

## 知能への進化論的アプローチ

中島秀之 (公立はこだて未来大学)

人工知能研究の将来像について語る。初期の AI 研究においては、物理シンボル仮説が有力であった。最近の AI 研究では知能の身体性 (ロボット) や、知能と環境との相互作用が重視されるようになってきている。しかしながら、両者を通じて一貫する立場と方法論として、構成的学問体系としての AI があり、その中心には「探索」があると考えている。探索の一般的手法としては進化論的なものしかないとする。本稿では進化論的手法の本質と、それをを用いる構成的方法論について述べる。

### Evolutionary System as an Approach to Intelligence

HIDEYUKI NAKASHIMA  
FUTURE UNIVERSITY HAKODATE

I shall talk about the future direction of AI research. In the good old days of AI, physical symbol system hypothesis was the dominant position. Recent development of AI shows some shift toward embodied intelligence (robots) and interactions of intelligent systems with the environment. I believe that there is still a unchanged position and methodology of AI as being a science of artificial, and “search” is always at the core of the science. I view evolution as a basic but almighty methodology for search, and shall present the essence of evolutionary system and the constructive methodology that uses it.

#### 1. はじめに

AI の分野はどのように発展して来て、現在どこにいて、これから何処に向かうのだろうか？

初期の AI では、知能の本質は記号処理で実現できると考えていた (物理記号システム仮説<sup>15)</sup>)。曰く：

A physical symbol system has the necessary and sufficient means for intelligent action.

エキスパートシステム程度まではそれで良かったように思う。しかし、その後画期的な進展が見られないのではないか？

最近ではロボット研究に典型的にみられる、身体性を重視した環境に埋め込まれた知能<sup>1)</sup>の他、ユビキタス・コンピューティング<sup>12),19)</sup>あるいは環境知能<sup>7),17)</sup>の研究が盛んになっており、AI の研究分野もそちらにシフトしている感がある。「知能と複雑系」という研究会名称も、そのような複雑系としての知能、複雑系を扱う能力としての知能という面に注目した命名であった。

これらの動きは一見すると物理記号システム仮説とは異なった道を歩むものと見られがちである。しかしながら、初期の AI から一貫しているアプローチがあることを指摘したい。それは最大限広義での「探索」である。知能とは探索のことであるという主張ではない。

しかし、知能を追求するときに避けて通れない要素が探索であるという主張である。

たとえば環境の変化を予測してそれに対応するという行為の根底にも探索がある。将棋や囲碁には基本的に先読みという方法論しかないことにもそれが典型的に現れている。大脳皮質の重要な機能は学習と予測にある<sup>3)</sup>とする場合に、大脳が学習する手法がニューラルネットワークのそれと本質的に同じであるとすれば、これも広義の探索 (最適パラメータの探索) であると言える<sup>\*1</sup>。

また、そのような知的なシステムを構築するというメタレベルの行為の根底にも探索がある。人間という知能を造り上げた進化という自然現象もその一つであるが、知能システムの構築を人工的に追求するという我々研究者の行為にも探索が必須である。

Simon は人工物の科学<sup>18)</sup>が重要であると主張している。これは人工的に構成されたものを調べようという学問ではなく、人工的にモノを構築する方法論に関する学問が重要であるという主張である。筆者らも同じ方向性を持って構成的手法を定式化しようとしている<sup>8),9),14)</sup>。

新しいものを構成するということは分析の逆を行うことではない。分析の場合にはあらかじめモノや現象

\*1 ただし、ニューラルネットワークの学習は脳の機能に比べて単純であるし、後述の進化論的手法ほど一般的でもない。

(コト)が存在し、それを部分に分割して行く手法が採られるが、構成の場合にはそれとは異なりあらかじめ部品が存在しているわけではない、構成の初期段階として(つまり、構成という行為の実行前に)部品が同定できるわけでもない、とりあえず構成し、その構成物を分析することにより想定したものとの差異を検出し、それを材料あるいはその構造に戻すというループを回す必要があるが、各サイクルで新しい構造を決めるのも探索である。これに関しては3節で詳細する。

このような探索と評価を繰り返すシステムとしては進化のシステムが知られている。生物進化に関しては様々な流派が存在するが、ここで重要と考える本質は(ランダムな)生成と環境による選択の繰り返しである。さらに、進化論的手法が新しいものを構成する際の唯一の万能手法ではないかと考えている。以下の節では構成的手法を中心として進化論的手法を定式化する。そして、今後のAI研究はこの手法にマップされるべきであることを主張する。

