基盤として、ロボットプラットフォームやシミュレーターの整備も進められてきた。特に認知発達ロボティクスの研究では、子供サイズのヒューマノイド型のロボットプラットフォームが開発されている²⁾。イタリア技術研究所 (IIT) を中心とした欧州の共同研究によって開発された iCub は、オープンソースプラットフォームとして世界30以上の機関で利用されている。フランスの Aldebaran Robotics 社 (現在は SoftBank Robotics Europe) によって開発・市販された NAO は、2008年から RoboCup (ロボットによるサッカー競技会) の標準プラットフォームにも採用され、最も広く普及しているロボットプラットフォームとなっている。国内では、JST ERATO 浅田共創知能システムプロジェクトで開発された CB² があり、認知発達ロボティクス研究用途に特化され、柔らかいシリコン皮膚を持つことが特徴で、胎児・新生児シミュレーターも開発されている。また、トヨタ自動車 (株) の生活支援ロボット HSR (Human Support Robot) が、研究機関 (HSR 開発コミュニティ) 向けに貸与されており、ヒューマノイド型ではないが、認知発達ロボティクス研究にも活用されている。ロボットシミュレーターとしては、国立情報学研究所 (NII) の稲邑研究グループで開発された SIGVerse が広く活用されており、RoboCup@Home や World Robot Summit など、研究発展に大きく寄与してきたコンペティションイベントでも使われている。

③ 海外動向

認知発達ロボティクスは日本発の研究領域であり、国際的な研究コミュニティの中核となっている研究者が多く、研究領域を先導する取り組みがなされている (具体的な取り組み事例は [新展開・技術トピックス] の項を参照)。

海外では、イタリア、英国、ドイツ、フランスなど、欧州で取り組みが進められている。イタリアには、上

1 ミラーニューロン (Mirror Neuron) は、他者がとった行動を見ても、自分が同じ行動を行っても、同じように反応する神経細胞である。詳細は [新展開・技術トピックス] ②で説明する。

2 AIの基本問題として記号接地問題 (Symbol Grounding Problem) が知られているが、この場合、記号系が先にありきで、それを現実世界に關係付ける問題と捉えているようなところがある。それに対して記号創発は、記号系ありきではなく、現実世界のものにどうラベル (記号) を与えるかは環境依存で創発的だと考える。実際に地域・環境によって違いが生じる言語の多様性にも馴染む認知発達視点の考え方である。谷口忠大はこれを記号創発問題³⁾として再定義している。

で述べたようにiCubの中核研究機関となっているIITがある。英国は、EU FP7プログラムの中でITALKプロジェクト (Integration and Transfer of Action and Language Knowledge in Robots、2008年3月～2012年2月)を実施し、特に言語発達の側面に重きを置いて取り組んでいる。ドイツでは、ビーレフェルト大学が2007年に認知インタラクション技術分野で国の研究拠点CITEC (Cluster of Excellence Cognitive Interaction Technology、日本のCOEプログラムに相当)に選ばれ、CSRAプロジェクト (The Cognitive Service Robotics Apartment as Ambient Host、2013年10月～2018年12月)が実施された。フランスには、上で述べたNAOの開発元であるAldebaran Robotics社 (現在はSoftBank Robotics Europe)があることに加えて、国立情報学自動制御研究所 (INRIA)で内発的動機付けを含む基礎研究に取り組まれている。

米国・中国は、認知発達ロボティクス分野で目立った取り組みが見られない。深層学習を中心とする現在のAI技術開発では米中2強といわれるほど、研究投資額・国際学会採択件数などで米中が圧倒的な状況にあるが、逆にその競争が非常に激化していることが、当分野への関心が薄い要因になっているのかもしれない。ただし、深層学習研究の発展として、言語獲得・記号推論まで統合的に扱えるような枠組みへの拡張が検討され始めており⁹⁾、認知発達の面への取り組みと見ることができ (米国・カナダなど)。また、AI関連のトップランク国際会議の一つであるICLR (International Conference on Learning Representations)で、言語学習や内部表現の学習、発達の機械学習に関する研究成果が発表されるようになってきていることも、同様の動きを表している。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

ニューラルネットワークがAIの基本的なモデルとなり、「知覚・運動系のAI技術」(2.1.1節)、「言語・知識系のAI技術」(2.1.2節)、「計算脳科学」(2.1.7節)と、本節で扱う「認知発達ロボティクス」の間で共通する話題が増えている。それを踏まえて、ここでは認知発達ロボティクスらしい身体性に基づく話題として、予測符号化と自由エネルギー原理、自他認知と共感・意識、他者や環境とのインタラクションによる記号創発・言語獲得に注目する。

