

特集 「認知科学と記号創発ロボティクス：実世界情報に基づく知覚的シンボルシステムの構成論的理解に向けて」

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—

Symbol Emergence Problem

— Solution to the Root of the Symbol Grounding Problem Based on Symbol Emergence in Robotics —

谷口 忠大
Tadahiro Taniguchi

立命館大学情報理工学部
College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University.
taniguchi@ci.ritsumeai.ac.jp, <http://em.ci.ritsumeai.ac.jp/>

Keywords: symbol emergence, semiotics, symbol grounding, emergent system, cognitive developmental robotics.

1. はじめに

人工知能分野にはフレーム問題であるとか、記号接地問題であるとか、基本問題として置かれる問題がいくつもある。記号接地問題は知的な人工システムの内部にもたせた記号表現の意味をシステム自身に理解させるためには、記号表現を実世界の事象と対応づけなければならないという問題であり、Harnadによる論文で導入された [Harnad 90].

Harnad の提案から四半世紀が過ぎた。いまだに記号接地問題は基本問題の一つとして初等的な人工知能の教科書にも掲載され、ロボット業界でもまことしやかにその解決の困難性が語られる [谷口 14a]。しかし、一体、記号接地問題の何が問題なのだろうか。

近年、各種センサの低廉化や計算機の性能の向上を背景にしつつ、実世界の事象を計算機内部のラベルへ対応させるパターン認識は長足の進化を得ている。昨今のディープラーニング (深層学習) プームは象徴的であり、一般物体認識の精度において人間をも凌駕する、大変良好な結果を得ている。しかし、だからといって記号接地問題が解かれる、もしくは、解かれたというようにはなっていないように思う。

記号接地問題が未解決問題として留め置かれ続ける。そこには「記号」という言葉のもつ、特有の哲学的なフレバーがある。賢明な工学者はそのような問題には直接関与しようとせずに、回避しつつ適宜、工学的問題を設定しては前進する。それはそれで健全な話だ。しかし、記号をあやつる知能は人間の知能と他の動物を分ける重要な要素であり、人工知能や認知科学の文脈からいえば、適切な解答を与える必要があり、回避ばかりもしてられない問題でもある。

記号接地問題へのさまざまなアプローチの結果、それが解かれていない (だろう) 根本的な理由としては、記号接地問題そのものがもつ不良設定性ともいえるべき問題がある。それは、人工知能研究の文脈の中で用いられてきた「記号」という言葉のもつ多義性であり、それが記号接地問題に根本的な問題設定の曖昧さを生んでいる。Steels などは半ば扇動的にこの問題を指摘している [Steels 08].

本論考の目的は、人工知能分野における「記号」にまつわる諸問題の本質的解決を目指して、人工知能やロボティクスにとどまらず、人文学を含んだ「記号」にまつわる議論を総合し、記号接地問題の本質的解決に向けた基礎的な議論を整理することにある。そこには本特集のタイトルにも含まれる知覚的シンボルシステム (Perceptual symbol systems) も含まれる。

結論からいえば、記号接地問題は解くべき問題ではなく、記号創発問題こそ解くべき問題となる。認知科学と人工知能を再び架橋し、人間理解を前進させるうえで不可欠な研究領域として記号創発ロボティクスを提示する。

2. 「記号」

2.1 記号論

広く学術の世界を見渡した際に記号といえば、一番に出てくる学問領域は人工知能ではなくて、記号論であろう。人間は記号を扱う点において他の動物に対して圧倒的に秀でており、それは言語のみならず、貨幣や、宗教的な儀礼も含む。そして、記号を媒介としながら人類は独特の文化を生み出してきている。そのような記号を学際的に議論する学術分野が記号論である。しかし、人工知能において「記号」が重要な問題をもってきたにもかかわらず、記号論の議論との接点は極めて少ないままに

今日に至ってきた感がある。

記号の中でも言語は明確に人間に特有なものであると考えられる。言語は広い意味では記号系的一种として捉えられるわけだが、言語の特殊性はその再帰的な構造や二重分節構造などに見られる [Chandler 02]。比較認知科学、もしくは進化的な視点からの人間の言語の特殊性を解説した書籍としては岡ノ谷の書籍がわかりやすい [岡ノ谷 10]。また、記号論の入門書としては Chandler や池上のものがわかりやすい [Chandler 02, 池上 84]。

記号学の祖であるソシュールは言語を理解しなければ、一般的な記号を理解しないと述べている [Saussure 83]。もちろん一般的な記号系を把握できれば、言語を理解できるわけではないが、人間の文化が自然言語のみならず多様な記号系によって支えられていることを鑑みれば、それらの記号系を連続的に捉え、それを支える知能のメカニズムを理解しようとするのは重要であろう。

人間にとっての記号一般を議論する学問としては Saussure により記号学 (semiology) が、Peirce により記号論 (semiotics) が拓かれた [Peirce 58, Saussure 83]。ともに 19 世紀末から 20 世紀前半にかけての人物であるが、20 世紀に育ってきた比較的新しい学問と考えてよいだろう。当初は記号学はヨーロッパにおいて、記号論は北アメリカにおいて近い時代において興ったが、それぞれは全く異なる背景のもとに独立に興っている。