なお、以下は筆者の他稿<sup>9)</sup>を下地として上記の論旨に沿って加筆・改題したものである。

## 2. 多層システムの構築

AIで扱う知能のような複雑なシステムは、多くのレベルで各々異なる意味や法則を持つ。人間は少なくとも、社会レベル、個体レベル、器官レベル、細胞レベル、分子レベルのような多層にわたる理解を必要とする<sup>13)</sup>。これらの各層\*1はすべて説明上も実体上も実在しており、上位層の性質を下位層に(物理学的な意味で)還元することはできない。各々の層が、その上下の層との間になんらかの制約はあるが、独自の法則で機能していると考えべきである。

このような多層システムは従来の工学的手法のように、仕様記述からトップダウンに造ることは不可能である。自然界がその進化の過程で行なってきたように、構成と評価(進化の場合には構成された個体の行動結果に基づく選択)のループしか一般的な方法論は存在しないのではないかと考える。AIの場合には研究者がシステムを構築し、その振舞いを観測・分析し、上位の層に望ましい振舞いが出るように下位層のシステムに修正を加えるというループになる。この場合、研究者がループ内にいること(内部観測)が重要である。

この場合に上下層の間に創発する関係を我々は縦の因果関係と呼んだ<sup>14)</sup>。縦の因果関係は今後詳しく分析されるべきものと考えているが、いずれにしても上下層間の関係の理解こそが、多層システムとして成立している生命現象を構成する鍵になる。縦の因果関係を生む基本メカニズムとして、我々は3節に示す構成-分

析のサイクルを提唱した<sup>11)</sup>。

## 3. 構成と分析のダイアグラム

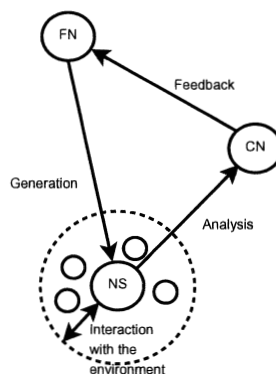


図1 FNS-Diagram of a Synthetic Loop

先に述べたように、新しいものの生成は仕様→設計→実現という単純な行程では実現できない。自動車工学や船舶工学のように特定分野の知識が集積されている場合を除いて、一般的には仕様を満たすために必要な部品があらかじめ決められないからである。我々はこの過程を図1のように定式化した。普通は仕様(FN)\*2を満たしていると思われるものをとりあえず構築(generation)してみる必要がある。実際に生成することによって、必ず求めたもの以上の細部が加わる(具体化される)し、構成されたもの(NS)と環境との予期せぬ相互作用も発生しうる。したがって、でき上がったものを分析(analysis)し、その性質(CN)を明らかにする必要がある。この分析手法もあらかじめ決まったものとは限らず、生成して試みることによって新しい分析手法が決まるかもしれない。分析の結果が定まると、それを元の仕様と比べて必要なフィードバック(feedback)をかける。この過程によって仕様が変わるかもしれない。この構成のループは1回では終わらず、仕様が変わり続ける限り繰り返される。これが構成的方法論の中心となるループである。

ここで注意していただきたいのは環境と相互作用しているNSだけが実体であり、仕様FNや分析結果CNはそれに対応する概念である。AIプログラムあるいはロボットがNS、研究者の頭の中にあるのがFNとCNと考えて良い。

\*1 本稿では「層」と「レベル」はほぼ同義に用いている。「層」は対象を(物理的な)実体として捉えた言いかたであるし「レベル」は概念的な区別である。

\*2 FNはfuture noema, NSはnoesis, CNはcurrent noemaに対応するが、本稿では単なる記号として扱う。これらの詳細に関しては中島<sup>10)</sup>あるいはその原典となっている木村<sup>5)</sup>を参照されたい。

#### 4. 進化システム

ここでは進化を生物世界のものとしてではなく、広く構成の方法論として考えている。市川<sup>4)</sup>は進化システムの要件として以下を掲げているが、ここでも進化をそのように捉える：

1. (恒常性を維持する) 自己複製子の存在
2. 自己複製子のシステム性
3. システム構造の変異の可能性
4. (複製の頻度に関する) 複製システム間相互作用
5. システムを支える環境の存在