① 予測符号化と自由エネルギー原理

乳幼児は生後数年の間に、自己の認知や物体操作、他者とのコミュニケーションなど、さまざまな認知機能を獲得する。これらの認知発達には一見別々のメカニズムが働いているように思われるが、実は感覚・運動情報の予測符号化という共通メカニズムによって理解できそうだということが分かってきた¹⁰⁾。予測符号化 (Predictive Coding)¹¹⁾とは、現時刻・空間の信号から、将来や未知空間の信号を予測できるように、その対応関係 (内部モデル)を学習することである。そこでは予測誤差最小化原理が働き、身体や環境からの感覚信号と、脳が内部モデルをもとにトップダウンに予測する感覚信号との誤差を最小化するように、内部モデルを更新したり、環境に働きかけるような運動を実行したりする。

このような考え方は、自由エネルギー原理 (Free-Energy Principle)^{12), 13), 14), 15)}としてより一般化されている。これは「生物は感覚入力の予測しにくさを最小化するように内部モデルおよび行動を最適化し続けている」という仮説であり、ここでいう「予測のしにくさ」は、内部モデルに基づく知覚の予測と実際の知覚の間の予測誤差を意味し、変分自由エネルギーと呼ばれるコスト関数で表現されるというものである。さまざまな推論・学習、行動生成、認知発達過程を統一的に説明する原理になり得ると注目されている。

予測符号化の具体的な応用として、ロボットの動作制御^{16), 17)}や発達障害の理解と支援¹⁰⁾への取り組みが知られている。前者については「2.1.1 知覚・運動系のAI技術」で取り上げているので参照いただきたい。後者については、自閉スペクトラム症 (ASD)を予測誤差に対する感度の面からモデル化し、非ASD者がASD者の視覚を模擬体験できるASDシミュレーターが開発された。これにより、ASD者は予測

誤差に対する感度が過小もしくは過大であることが、環境変化に対する過敏さや鈍感さを生み、社会的コミュニケーション・対人関係に支障を生んでいるという理解が促された。

② 自他認知と共感・意識

予測符号化が認知発達をもたらすに際しては、ミラーニューロンシステムの働きが関わっていると考えられる。ミラーニューロン⁵⁾は、他者が取った行動を見ても、自分が同じ行動を行っても、同じように反応するニューロン（神経細胞）であり、サルや人間で発見されている。生後間もない乳幼児は感覚・運動能力が未熟なため、ミラーニューロンの反応で自己と他者が未分化な状態にあるが、感覚・運動情報の予測符号化を通して、自己と他者を予測誤差の大きさに基づいて識別するようになる。さらに、自己を認知できるようになると、身体を意図的に動かすことを学び、物体操作の能力を獲得する。この際にも予測誤差最小化原理に基づいて、目的指向動作を学習する。続いて、自己の運動経験に基づいて内部モデルが形成され、それを用いた他者の運動の予測が可能になっていく。そして、他者運動の予測と、他者起因の予測誤差を引き金とした運動の生成が、利他的行動にもつながると考えられるようになった。他者起因の予測誤差の最小化のための自己運動として、他者の模倣や援助行動が生まれるというものである。

さらに、自他認知の発達と並行して起こる共感の発達のモデル化が試みられ、人工共感の設計が論じられている¹⁸⁾。まず物理的身体性に基づく他者運動の「ものまね」から自動的・無意識的な情動伝染が引き起こされる。情動伝染からさらに自身への気づきに基づき、他者の情動状態とは必ずしも一致するとは限らない情動的共感や認知的共感が生まれる。情動的共感は、身体化シミュレーションを通じて生まれ、認知的共感は、他者視点獲得や他者の心の理解に基づいて生まれる。

また、「意識」に関する計算論的モデルとして「統合情報理論」¹⁹⁾や「グローバルニューロナルワークスペース」²⁰⁾などが提案されていることを「2.1.7 計算脳科学」の中で述べた。これに対して、認知発達ロボティクスにおいては、身体性を踏まえた他者の痛覚への共感という面から「意識」を捉えようとする試みがある²¹⁾。