Saussure の記号学は「一般言語学講義」がその起点として言及されるように、言語学の一般化、言語に一般的に潜む構造に関する議論を中心としている。一方で、Peirce はプラグマティズムと呼ばれる思想運動の中心人物でもあり、記号論は人間の認識や、世界の理解の仕方についての議論を中心としている。記号学と記号論は全く異なる背景の中で生まれてきたにもかかわらず、現在では合流して一つの記号論という領域として捉えられている。しかし、二つの源流のそもそもの目的や、前提は大きく異なっており、その混同が現在の記号論の理解しがたさを生んでいる側面もある。

20 世紀後半の構造主義、そしてポスト構造主義（もしくは、ポストモダニズム）の隆盛といった流れの中で、記号論は主に人文系の学問を中心とした学際的な知の潮流となった [Sturrock 86]。その潮流は、差異の体系としての記号系の特質を指摘し、さまざまな文化的コードの分析に活用するという人文学的応用展開において成果を生んできた。しかし、著者の知る限り、記号系そのものが生じる根源について基盤を提供することはできなかった。つまり、主体の認識を基盤に置きながら、記号系のボトムアップな構成に関しては十分な理論を提供することはできていない。

Peirce のプラグマティズムにおける現象学的な視点は背景化し、研究者にとって観測可能な言語活動や文化的な表現の分析が主流となっていったように見受けられ

る。ポスト構造主義、社会構成主義においては、差異の再生産としての言語活用などに過度の重みが置かれることになった。後に導入する記号創発システムの文脈においては、これは社会に担われる記号系が個人々の思考や言語的活動をトップダウンに制約する記号系の性質を大きくクローズアップした議論であると解釈できる。

2.2 人工知能と記号

一方で、初期の人工知能分野においては、西洋思想における伝統的な言語・理性優位の考え方が、計算機科学の成功を背景にナイーブに強化されていったように見受けられる。

Newell らは物理記号仮説 (Physical Symbol System Hypothesis) を提唱し、知能を「記号」処理によって表現し得るという考え方を示した [Newell 76, Newell 80]。ここでいう「記号」とは我々が社会活動の中で、認識活動の中で扱う記号とは異なり、本来、プログラミング言語の中の変数、計算機上のメモリ表現として捉えられるべきものである。上記の Newell らの論文においても記号 (symbol) をどのように捉えるかに関する、人文学的な議論はほぼない。記号には対応する現実の事物が存在し、その対応関係は崩れず固定的なものであるという伝統的でナイーブな記号観に基づきながら、その記号とプログラミング言語上の記号を同一視するといった仮定が物理記号仮説の根本にあるように読める。

時代背景的には計算機の発明とその飛躍への期待があったのだろう。初期の計算機科学は明確に数理論理学の影響下にあるが、数理論理学における記号概念は、記号論における記号概念とは異なる。

記号論における記号概念は多様な文化や表現を含んだ人間の諸活動に現れる記号を包摂的に捉えようとするものであるのに対して、数理論理学における記号は形式化のためにあらかじめ自然言語が対象とする記述可能な物事を制限したものである。例えば述語論理は基本的に事実の記述のみを取り扱う。また、一般にナイーブに記号といった場合、ラベルとしての「リング」と物体としてのリングのように、単語と事物の固定的な対応関係として捉えがちであるが、実際の日常会話の中では、記号と指示対象の関係は固定的ではなく、文脈に応じて変化する。

Newell の言う「記号」と記号論が扱う記号には明確なギャップがある。しかし、そのギャップは多くの議論の中で暗黙的な存在となり、人工知能研究、ロボティクス研究、認知科学研究に暗黙のうちに多大な影響を与えらるることになった。

記号系をある種の実体として人工知能の中心に据えたとき、記号の意味は「記号」と「記号」の関係性によって統語的に定義される。ある言葉を別の言葉で定義する統語的な定義は、意味の定義の仕方として、一定の説得力をもっているように見えるために、意味ネットワークを始め、多くの研究がなされてきた。これに対し、

Harnad は記号接地問題 (Symbol Grounding Problem) を唱え、物理記号仮説に基づく記号系だけでは、現実の事象は表現できず、計算機上の表現としての「記号」と「記号」の関係性から抜け出せないといった主張をしたのである [Harnad 90].

例えば、Roy はこの説明のために Webster 辞書から一つの例を引用している [Roy 05]. Webster 辞書によると Force は “Energy or strength” であり、Energy は “Strength of force” である。では “Strength” が何かというと “The power to resist force” なのである。結局 Force の意味は一向にわからない。ゆえにセンサ系などを通して、人工知能の中にデザインされた記号を現実世界に接地することが重要だということになる。これが、記号接地問題の主旨である。

記号接地問題は現在でも人工知能の基本問題の一つとして捉えられているが、その指摘自体は「真なる」記号系の存在を暗黙に仮定してしまっている Newell らの議論と同じ始点をもってしまっており、問題設定自体に根本的な問題をはらんでいる [Taniguchi 15a]. そもそも物理記号仮説で Newell らの描いている記号は、人間が用いている記号とは別物の、計算機のための記号なのである。それをを用いることを「前提」として認めようとして、実世界の事象に「接地」しようとする記号接地問題の設定は、本質的に物理記号仮説と同じ穴の貉なのである。

構成論的な言語進化研究においても著名な Steels は “The symbol grounding problem has been solved, so what's next?” という論文により、この問題を指摘している [Steels 08]. Steels は計算機科学における記号を c-symbol, 人文学や社会学においてよく議論されるような、人間にとっての意味に基づいた記号を m-symbol と呼び区別することを提案している。ここで c-symbol の c は computer (計算機) の c であり、m-symbol の m は meaning (意味) の m である、Steels によってすでに記号接地問題がある意味で不良設定問題であるという指摘はなされているのである。