AI や ALife で用いられる遺伝的アルゴリズムも上記の要件を備えている。遺伝的アルゴリズムは以下のように規定できる：

1. 集団の初期値の決定
2. 評価関数 (フィットネス) の決定
3. (終了条件が満たされるまで) 以下の繰り返し
  - 3-1. 遺伝子の突然変異 (置換, 削除, 重複)・交叉による子孫の生成
  - 3-2. フィットネスが上位の個体を選別し, 決められた規則に従って残す

ここで「システムを支える環境の存在」は暗黙に仮定されているが、この設定が重要であることに変わりはない。この環境によって個体のフィットネスが決まる。進化に関しては以下の3点に注意を要する。

1点目は、自然界における進化は方向性をもたないということである。進化は単に複製子の頻度の差として起こっているのである<sup>2)</sup>。しかしながら、遺伝的アルゴリズムは人為的な操作であるから評価関数の中に目的を織り込むことが可能である。たとえば、足の速い子孫の評価値を高くすることが可能である。しかし自然界では足が速いという理由で子孫が残るわけではない。他の様々な要因と絡みあった上で、結果的に子孫を残せる状況に至ったものだけが残るのである (結果として足の速いものが多く残ることはあるが、淘汰圧が足が速いという方向性を持っているわけではない)。

2点目は、進化は大きな分岐と漸進的進化の繰り返しであるということである。すなわち、遺伝形の変異は大部分は小さな変化 (漸進的進化) として発現する。それより大きな変異は通常は生存に必要な要件を満たさないで淘汰される。しかしながらごくまれに大きなジャンプでも生存可能なものが生成される。ここで隣の山への分岐が起こる。AI あるいは構成的方法論において進化的方法論が重要なのはどちらかと言えば後者の点であり、前者は他の工学的手法 (たとえば最適化や山登り法) が使える。

3点目は進化は複数の層で同時に起こっているということである。本稿で問題にしている多層システムという観点からはこれが最も重要な点である。

Monod<sup>6)</sup> は生物進化において、目的論的な上位システムと、下位のタンパク質のランダムな変異の間の関係に熱力学第二法則が重要な役割を果たしており、その結果として進化は熱力学第二法則と同方向の不可逆な変異となることを述べている。つまり、タンパク質のランダムな変異のうち、上位システム (代謝) に組み込まれるもののみが残り、さらに交配という生物再生産のシステムに組み込まれたものだけが固定化される。ここでは Polanyi の記述したものに類似の、境界条件を与えるものとしての上位層の姿が読み取れる。

Polanyi は下層のシステムでは定まらない境界条件を上層が与えているとしている。生物の例では分子層は物理化学的制約からなりたっているが、それらの配置などの境界条件は上位の層が、物理化学とは別の原理で定めているとしている<sup>16)</sup> (page 67)。

生物における諸レベルからなる階層の場合にも、広汎にこの周縁制御の原理がはたらいているのが見られる。生命を休止の状態において維持している植物的機能系は、筋肉活動を用いる身体的運動がなりたちうる可能性をひらいておき、筋肉活動の原理は、それらが種にそたわる独特の型の行動へと統合されうる可能性をひらいておく。これらの行動の型も、それらが知性によってかたどられることに可能性をひらいておく。つぎに、この知性の作用は、それを所有する我々人間において、さらにより高い原理がはたらきうる広範な可能性を許している。

Monod と Polanyi は生物について語っているが、これらの視点は人工物にもそのまま当てはめることができる。複数の異なる記述言語を持つ層の同時創発を造りこむ指針となると考えている。

#### 5. 多層システムの構成

多層システムを扱うときには FNS が実体 (NS) において多層化される (図 2)。図は 3 層を示しており、左に行くほど上位の層になる。下位の層 (右側) では環境の要素となっていたものが上位層 (左側) では対象とするシステムに含まれる。つまり、右側では中心システムと、それを取り巻く環境中の要素に分離して表示されているシステムの全体が、左側では単一の要素 1 となっている。すなわち、各システムは下位層では PART-OF 関係で分解されると考えてよい。一方これらの実体に対応する概念 (あるいは仕様) は別の各層で独立した記述体系を採用。それらの層の間関係が縦の因果関係である。

図 2 に示すように、複数の層で同時に構成のループが回っている。進化が複数の層で同時に起こるとしたのと同じである。また、これらの各層は安定な構造を持っているわけではなく、試行錯誤の仮定で PART-