このように、身体性に基づく他者との関係の中で、共感や意識など情動・主観面に対して構成論的にアプローチする試みは、認知発達ロボティクスらしい取り組みとして注目される。

③ 記号創発・言語獲得

[研究開発の動向]②の中で言及した通り、身体性に基づき、実世界における環境や他者やとのマルチモーダルな相互作用から言語獲得する過程のモデル化が、記号創発ロボティクスの研究^{6), 7)}として取り組まれている。ここでは、恣意性を基本的性質として持つ記号（言語を含む）の体系が、環境や他者との相互作用としてのマルチモーダル情報から、ボトムアップなクラスタリングによって創発的に形成される過程が、深層確率的生成モデルを用いたモデル化するアプローチなどが採られている。例えば、ロボットなどで自己位置推定とその置かれた環境の地図構築を同時に行う技術SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）を拡張して、ボトムアップに場所概念・語彙を獲得するSpCoSLAM（Online Spatial Concept and Lexical Acquisition with SLAM）が開発された。「2.1.1 知覚・運動系のAI技術」では、環境との相互作用として得られる限られた感覚・運動情報をもとに、主観的な世界のモデル化・表現学習を行う「世界モデル」(World Models)の研究^{22), 23), 24)}が活発化していることを述べたが、これと重なる取り組みと考えられる。ただし、記号創発・言語獲得においては、記号体系・語彙セットが他者³と共有されることが本質的に重要である。この点に関して、集団による表現学習（その試みとしてメトロポリスヘイスティング名付けゲーム）や集合的予測符号化という捉え方が示されており²⁵⁾、注目される。

3 同質な集団ではなくヘテロ性を持つ集団の中の他者。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

① 国内における認知発達ロボティクス関連プロジェクト

国内では、[研究開発の動向] ①で述べたように、JST ERATO 浅田共創知能システムプロジェクト (2005年9月～2011年3月) が認知発達ロボティクス研究の立ち上げを牽引したのに続いて、近年は同じ科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業CRESTの中で、以下のプロジェクトが推進されてきた。

「記号創発ロボティクスによる人間機械コラボレーション基盤創成」(研究代表者:長井隆行、2015年度～2020年度): 記号創発ロボティクスのアプローチに基づき、人間とロボットの調和的協働による日常的タスク実行。

- ・「認知ミラーリング: 認知過程の自己理解と社会的共有による発達障害者支援」(研究代表者:長井志江、2016年度～2021年度): 予測符号化に基づき発達障害を理解、ASDシミュレーターを開発。
- ・「脳領域/個体/集団間のインタラクション創発原理の解明と適用」(研究代表者:津田一郎、2017年度～2022年度): 認知発達ロボティクスにおける重要な概念である機能分化の創発原理を探究。
- ・「知覚と感情を媒介する認知フィーリングの原理解明」(研究代表者:長井志江、2021年度～2026年度): マルチモーダルな知覚と情動的感覚の動作原理を予測情報処理理論に基づいて統一的に解明。

上記2件目の研究が4件目へつながったほか、1件目の研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「人と共に進化する次世代人工知能に関する技術開発事業」(PL:辻井潤一、2020年度～2024年度) に採択された「説明できる自律化インタラクションAIの研究開発と育児・発達支援への応用」や、ムーンショット目標1のプロジェクト「誰もが自在に活躍できるアバター共生社会の実現」(PM:石黒浩、2021年度～) における課題4「CA協調連携の研究開発」につながっている。

② INRIAのFlowersプロジェクト

フランスの国立情報学自動制御研究所 (INRIA) のPierre-Yves OudeyerをヘッドとするFlowersプロジェクトでは、発達のメカニズムに関する基礎的な理解を深めるため、発達心理学や神経科学との強い連携のもと、内発的動機付けによる深層強化学習などの高度な機械学習技術を活用した計算モデルの開発を進めている。特に、好奇心駆動型学習と呼ばれる内発的動機付けによる学習・探索のモデルに着目し、エージェントが自らの目標を表現・生成したり、限られた時間・エネルギー・計算機リソースの中で世界モデルを学習したり言語能力などを獲得したりするメカニズムを研究している。

置かれた環境の中でロボットやエージェントがなぜ学習するのか、という根源的な問いは認知発達において重要である。特に、外部からの報酬を獲得する動機付けだけでなく、自身で内部から報酬を生成するメカニズムとなる内発的動機付け (Intrinsic Motivation) は、近年注目される研究課題である^{26), 27)}。