2.3 身体をもつ主体と構成主義

プラグマティズムの哲学に端を発する Peirce の記号論は主体の認識世界から議論を開始しているが、差異の体系としての記号系を議論し社会的なコードを問題とした記号論は多くの場合、認識世界における接地を失った、もしくは問題としない議論になっている。記号論においても、主体にとっての実世界認知との関わりを保持したうえで、意味解釈の議論を進めることは困難であったように見受けられる。

人工知能、ロボティクスの分野では Brooks による “Intelligence without representation” (「表象なき知能」) が「記号」処理を軸にした知能構成の方法を批判し、身体性の重要性を強く押し出した [Brooks 90, Brooks 91]. Pfeifer らの身体性認知科学の議論はこのような考え方を

を継承するものである。人工生命や複雑系の議論と合流しながら知能における身体性の重要性を押し出してきた [Pfeifer 01]. これらは「言語ありき」から始めるのではなく「身体ありき」から始めようという始点の変更を強いメッセージとしてもっていた。(認知) 発達ロボティクスもこれに続く領域である [Asada 09, Cangelosi 15].

認知科学の分野では Barsalou が知覚的シンボルシステムを唱え、感覚運動系に基づく表象形成への回帰を促した [Barsalou 99]. いかにも知能を、特に記号を操る知能を、自らの身体を通して環境と関わりある主体として捉え、それを基点として記号や言語を議論できるかどうかは、20世紀の未解決問題であり、21世紀に持ち越された問題であるといえる。

真なる記号系の存在を仮定せず、主体の認識世界をあらかじめ与えられたものではなく、主体自らの構成していくものであるとして捉える現象の捉え方は構成主義 (constructivism) として括られる。

発達心理学の父とも呼ばれる Piaget の哲学の本質は現在の発達心理学そのものというよりは、むしろ発生的認識論にある。発生的認識論は構成主義の中核的存在である。Piaget のシエマ理論は主体の感覚運動情報の自己組織化過程として発達の一部を捉えようとするものであり、主体にとっての認識世界がいかにも構成されていくかという側面を論じている点こそが重要である [フラベル 69]. Glasersfeld はこの構成主義の原点への回帰を重要視しラディカル構成主義を唱えている [グレーザブフェルド 10]. 20世紀末からシステム論において注目された Maturana らのオートポイエーシス論も構成主義に数えられる [Maturana 92].

2.4 セミオーシスと恣意性

記号論から二つの概念を導入したい。これらは極めて基礎的な概念であり、記号論の初学者ですら知っている概念である。しかし、それらはまさに物理記号仮説に欠けているものであり、人工知能研究に文脈上で記号を語る際に忘れられがちな本来の記号の特性である。Peirce の記号論からセミオーシス (semiosis) を、Saussure の記号学からは恣意性を導入したい。

Peirce の記号の定義は一般性が高く射を射ている。Peirce はあくまで記号を主体がサインに対して意味を見いだす過程として捉えた。私達が日頃、記号と呼んでいるものは、記号の頭れとしてのサインに過ぎず、それは主体の解釈なしには記号になり得ない。例えば、仕事帰りの帰宅後、机の上に置いてある一杯のビールは妻からのねぎらいのサインになるかもしれない。しかし、独身男性にとってそのビールという物理的存在、映像的信号は妻からのサインには成り得ない。道路上の駐車禁止の交通標識はまさに駐車禁止を表すサインであるが、異なる標識体系をもつ異国からやってきた者にはそのようなサインにはなり得ない。主体が受け取るサイン(信号)は、

主体の解釈を通して初めて何らかの対象を表象する。記号にはサインと対象を結び付ける解釈項が不可欠なのである。記号とはサイン・対象・解釈項の三項関係によって表されるセミオーシスとして定式化される。

先のビールの例でもわかるように、解釈項が生じるかどうかは、解釈者自身の経験や状況、文脈に依存する、また、交通標識の例でもわかるように解釈者自身の知識や、文化、慣習に依存する。この意味において記号とはそれ自体がプロセスであり、動的な存在なのである。どのような信号が入ってこようと、主体に解釈項が生じなければ、そこに記号はない。Periceはこのプロセスとしての記号を明確に表現するためにセミオーシス、もしくは、記号過程という言葉を導入した。

本特集において鈴木はプロセスベースの概念の重要性を説いているが、これはPericeの記号論での議論と、認知科学における表象系の議論が、人間の認識活動を記述するという要請の中で収められてきた必然のように思われる[鈴木 16]。人工知能の文脈においても、計算機の高速度化や低廉化を経て、より動的なプロセスを表現する計算論の構築は可能になってきている。実体ベースの概念、記号からプロセスベースの概念、記号へ移行しそれを表現するようなモデルを構築することが求められる。

Saussureの記号学の中で最も基礎的な概念の一つが恣意性の概念である。恣意性には大きく分けてラベル付けの恣意性と、範疇化・分節化の恣意性がある[Chandler 02]。前者はある対象をどのように呼んでもよいことを意味している。例えば、日本語でリンゴと呼ぶものが、英語でappleで構わないということの意味する。後者は異なる言語が異なる範疇や分節をもつことを意味する。例えば、異なる言語は異なる数の虹の色をもつ。一つの言語システムに属していると、世の中の記述の仕方、範疇化・分節化の仕方は一通りしかなく、そこに正解がある、つまり「真なる記号系」が存在するように感じてしまいがちである。しかし、それは誤解である。世の中に真なる記号系などというものは存在せず、記号系とは、揺らぎながら、文化相対的に存在する不確かな存在である。