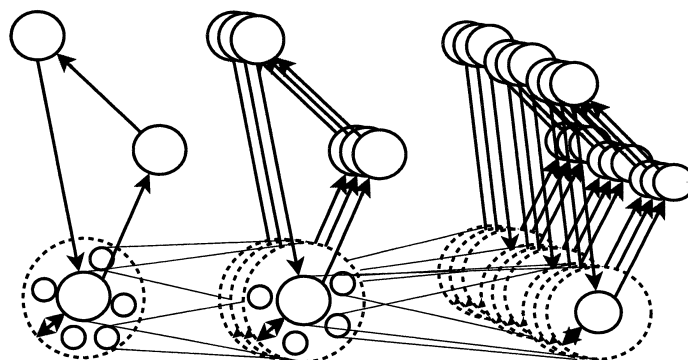


図 2 FNS-Diagram of Multi-level Synthesis

OF 階層自体が変更される可能性がある。AI の研究の中心的方法論が進化論的方法だという主張の裏にはこのような図式がある。

## 6. まとめ

AI 研究の将来の方向性として、探索の重要性を示唆し、探索の一般的方法論としての進化システムの考え方について述べた。進化論的方法論は知的エンタリー(生物)が自ら探索の手法として使う他、当のエンタリー自身がそのような進化の産物であるという二重性を持つ。そして、後者はそのまま AI 研究者の方法論となる。

## 参考文献

- 1) 浅田 稔, 國吉 康夫. ロボットインテリジェンス. 岩波書店, 2006.
- 2) Richard Dawkins. *The Selfish Gene*. Oxford University Press, 1989. 利己的遺伝子.
- 3) Jeff Hawkins and Sandra Blakeslee. *On Intelligence*. 2004. 伊藤文英訳:考える脳考えるコンピュータ. ランダムハウス講談社 (2005).
- 4) 市川 惇信. 暴走する科学技術文明. 岩波書店, 2000.
- 5) 木村 敏. あいだ. 弘文堂, 1988.
- 6) ジャック モノー(渡辺格, 村上光彦訳). 偶然と必然—現代生物学の思想的な問いかけ. みすず書房, 1972.
- 7) Hideyuki Nakashima. Cyber assist project for ambient intelligence. In Juan Carlos Augusto and Daniel Shapiro, editors, *Advances in Ambient Intelligence*. IOS Press Inc., 2007.
- 8) 中島 秀之. 構成的情報学と AI. 人工知能学会論文誌, 21(6):502-513, 2001.
- 9) 中島 秀之. 構成的研究の方法論と学問体系. *Synthesiology*, 1:94-102, 2008.
- 10) 中島 秀之. 人工知能とロボット. ロボット情報学ハンドブック. エヌ・ティー・エス, to appear 2009.
- 11) Hideyuki Nakashima, Masaki Suwa, and Haruyuki Fujii. Endo-system view as a method for constructive science. In *Proc. 5th International Conference of the Cognitive Science (ICCS 2006)*, pages 63-71, 2006.
- 12) 中島 秀之, 車谷 浩一, 伊藤 日出男. コピキタス情報処理による社会支援. *情報処理* 45(9):907-911, 2004.
- 13) 中島 秀之, 有馬 淳, 佐藤 理史, 諏訪 正樹, 橋田 浩一, 浅田 稔. 新しい AI 研究を目指して. *人工知能学会誌* 11(5):37-48, 1996.
- 14) 中島 秀之, 諏訪 正樹, 藤井 晴行. 縦の因果関係. *日本認知科学会第 24 回大会予稿集*, pages 42-47, 2007.
- 15) Allen Newell and Herbert A. Simon. Computer science as empirical inquiry: symbols and search. *Communications of the ACM archive*, 19(3):113 - 126, 1976.
- 16) Michael Polanyi. *The Tacit Dimension*. Doubleday, 1966. 佐藤敬三訳:暗黙知の次元. 紀伊国屋書店, 1980.
- 17) The European Union report. Scenarios for ambient intelligence in 2010. <ftp://ftp.cordis.lu/pub/ist/docs/istagscenarios2010.pdf>, 2001.
- 18) Herbert A. Simon. *The Sciences of the Artificial*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, third edition, 1996.
- 19) Mark Weiser. The computing for the 21st century. *Scientific American*, 265(3):94-104, 1991.