(5) 科学技術的課題

① 認知発達のさまざまな側面の原理探究

本研究開発領域は、基礎的な研究として、感覚・運動・社会性・言語・推論・共感・意識などの認知発達のさまざまな側面について、その原理を探究する取り組みが進められているが、まだ分かってきたことは部分的である。ここまで動向・トピックとして挙げたような研究開発をいっそう発展させる中で、発達のさまざまな側面をより広く正確にカバーする原理を考え、それを検証する基礎的な実験・試作に引き続き取り組んでいくことが必要である。

2020年前後から深層学習モデルの超大規模化とそれによる汎用性の向上が著しい。これは「基盤モデル」(Foundation Model)²⁸⁾と呼ばれている (詳細は「2.1.2 言語・知識系のAI技術」を参照)。基盤モデルは大量の学習データの統計に基づくものであり、言語の意味も理解していないといわれる。また、認知発達ロボティクスは、身体性に基づく環境との相互作用や認知発達という「子供の学習過程のモデル」に重点を置いているのに対して、基盤モデルは、大量データによる一括学習が完了した状態の「大人の学習

結果のモデル」である。しかし、基盤モデルでは、超大規模学習による抽象化や推論的な面が、それまでの深層学習モデルよりも格段に高まっているようにも見える。基盤モデルの性質を認知発達・記号創発の観点から分析してみると²⁹⁾も有用であろう。

また、[新展開・技術トピックス]の冒頭で述べたように、機械学習や計算脳科学との重なりが大きくなってきている中で、認知発達ロボティクスは身体性や環境との相互作用を扱っている点が大きな特徴であり、この点からのさらなる発展が期待される。

② 総合的な認知発達モデルの構築と自律・発達するロボットの設計論の開発

認知発達のさまざまな側面に関してこれまでに得られている原理・理論はまだ部分的・断片的なものである。つまり、発達過程の時系列の一断面を扱って、その時刻における発達課題を取り上げてきたものの、時系列を通した本来の意味での発達そのものは、まだ本格的に扱えていない。上記①を探究しつつ、それらを組み上げることで、総合的な認知発達モデルを構築することは、今後の大きな課題である。そして、その総合的な認知発達モデルに基づき、自律・発達するロボットの設計論を作り上げていくことが、認知発達ロボティクスの中長期的な大目標である。

また、[注目すべき国内外のプロジェクト]①に示したように、現在、認知発達ロボティクス関連で取り組まれている国内プロジェクトは、認知発達ロボティクス研究のある側面を取り出したもので、上に書いたような総合的なモデル・設計論を牽引するものではないよう思える。上記①に書いたような基盤モデルのような方向性との対比や、後述する社会的な視点を考えていくべきフェーズであることを考えると、認知発達ロボティクスの立ち上げフェーズをJST ERATO 浅田共創知能システムプロジェクトが牽引したように、新たなフラグシッププロジェクトが望まれる段階なのかもしれない。

③ 認知発達ロボティクスの応用開発

認知発達ロボティクスの原理を用いることで、個別に事前設定・事前学習をせずとも、置かれた環境の中でのインタラクションを通して自律的に能力を発達させることができ、人間との親和性・共生能力の高いAI応用システムやロボットが実現可能になると期待される。最終的に総合的な認知発達モデルやロボット設計論ができるのを待たずとも、発達のある側面を捉えた部分的な原理であっても、産業の現場や家庭での応用場面を限定すれば、適用できるシーンがあるかもしれない。さらには、前述した発達障害(ASD)の支援のような形で役に立つシーンも広がり得る。このような応用・活用の可能性を見だし、そのためのシステムを開発し、効果を検証していく取り組みも重要である。

また、ロボティクス分野で注目されているソフトロボティクスとの関りも深い。従来の硬いロボットの制御では、絶対座標系を想定したトップダウンな制御則をベースにしているが、ソフトロボティクスをその枠組みで扱うのは難しい。しかし、実はこの難しさを生み出しているダイナミズムや多様性が、インタラクションを豊かなものにし、認知発達を可能にしているのである。環境とのインタラクションからボトムアップに創発・学習する認知発達ロボティクスの枠組みが、ソフトロボティクスの発展にも大きく寄与するはずである。

(6) その他の課題

① 学際的な研究推進・人材育成

認知発達ロボティクスは、発達心理学や神経科学などの経験主義的な学問分野と、AI・ロボティクスなどの構成論的な学問分野が融合した学際的な研究領域である。また、実際にシステムを開発して動かす上