ある言語の辞書をつくることは「可能」である。その言語システムに属している個々の主体の語の解釈の最大公約数的なものを、スナップショット的に取り出し、語と語の関係を記述することは可能である。しかし、その記述は、静的で近似的な観測にすぎず、剥製の^{はく}ようなものにすぎない。

3. 記号創発システム論

3.1 はじめに

言語については、個体発生に対応して幼児の言語獲得、系統発生に対応して社会における言語進化が存在する。ロボットに言語獲得を行わせるプロセスや、幼児が言語

獲得を行っていくプロセスは社会に固定された真なる記号系がシステム内部に浸透する過程として捉えがちである。しかし、そのような単方向のダイナミクスのみを見ていたのでは、言語システム全体のダイナミクスを見誤る。個体の言語獲得にせよ、社会における言語進化にせよ、よりボトムアップなダイナミクスとして捉えられるべきである。複雑系としての言語系、記号系を捉える必要がある。

西垣は基礎情報学の中で、MaturanaやLuhmannのオートポイエーシス論を踏まえながらも、階層的自律コミュニケーションシステム(HACS: Hierarchical Autonomous Communication System)という概念により定常的にコミュニケーションを行い生生活動を行う組織を表現しようと試みている[西垣 04, 西垣 08]。西垣の議論は記号論やオートポイエーシスといった概念群により生命にとっての情報を意味あるものとして位置付け、機械情報としての「記号」との差別化を図ろうとしている点において、私達の議論と近い。西垣の機械情報とSteelsがc-symbolという言葉で指摘しようとしたものは、ほぼ同一と考えてよいだろう。

記号創発システムは上記すべての論点を包含しつつ、記号系を捉える枠組みである。著者は2010年の書籍「コミュニケーションするロボットは創れるか—記号創発システムへの構成論的アプローチ」によりこの枠組みを提出して以来、そのモデルを通じた言語系、記号系の理解の推進を図っている[谷口 10]。2010年代において機械学習とロボティクスを基盤技術とした構成論的アプローチは、身体と言語を共に要素として含んだ系を議論するうえで格好の方法論である。特に機械学習とロボティクスを基盤技術として用いながら推進する記号創発システムへの構成論的アプローチを記号創発ロボティクスと呼称している[谷口 14b, Taniguchi 15a]。

本章では図1に沿いながら記号創発システムについて概説したい。

3.2 内部表象系

図1に記号創発システム概念図を示す。言語を含んだあらゆる記号はア prioriに存在しているものではなく、認知発達する各主体内部における情報の自己組織化過程を通じて形成されていく構造化された記憶にその基盤をもっていると考えられるべきであろう。この構造化された記憶を図1の各主体の吹出しにイメージとして示している。ここでは、旧来の呼称に合わせ、便宜的にこの構造化された記憶を、内部表象系と呼ぶことにしたい。

内部表象系の組織化は昨今の深層学習においても注目される表現学習とも関わりが深い[Le 11]。また、Nakamuraらの階層ベイズモデルを用いたマルチモーダルカテゴリゼーションは物体概念に関してその形成過程の構成論を提供するものである[Araki 12, Nakamura 15]。Nakamuraらはロボットに視覚、触覚、聴覚をも

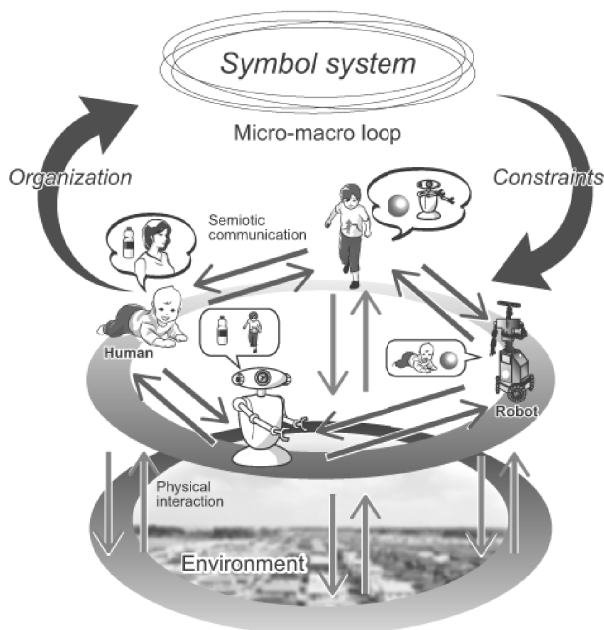


図1 記号創発システム概念図

たせ、これらから得られるマルチモーダル情報を統合させることで、ロボットが人間のそれと非常によく似た物体範疇を形成することを示している。

感覚器から入力される情報の組織化だけではなく、より発展的には身体構造や運動、生存のための淘汰圧などを含めた情報のフィードバックループの中で自己組織化はなされるべきであるが、それらを十分な形で提供する構成論モデルは現状では見当たらない。

言語に潜む統語論も、始まりは感覚運動に潜む組合せ可能性に存在すると考えられ Tani, Sugita らは RNNPB (Recurrent Neural Network with Parametric Bias) を用いた構成論を始めとした一連の研究を示している [Sugita 05, Tani 14]。Fujita らは言語進化においても物体操作における動作に潜む組合せ構造が言語における統語の基礎になるという考えを示しており、極めて示唆的である [Fujita 09]。人間と他の動物との間の物体操作や動作学習におけるギャップと記号操作におけるギャップは比較認知科学においても強いリンクを感じさせる [明和 06]。特に見まねや計画を含んだ運動学習と言語獲得、言語処理における脳内における本質的な計算処理のオーバーラップを示唆するものであろう。著者らは言語に潜む二重分節構造に着目し、これが身体動作や自動車運転行動に潜んでいることを示唆する結果を得ている [Taniguchi 14c, Taniguchi 15b]。

環境 (Environment) との物理的・身体的相互作用 (Physical interaction) を通じて人間は、内的表象系、もしくは概念を形成する。図1の Environment と各主体の層の間の双方向の矢印がこの相互作用を表す。Piaget のシマシステムが語る部分も粗くはこの部分に相当する。しかし、脳内の内部表現としての概念、内的表象は Saussure の言葉では表象される側のシニフィエに

相当し、表象する記号としてのシニフィアンではない [Chandler 02]。

Saussure のシニフィアンおよびシニフィエ概念についてはシニフィアンとしての記号がシニフィエとしての対象を指すという指示的ニ項関係だとナイーブに誤解されることも多いが、Saussure のシニフィエは認知科学の言葉でいえば概念に近い、内的に組織化された記憶を指す。音声信号に対応するシニフィアンと概念としてのシニフィエが相互にシステムとして関係しあうというのが Saussure の論点である。

あくまで各主体はこの内的表象系、概念システムを利用して飛来するサインを解釈し、自らサインとしての発話を放つのであり、内的表象系そのものは社会によって保持される記号系ではない。この区別は多くの人工知能研究が記号について語るときにしばしば見誤っているものである。機械学習を用いた先端的な研究であっても、このギャップを暗黙的に教師あり学習という「人手によるラベル設計」という恣意に委ねてしまうことにより、覆い隠している。

内部表象系というと、確定的な実体があるものを思い浮かべるかと思うが、重要なのはセミオーシスを生み出す程度に構造化された記憶であり、状況や文脈に応じていかようにもサインと対象の関係を関連付けられる自由度こそ重要である。その意味で、ニューラルネットワークにおける中間層やコンテキスト層における分散的な情報表現や、階層ベイズモデルにおける潜在変数上の確率分布などのような、確率的で連続的な表現こそが内部表象系の表現としては適当であろう。

3.3 コミュニケーションと記号系の組織化

個々のシステム内部では、さまざまな記憶の自己組織化が行われるものの、コミュニケーションを行う集団においては表面的にはサインの交換のみが観測される。このサインの交換が社会におけるコミュニケーションであり、多くの社会学的研究が対象とするものであろう。図1ではこの相互作用を記号的相互作用 (Semiotic Communication) として各主体間の双方向矢印で示している。

構造主義がそこに文化的差異の構造を見いだしたように、また、一つの言語 (日本語、英語など) が「正しい」辞書や文法規則をもち得ると一般的に信じられているように、社会の中で共有される記号系 (Symbol System) はある種のアトラクタ的まとまりをもつ。システム論的にはまとまりをもつダイナミクスをもつがゆえにコミュニティの中の記号系はまとまりをもつ。彼らはコミュニケーションを通じて各主体の語彙や文法、信念を共通化させていく。自己組織化の議論における隷属原理や、市場メカニズムにおける一物一価の法則などとの、アナロジーが魅力的である。いずれにせよ、記号を用いたコミュニケーションを行う系においては、その記号系が

秩序的なまとまりをもって来る。これが記号系の組織化 (Organization) の過程であり、記号系の創発そのものである (図 1 左側の下から上への矢印)。

記号系がまとまっていく際のダイナミクスは、基本的に、複雑系、進化論のような淘汰的な過程を考えればよく、その淘汰はコミュニケーション参加者に自律分散的に担われた言語使用によってボトムアップになされる。言語使用はそもそも、身体をもった各主体の環境適応と、その下層ではつながっており、言語使用に関する淘汰圧も、一部は、これらから提供される。

3.4 記号系と制約

記号系がまとまりをもたねばコミュニケーションは破綻する。この指摘は西垣の階層的自律コミュニケーションシステム (HACS) に基づく説明のとおりである [西垣 04, 西垣 08]。コミュニティにおける相互信念は実世界の言語的コミュニケーションを実現するうえで重要であり、Iwahashi らの相互信念モデルはこの良い構成論モデルを提供している [中村 09]。社会によって担われる記号系はその語彙、文法のみならず大域的な相互信念をも含むと考えるべきであろう。記号系の利用は自ずと、その記号系を利用しようとする主体の発話に制約 (Constraints) を与える (図 1 右側の上から下への矢印)。

3.5 創 発

創発 (emergence) は Polanyi が用いた言葉で、システムの階層性を捉える言葉、特に、下位のシステムが、上位のシステムを生み、その上位のシステムが下位のシステムの境界条件、制約条件を与えるというような様相を表すものである [Polanyi 66]。日本国内においても 20 世紀末から創発性をもつ複雑システムに関する議論は精力的に行われた歴史がある [北村 01, 榎木 07]。