では、ソフトウェアからハードウェアやデバイスまでのシステム的な垂直統合も必要になる⁴。従来と異なるタイプのシステムができることから、人間・社会的側面からの検討も求められる。このようなさまざまな技術・知識が必要になることから、分野横断・学際的な研究の推進やそのための人材育成が重要になる。

② 倫理的・法的・社会的課題 (ELSI)

認知発達ロボティクスの研究に関わるELSI面の課題も考えていく必要がある⁵。「2.1.9 社会におけるAI」で述べるように、AI技術全般に関して、説明性・公平性・透明性・安全性・信頼性などの社会からの要請 (AI社会原則・AI倫理指針といった形で文章化されるようになった) を充足することが求められているが、認知発達ロボティクスに関して特に検討が必要になるとされる点を以下に挙げる。また、このような議論の基礎として、人間やロボットの自律性そのものに関する考察^{31), 32)} や人間・社会とロボット間のトラスト構築³³⁾ も重要である。

第1点は、自律的発達に関わる安全性・制御可能性の懸念である。AIシステムやロボットが自律的に発達できるようになったとき、その発達が人間や社会にとって好ましくない方向に進んでしまう可能性はないのか、その方向を人間が制御することは可能かという問題への対処を考えていく必要がある。

第2点は、人間の認知発達過程の理解が進んだとき、その活用に関する倫理的な配慮が必要になることである。既に取り組みされている発達障害 (ASD) に対する支援は社会的に意義のある活用先だが、それとは異なる活用の仕方として、例えば、乳幼児の発達過程に対して何らかの操作を行おうとしたら、倫理的に許容されるレベルについて議論になるかもしれない。

第3点は、人間に特徴的な言語獲得を含む自律的な認知発達を伴うロボットやAIシステムが実現されたときに、人間はそれをどう受け止めるかという心理的な問題である。人間と類似することで、人間が共感や親しみやすさを感じる可能性がある反面、「不気味の谷」といわれるギャップも感じ得る。また、発達によってその振る舞いが決まっていくということは、人間にとってブラックボックスで理解できない不安な相手となるかもしれない。何か問題が発生したときに、その責任を、人間は自律性を持ったロボット側 (ひいては開発者側) に負わせようとする心理が働くといった懸念もあり³²⁾、第1点と合わせて法的な面にも関わりが生じる。

③ 長期的基礎研究投資のマネジメント

(5) 科学技術的課題の項でも述べたように、認知発達過程の全般の解明・理解や自律的に発達するロボットの設計論の構築は、長期的な取り組みを必要とする基礎研究テーマである。その一方で、AI・ロボティクスは産業応用も含めて技術開発競争が激化しており、認知発達ロボティクスの研究成果や知見の取り込みに期待を寄せるが、短期的な成果の刈り取りを求めがちである。また、基礎的な実験を行いながら認知発達の原理を探究する基礎科学的な側面と、ロボットの上に実装して動かすことで新たな知見を得たり、現システムの課題を解決したり、応用の可能性を見いだしたりといった工学的な側面がある。このような異なる性格・側面を有する研究領域に対して、どのようなバランスで研究投資を行い、マネジメントしていくのが適切かについても考えていく必要がある。

4 このような面に取り組んだプロジェクトとして、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発」事業のファンドによる「未来共生社会にむけたニューロモルフィックダイナミクスのポテンシャルの解明」(研究代表者: 浅田稔、研究期間: 2018年10月~2023年3月) がある。

5 このような面に取り組んだプロジェクトとして、JST RISTEX「人と情報のエコシステム」事業のファンドによる「自律性の検討に基づくなじみ社会における人工知能の法的電子人格」(研究代表者: 浅田稔、研究期間: 2017年10月~2021年3月) がある³⁰⁾。