上記の枠組みで人間のもつ言語系、記号系を捉えた際に、そのダイナミクスの本質は創発システムとして捉えられ、その内包するマイクロ・マクロ・ループにこそ、本質がある。このように記号を用いたコミュニケーションを内包した、つまり、記号過程を内包した複雑システムは本質的に創発システムとしての特性をもつことが必要である。

図 1 において記号系 (Symbol system) は多重の楕円で描かれている。このイメージは重要である。コミュニティの中で記号系は固定化されない。この記号系は誰の目にも見えないものでありながら、創発的に私達の身体的相互作用や記号的相互作用そのものよりも上位の層に創発しており、また、絶えず揺らぎ姿を変えていくものである。

私達が記号創発システムというとき、それは、図 1 の上部に示された創発した記号系を指すのではない。創発性をもつこの複雑系としてのシステム全体を指すのである。記号系のボトムアップな組織化とトップダウンな制

約をマイクロ・マクロ・ループとしてもちながら絶えず活動を続ける生命的なダイナミクスこそ、記号を用いてコミュニケーションする私達がその要素として組み込まれている記号創発システムの姿なのである。記号系はそのダイナミクスの中で漸次的に変化し続ける構造的なパターンに過ぎない。

私達の記号的コミュニケーションを把握しようとするとき、物理的記号システム (Physical Symbol System) [Newell 80] ではなく、知覚的シンボルシステム [Barsalou 99] を含みながら、その社会システムにおける創発の様相を取り込んだ記号創発システム (Emergent Symbol System) [谷口 10, 谷口 14b, Taniguchi 15a] として、その全体を把握すべきである。

4. 結 言

4.1 記号創発問題

本論考の目的は、記号接地問題の本質的解決に向けた基礎的な議論を整理することにあると述べた。記号の問題を解決するためには、記号とは何かを知らなければならぬ。実世界に関与しないコンピュータプログラムをつくる際の記号は確かにプログラミング言語における記号に限ってもよいかもしれない。しかし、認知科学における記号は間違いなく人間にとっての意味ある記号だ。また、ロボットにとっても実世界で移動し、知覚し、そして人間と記号を用いたコミュニケーションを始めるとき、その記号は計算機内部の表現としての記号には留まることをゆるされない。形式的な体系である数理論理学と、その影響を強く受けた計算機科学における記号は人間社会における記号の一部を切り出し、固定化させ、閉じたシステムの中での意味の取扱いを可能にした。しかし、機械が動的で不確実な実世界に触れ、その情報を適切に内部表現として組織化しようとするとき、また、機械が人間と長期的なコミュニケーションをはかり、コラボレーションを実現しようとするとき、開かれたシステムの中での意味の取扱いが求められざるを得なくなる。静的な記号系が表現し得る現象と、動的な記号系が表現し得る現象は異なる。

Harnad の記号接地問題は静的な記号系を与えたうえで、その接地を扱おうとした。その問いの立て方自体が問題だと Steels は指摘した。記号接地問題の本質的解決を行うためには記号接地問題という問題自体を改めなければならない。私達が捉えるべきは物理記号システムの接地の仕方ではない。記号創発システムの現れ方なのである。人が設計した、ロボットにとっては極めて恣意的な記号システムの接地を考えるのではなく、ロボットにとって自然な記号システムが環境との物理的相互作用、他者との記号的相互作用を通して組織化されていく過程を捉えることこそ、記号接地問題の本質的解決につながるのである。

解くべき問題は記号接地問題ではない。解くべき問題は記号創発問題なのである。

4.2 記号創発ロボティクス

記号という「あやふや」なものを取り扱うときに私達にどのような学問的アプローチが許されるのだろうか。学問領域は対象系のみによって規定されるのではなく、そのアプローチの仕方によっても規定される。そしてアプローチは時代の技術によっても制約される。

20世紀の記号論は記号システムの正体を明らかにすることに大きな成果をあげてきた。しかし、著者の知る限り、記号系そのものが生じる根源について構成論的基盤を提供することはできなかった。Peirceの定義したセミオーシスのより詳細なダイナミクスを記述することは20世紀においてアプローチするには困難な課題であった。これは、Piagetのシマモデルが詳細なダイナミクスの記述を与えられなかったことと同じ根をもつ問題のように思われる。つまりは、認知主体の感覚運動情報から記憶システムが自生的に構造化され、それを基盤としてサインを解釈するようなシステムの動的な記述ができなかったのである。

しかし、これらは21世紀の現在ならば取扱い不可能な対象ではない。私達はこのようなモデルを紙の上だけでなく、計算機の上で、そして、ロボットの上で記述することができる。ロボットの最もシンプルな定義は感覚系（センサ系）と運動系（モータ系）をもった計算機である。感覚運動系から得られる情報は計算機に流れ込み、計算機の中でそれらの情報を組織化、構造化することができる。このための数理的な枠組みは機械学習理論の長足の進歩により提供されてきたし、計算機の飛躍的な性能向上は私達に新たな記述の道具立てを与えている。

現象を理解する際にモデルの存在は重要である。私達はモデルを通して現象を把握して、科学的な仮説を導き出す。仮説の妥当性を検証するには各種の実証的な実験がなされるわけだが、まずは、モデルが存在しなければならない。記号創発ロボティクスはロボット、計算機、機械学習技術を駆使し、記号創発システムを支える知能を構成しようとする取組みである。20世紀末に複雑系研究によって育まれた構成論的アプローチを、方法論的に発展させながら、記号創発システムを表現するモデルの構築を行っていく。

これまでの経緯を考慮に入れれば、記号創発ロボティクスは、記号創発問題に向きあい人間の記号システムを理解するためのアプローチとしては、必然的なアプローチとも言えるだろう。

4.3 展 望

本稿では人間の記号的コミュニケーションの全体像を記号創発システムとして概要的に導入した。記号創発に関わる議論は認知科学にも言語学にも社会学にも閉じな

い。もちろん人工知能にも閉じない。その理解のためには、ボトムアップなダイナミクスを陽に捉える必要があり、複雑系、機械学習、ロボティクスなどでこの30年来培われてきた構成論的アプローチを活用することが必要であろう。

しかし、一方で構成論的アプローチにできることはやはり限られている。また、ロボットという「個体」を議論の原点に置いている以上、記号創発システムの上位から下位へのトップダウン制約に関わるような、社会的な現象の理解には多かれ少なかれ限界をもつ。記号創発システムの理解のためには、引き続き、関連諸分野の学際的な連携が必要であろう。また、記号創発ロボティクスにできることは基本的にはモデルの提供である。人間の幼児がどのように言語獲得を行うのか、などの問いに関しては、引き続き発達心理学や認知心理学、脳科学との連携も必要であろう。

ダイナミクスの記述のための道具としては機械学習が主な役割を果たす。著者らのアプローチでは、教師なし学習を用いることが多い。しばしば、教師あり学習のほうがパフォーマンスが高いのだから、教師あり学習を用いるべきだ、という指摘を受ける。しかし、そのような指摘は、そもそも問題認識がずれている場合が多い。

記号創発問題を解こうとするときに問題としているのは、感覚運動系から得られる情報の組織化により、認知主体が記号的コミュニケーションに到達するための、内部ダイナミクスの表現であり、必ずしも工業的利用価値の意味においてパフォーマンスの高い情報処理の実現ではない。そもそも、教師ラベルは人間が用意したもので、恣意的なラベルであり、しばしば、それは、真なるラベルとは言いがたいこともある。もとより、真なるラベルなど存在しない世界からスタートするのが、記号創発問題である。そのようなバイアスとしての教師ラベルの存在を仮定せず、記号創発システムの全体を表現していくための基礎ダイナミクスとしての計算論の構築が目指される。

1956年に行われたダートマス会議は人工知能という言葉が生まれた会議として知られるが、同時に認知科学の発祥としても捉えられる。Newellは自らの論文の中で物理記号仮説が認知科学に重要な影響を与えたことを誇らしく書いているが、それが現在から振り返ったときにどこまで良い影響だったのかどうかはわからない[Newell 80]。いずれにせよダートマス会議から60年が経つ。以降の数多くの批判を踏まえ、実世界情報に基づく知覚的シンボルシステムの構成論的理解を経て、記号創発システムの理解を深めることで、人工知能と認知科学を再び架橋しながら、新たな人間理解と知的システムの創成へと歩みを進めていく必要があるだろう。