(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	○	↗	認知発達ロボティクスの提唱国であり、研究コミュニティを主導する中核研究者が複数いて、重要な研究成果も出されている。認知発達過程の解明に向けては、現状まだ部分的な成果にとどまっているが、JST CRESTなどを活用した複数のプロジェクトが推進されている。
	応用研究・開発	○	↗	日本に限らず自律的に発達するロボットの実現にはまだ遠い状況だが、予測誤差最小化原理に基づく発達障害（ASD）の支援のような応用事例は注目される。
米国	基礎研究	△	→	深層学習を中心とする現在のAI技術開発でリードしており、AI基礎研究への大型投資（DARPAのAI Nextなど）も行われているが、認知発達過程を探究しようというプロジェクトはほとんど見当たらない。ただし、深層学習研究の発展として、言語獲得・記号推論まで統合的に扱えるような枠組みへの拡張が検討され始めており、認知発達の面への取り組みと見ることができる。また、脳科学の知見をAIに生かそうとする取り組みは見られる。
	応用研究・開発	△	↘	上記の傾向から、認知発達の視点からの応用研究はまだ見られない。
欧州	基礎研究	○	→	イタリア技術研究所（IIT）、フランスでFlowersプロジェクトを進めている国立情報学自動制御研究所（INRIA）、英国でTHRIVE++プロジェクトを進めているマンチェスター大学、ドイツのビーレフェルト大学CITECなどで認知発達の基礎研究が取り組まれている。
	応用研究・開発	○	→	フランスのAldebaran Robotics社（現在はSoftBank Robotics Europe）のNAOは、認知発達ロボティクスの実装プラットフォームとして、世界で最も広く活用されている。イタリアのIITが中心となって開発していたiCubもロボットプラットフォームとしてよく知られている。NAOがRoboCupに使われているように、ロボットプラットフォームを保有していることは、応用開発・展開において優位なポジションと言える。
中国	基礎研究	△	↘	AI分野の国際学会での論文採択数は米中2強となっており、深層学習を中心とした現在のAI技術開発には大規模な研究投資が行われている。しかし、米国と同様に、認知発達過程を探究しようという取り組みはほとんど見られない。
	応用研究・開発	△	↘	基礎研究の項と同様である。ただし、中国は応用開発のスピードが極めて速く、認知発達の応用が開けてくると、急参入の可能性はある。
韓国	基礎研究	△	↘	特筆すべき取り組みは見られない。
	応用研究・開発	△	↘	特筆すべき取り組みは見られない。

(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) 浅田稔, 『ロボットという思想：脳と知能の謎に望む』(NHK出版, 2010年) .
- 2) Angelo Cangelosi and Matthew Schlesinger, *Developmental Robotics: From Babies to Robots* (The MIT Press, 2015). (邦訳：岡田浩之・谷口忠大・他, 『発達ロボティクスハンドブック：ロボッ

トで探る認知発達の仕組み』, 福村出版, 2019年)