謝 辞

本研究の一部はJSPS科研費 15H05319 および JST,

CREST「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」の助成を受けたものである。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Araki 12] Araki, T., Nakamura, T., Nagai, T., Nagasaka, S., Taniguchi, T. and Iwahashi, N.: Online learning of concepts and words using multimodal LDA and hierarchical pitman-yor language model, *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1623-1630 (2012)
- [Asada 09] Asada, M., Hosoda, K., Kuniyoshi, Y., Ishiguro, H., Inui, T., Yoshikawa, Y., Ogino, M. and Yoshida, C.: Cognitive developmental robotics: A survey, *IEEE Trans. on Autonomous Mental Development*, Vol. 1, No. 1, pp. 12-34 (2009)
- [Barsalou 99] Barsalou, L. W.: Perceptual symbol systems, *Behavioral and Brain Sciences*, Vol. 22, No. 4, pp. 1-16 (1999)
- [Brooks 90] Brooks, R.: Elephants don't play chess, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 6, pp. 3-15 (1990)
- [Brooks 91] Brooks, R.: Intelligence without representation, *Artificial Intelligence*, Vol. 47, No. 1-3, pp. 139-159 (1991)
- [Cangelosi 15] Cangelosi, A. and Schlesinger, M.: *Developmental Robotics*, The MIT Press (2015)
- [Chandler 02] Chandler, D.: *Semiotics the Basics*, Routledge (2002)
- [Fujita 09] Fujita, K.: A prospect for evolutionary adequacy: Merge and the evolution and development of human language, *Biolinguistics*, Vol. 3, No. 2-3, pp. 128-153 (2009)
- [フラベル 69] フラベル: ピアジェ心理学入門〈上〉, 明治図書出版 (1969)
- [グレーザーズフェルド 10] エルンスト・フォン・グレーザーズフェルド: ラディカル構成主義 (叢書コムニス 11), エヌティティ出版 (2010)
- [Harnad 90] Harnad, S.: The symbol grounding problem, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol. 42, No. 1, pp. 335-346 (1990)
- [池上 84] 池上嘉彦: 記号論への招待 (岩波新書), 岩波書店 (1984)
- [北村 01] 北村新三, 喜多一: 創発システム, 計測と制御, Vol. 40, No. 1, pp. 94-99 (2001)
- [Le 11] Le, Q. V., Ranzato, M., Monga, R., Devin, M., Chen, K., Corrado, G. S., Dean, J. and Ng, A. Y.: Building high-level features using large scale unsupervised learning, *Int. Conf. in Machine Learning (ICML)* (2011)
- [Maturana 92] Maturana, H. R. and Varela, F. J.: *The Tree of Knowledge: The Biological Roots of Human Understanding*, Shambhala, revised edition (1992)
- [明和 06] 明和政子: 心が芽ばえるときコミュニケーションの誕生と進化 (叢書コムニス), NTT出版 (2006)
- [中村 09] 中村慎也, 岩橋直人, 長井隆行: 実世界における人とロボットの共有信念の推定に基づいた適応的な発話生成, 知能と情報 (日本知能情報ファジィ学会誌), Vol. 21, No. 5, pp. 663-682 (2009)
- [Nakamura 15] Nakamura, T., Ando, Y., Nagai, T. and Kaneko, M.: Concept Formation by Robots Using an Infinite Mixture of Models, *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (2015)
- [Newell 76] Newell, A. and Simon, H. A.: Completer science as empirical inquiry: Symbols and search, *Comm. ACM*, Vol. 19, No. 3, pp. 113-126 (1976)
- [Newell 80] Newell, A.: Physical symbol systems, *Cognitive Science*, Vol. 4, pp. 135-183 (1980)
- [西垣 04] 西垣 通: 基礎情報学—生命から社会へ, NTT出版 (2004)
- [西垣 08] 西垣 通: 続基礎情報学—「生命的組織」のために, エヌティティ出版 (2008)
- [岡ノ谷 10] 岡ノ谷一夫: 言葉はなぜ生まれたのか, 文藝春秋 (2010)
- [Peirce 58] Peirce, C. S.: *Collected Writings*, Harvard University Press, Cambridge (1931-1958)
- [Pfeifer 01] Pfeifer, R. and Scheier, C.: *Understanding Intelligence*, A Bradford Book (2001)
- [Polanyi 66] Polanyi, M.: *The Tacit Dimension*, The University of Chicago Press (1966)
- [Roy 05] Roy, D.: Semiotic schemas: A framework for grounding language in action and perception, *Artificial Intelligence*, Vol. 167, pp. 170-205 (2005)
- [Saussure 83] Saussure, de F.: *Course in General Linguistics* (trans. Roy Harris), London (1983)
- [榎木 07] 榎木哲夫: セミオシス: 記号過程がかもしだす知覚世界の動的複雑系, 第21回ファジィシステムシンポジウム (2007)
- [Steels 08] Steels, L.: The symbol grounding problem has been solved, so what's next?, *Symbols, Embodiment and Meaning*, No. 2005, pp. 223-244, Oxford University Press, Oxford, UK (2008)
- [Sturrock 86] Sturrock, J.: *Structuralism*, Paladin, London (1986)
- [Sugita 05] Sugita, Y. and Tani, J.: Learning semantic combinatoriality from the interaction between linguistic and behavioral processes, *Adaptive Behavior*, Vol. 13, No. 1, pp. 33-52 (2005)
- [鈴木 16] 鈴木宏昭: 実体ベースの概念からプロセスベースの概念へ, 人工知能, Vol. 31, No. 1, pp. 52-58 (2016)
- [Tani 14] Tani, J.: Self-organization and compositionality in cognitive brains: A neurorobotics study, *Proc. IEEE*, Vol. 102, No. 4, pp. 586-605 (2014)
- [谷口 10] 谷口忠大: コミュニケーションするロボットは創れるか—記号創発システムへの構成論的アプローチ (叢書コムニス 13), エヌティティ出版 (2010)
- [谷口 14a] 谷口忠大: イラストで学ぶ人工知能概論 (KS 情報科学専門書), 講談社 (2014)
- [谷口 14b] 谷口忠大: 記号創発ロボティクス—知能のメカニズム入門 (講談社選書メチエ), 講談社 (2014)
- [Taniguchi 14c] Taniguchi, T., Nagasaka, S., Hitomi, K., Takenaka, K. and Bando, T.: Unsupervised hierarchical modeling of driving behavior and prediction of contextual changing points, *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 16, No. 4, pp. 1746-1760 (2014)
- [Taniguchi 15a] Taniguchi, T., Nagai, T., Nakamura, T., Iwahashi, N., Ogata, T. and Asoh, H.: Symbol Emergence in Robotics: A Survey, *Computer Science*, arXiv:1509.08973 (2015)
- [Taniguchi 15b] Taniguchi, T., Nagasaka, S., Hitomi, K., Chandrasiri, N., Bando, T. and Takenaka, K.: Sequence prediction of driving behavior using double articulation analyzer, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol. PP, No. 99, pp. 1-1 (2015)

2015年11月9日 受理

著 者 紹 介



谷口 忠大 (正会員)

2006年京都大学工学研究科博士課程修了。2005年より日本学術振興会特別研究員 (DC2), 2006年より同 (PD)。2008年より立命館大学情報理工学部助教, 2010年より同准教授。2015年より Imperial College London 客員准教授。記号創発システムの構成論的理解や機械学習技術の応用に関する研究に従事。博士 (工学, 京都大学)。計測自動制御学会学術奨励賞, システム制御情報学会賞奨励賞, 論文賞, 砂原賞などを受賞。主著に「コミュニケーションするロボットは創れるか」NTT出版 (2010), 「ビプリオバトル」文藝春秋 (2013), 「記号創発ロボティクス」講談社 (2014), 「イラストで学ぶ人工知能概論」講談社 (2014) など。計測自動制御学会, システム制御情報学会, 日本認知科学会, IEEE などの会員。