- 3) Angelo Cangelosi and Minoru Asada (editors), *Cognitive Robotics* (The MIT Press, 2022).
- 4) 浅田稔, 「共創知能を超えて—認知発達ロボティクスによる構成的発達科学の提唱—」, 『人工知能』(人工知能学会誌) 27巻1号 (2012年1月), pp. 4-11.
- 5) Giacomo Rizzolatti and Corrado Sinigaglia, *Mirrors in the Brain: How Our Minds Share Actions and Emotions* (Oxford University Press, 2008). (邦訳: 柴田裕之・茂木健一郎, 『ミラーニューロン』, 紀伊國屋書店, 2009年)
- 6) 谷口忠大, 『記号創発ロボティクス: 知能のメカニズム入門』(講談社, 2014年).
- 7) 谷口忠大, 『心を知るための人工知能: 認知科学としての記号創発ロボティクス』(共立出版, 2020年).
- 8) 谷口忠大, 「記号創発問題—記号創発ロボティクスによる記号接地問題の本質的解決に向けて—」, 『人工知能』(人工知能学会誌) 31巻1号 (2016年1月), pp. 74-81.
- 9) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター, 「戦略プロポーザル: 第4世代AIの研究開発—深層学習と知識・記号推論の融合—」, CRDS-FY2019-SP-08 (2020年3月).
- 10) 長井志江, 「認知発達の原理を探る: 感覚・運動情報の予測学習に基づく計算論的モデル」, 『ベビーサイエンス』15巻 (2016年3月), pp. 22-32.
- 11) Rajesh P. N. Rao and Dana H. Ballard, “Predictive coding in the visual cortex: a functional interpretation of some extra-classical receptive-field effects”, *Nature Neuroscience* Vol. 2 (1999), pp. 79-87. DOI: 10.1038/4580
- 12) Karl J. Friston, James Kilner and Lee Harrison, “A free energy principle for the brain”, *Journal of Physiology-Paris* Vol. 100, Issues 1-3 (July-September 2006), pp. 70-87. DOI: 10.1016/j.jphysparis.2006.10.001
- 13) Karl J. Friston, “The free-energy principle: a unified brain theory?”, *Nature Reviews Neuroscience* Vol. 11, No. 2 (January 2010), pp. 127-38. DOI: 10.1038/nrn2787
- 14) 磯村拓哉, 「自由エネルギー原理の解説: 知覚・行動・他者の思考の推論」, 『日本神経回路学会誌』25巻3号 (2018年), pp. 71-85. DOI: 10.3902/jnns.25.71
- 15) 乾敏郎・阪口豊, 『脳の大統一理論: 自由エネルギー原理とはなにか』(岩波書店, 2020年).
- 16) 尾形哲也, 「深層予測学習を利用したロボット動作学習とコンセプト」, 『人工知能』(人工知能学会誌) 35巻1号 (2020年1月), pp. 12-17.
- 17) 尾形哲也・他, 「特集: 予測に基づくロボットの動作学習」, 『日本ロボット学会誌』40巻9号 (2022年11月), pp. 701-806.
- 18) 浅田稔, 「情動発達ロボティクスによる人工共感設計に向けて」, 『日本ロボット学会誌』32巻8号 (2014年), pp. 555-577.
- 19) Marcello Massimini and Giulio Tononi, *Nulla di più grande* (Baldini + Castoldi, 2013). (邦訳: 花本知子訳, 『意識はいつ生まれるのか: 脳の謎に挑む統合情報理論』, 亜紀書房, 2015年)
- 20) Stanislas Dehaene, *Consciousness and the Brain: Deciphering How the Brain Codes Our Thoughts* (Viking, 2014). (邦訳: 高橋洋訳, 『意識と脳: 思考はいかにコード化されるか』, 紀伊國屋書店, 2015年)
- 21) Minoru Asada, “Artificial Pain May Induce Empathy, Morality, and Ethics in the Conscious Mind of Robots”, *Philosophies* Vol. 4, Issue 3 (2019). DOI: 10.3390/philosophies4030038
- 22) David Ha, Jürgen Schmidhuber, “World Models”, arXiv: 1803.10122 (2018).
- 23) Karl Friston, et al., “World model learning and inference”, *Neural Networks* Vol. 144 (December 2021), pp. 573-590. DOI: 10.1016/j.neunet.2021.09.011
- 24) 谷口忠大・他, 「世界モデルと予測学習によるロボット制御」, 『日本ロボット学会誌』40巻9号 (2022

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
人工知能・ビッグデータ

- 年11月), pp. 790-795.
- 25) 谷口忠大, 「分散的ベイズ推論としてのマルチエージェント記号創発」, 『日本ロボット学会誌』 40巻10号 (2022年12月), pp. 883-888.
- 26) 浅田稔, 「内発的動機付けによるエージェントの学習と発達」, 『計測と制御』(計測自動制御学会誌) 52巻12号 (2013年12月), pp. 1129-1135. DOI: 10.11499/sicejl.52.1129
- 27) Pierre-Yves Oudeyer, Frdric Kaplan, and Verena V. Hafner, “Intrinsic Motivation Systems for Autonomous Mental Development”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* Vol. 11, Issue 2 (April 2007), pp. 265-286. DOI: 10.1109/TEVC.2006.890271
- 28) Rishi Bommasani, et al., “On the Opportunities and Risks of Foundation Models”, arXiv: 2108.07258 (2021).
- 29) 谷口忠大, 「現代の人工知能と「言葉の意味」。そして記号創発システム。」, REPRE (表象文化論学会ニューズレター) 45号 (2022年6月) .
- 30) 浅田稔, 「なじみ社会構築に向けて:人工痛覚がもたらす共感, 道徳, そして倫理」, 『日本ロボット学会誌』 37巻4号 (2019年5月), pp.287-292. DOI: 10.7210/jrsj.37.287
- 31) 浅田稔, 「再考:人とロボットの自律性」, 『日本ロボット学会誌』 38巻1号 (2020年1月), pp.7-12. DOI: 10.7210/jrsj.38.7
- 32) 河合祐司, 「ロボットへの原因と責任の帰属」, 『日本ロボット学会誌』 38巻1号 (2020年1月), pp. 32-36. DOI: 10.7210/jrsj.38.32
- 33) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター, 「戦略プロポーザル: デジタル社会における新たなトラスト形成」, CRDS-FY2022-SP-03 (2022年9月) .