

# 複雑系情報処理としてのAI研究とその方法論



中島 秀之

札幌市立大学  
h.nakashima@scu.ac.jp

近年、AIが歴史上初めて実用に供されるようになった。その中心技術は深層学習（Deep Learning）である。しかしながら、学習とは過去のデータに依存する方式であり、万能ではない。ここではAIの他の部分に焦点を当て、複雑系をはじめとするAIの哲学的側面を論じ、今後のさらなる発展の方向性を示したい。

知能は複雑系であり、またその扱う対象も複雑系である。複雑系では完全情報が得られず、アルゴリズム（計算結果の正しさを保証する機械的手続き）が構築できない。そのような系をうまく扱うことが知能の働きだと考えている。そして、人間はそのような処理に長けている。AIでもそのような手法が求められる。

AI研究は、コンピュータによる記号処理でそのような人間の能力を実現しようとして始まったが、それは同時に知能とは何かということの追及でもあった。初期のAIでは記号の処理が知能の本質であると考え、外界の情報を記号化して内部に取り込み、それを使って推論しようとした。ここでは直ちに「フレーム問題」が発見された。これは対象物に関する知識を記述しようとする膨大なものになり、その中から推論や判断に関係するものだけを適切に抜き出して処理することが不可能であるというのだ。

人間には、関係する知識のみに焦点を絞ったり、不完全な知識の下でも推論したりして、（たまた間違いが）適切な解を見出す能力がある。AI研究者はこれを「常識推論」と呼び、フレーム問題の解決を試みたが、失敗した。全てを内部表現で処理しようとしたのが失敗の原因だ。複雑系の全て

を表現できるわけがない。近年では得られる情報は部分的であるという前提に立つ「限定合理性」の考え方が中心となっている。

一方、生態学、システム論、心理学など様々な分野で、環境との相互作用の定式化が試みられている（オートポイエシスや環世界など）。情報の全てを個体内で処理するのではなく、環境をうまく使うのだ。その方向性の一つにブルックスがロボット用アーキテクチャとして提案した、内部表現に依存しない（しすぎない）「服属アーキテクチャ」（subsumption architecture）がある。これを更に環境まで含めたループとして拡張することによって環境との相互作用を利用する知能アーキテクチャとなる。

知能を含む複雑系を対象とする研究の方法論にも同じ枠組みが適用できる。分割統治を中心とする分析的方法論と並置できるような、複雑系の構成的方法論を提案する。この方法論の核心は環境を経由する速いループを多数、並列に回すことである。このループの一つを展開するとそれは更に多数のループが並立する構造になって、フラクタル構造となっていることがある。実際、分析的方法論のループは構成的方法論の一部となっていると考えられる。

この構成的方法論はAI研究に使えるだけでなく、IT（情報技術）一般に使える。速いループを回す手法はソフトウェア開発ではアジャイル開発技法と呼ばれ、採用されている。

20世紀は物理学が飛躍的に発展した時代であった。21世紀は、20世紀に開発された様々な技術を用い、情報が社会の仕組みを変えようとしている。

## —Keywords—

### フレーム問題：

人間にとっては常識であるような知識や規則をAIが扱えるようにするには、それらをすべて書き下さねばならないが、完全に書き下すことはできない。また、その量が膨大になって現実的な推論ができないという問題。

### 環境との相互作用：

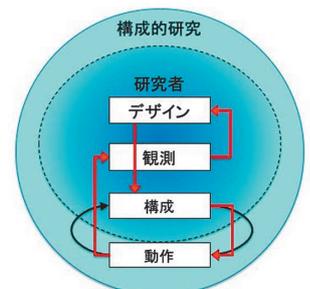
主体の働きを環境との相互作用として捉える考え方。環世界、アフオーダンス、オートポイエシスなど様々な定式化がなされているが、相互作用の重要性を主張する点では皆同じである。

### 環世界：

ユクスキルが1900年頃に提唱した考え方で、生物と無関係に外に存在する世界ではなく、生物が自己を投影したものが生物の生きる環境となるというもの。ギブソンの、環境のアフオーダンスを主体がピックアップするという考え方は方向が逆。

### 構成的方法論：

自然科学の主な方法論である分割統治、すなわち複雑な対象をより単純な要素に分割してそれぞれを理解するという手法が使えない分野での研究方法論。構成と観測のループを回す。



## 1. はじめに

近年、AIが歴史上初めて実用に供されるようになった。深層学習 (Deep Learning) が囲碁で世界チャンピオンに勝利してその実力を示して以来、融資の可否判断、新人採用時の応募書類のスクリーニングなど、様々な分野でAIが使われるようになった。しかしながら、学習とは過去のデータに依存する方式であり、それらを超えることはできず (データの挿入はできるが外挿が困難)、万能ではない。深層学習はAIの一分野であるが、その全てではない。医療分野の応用で注目を集めているIBMのWatson<sup>\*1</sup>では深層学習だけでなく、従来の記号処理が中心的に使われている。ここではAIの他の部分、特に機械学習以外の記号処理に焦点を当て、複雑系をはじめとするAIの哲学的側面を論じ、今後のさらなる発展の方向性を示したい。

複雑系の考え方は1990年頃日本でも盛んに議論された。筆者は特に津田一郎<sup>16)</sup>や池上高志と様々な研究会で意見交換をしてきた。この時期筆者が主査を務めていた情報処理学会人工知能研究会は名称を「複雑系と知能」研究会に変更した。

ラングトンはALife (Artificial Life) とAIは同じものを逆方向から追求していると書いている<sup>4)</sup>: AIは存在する知能 (人間) からトップダウンにその原理を追求し、ALifeは単純な原理からボトムアップに生命の成り立ちに挑むものである。しかし、筆者はそうは考えていない。本稿の残りの部分で述べるように、AIもボトムアップ (構成的) 学問体系である。

複雑系 (complex system) とは、部分に分割してしまうと全体としての性質を失ってしまうような系のことである。つまり、全体は部分の和ではない。そのため、自然科学の主な方法論である分割統治、すなわち複雑な系をより単純な要素に分割してそれぞれを理解するという手法が使えない。AI研究の歴史を複雑系の観点から見直し、新たな構成的方法論を提案する。これは研究の方法論と知的システムのアーキテクチャの両方に対する提案である。

## 2. 複雑系の観点

AIを含む複雑系は以下に示すような特性を持っているので、その研究には従来とは異なる観点と方法論を必要とする。情報処理としてとらえたときの複雑系の性質 (問題点) は以下である:

P1 多自由度系である。従前は必要十分な自由度 (パラメータ数) を持ったシステムを考えることが多かったが、複雑系ではあり余る自由度を、問題に応じて制御する (自由度を減らす) ことが問題となる。

ゴルフのスイングなどが典型例であるが、人間の体を持つ自由度を如何に下げて、固定したスイングを作り出すかが目標となっている。

P2 複数の切口 (階層) がある。多自由度であることと関連するが、システムは単一の切口では理解・設計できない。様々な切口で異なる側面が見える。

人間が山を見るとき、遠くからは稜線などの輪郭が見え、近づくにつれて森が、更に近づくとも木々が、そして幹や葉の構造が見えてくる。これで終わりではなく、道具を使えば細胞や更には分子構造が見える。細胞を見ている時には山は見えない。

P3 部分に分割すると失ってしまう全体としての本質がある。

人間社会や森を理解しようとすれば全体から個々の細胞や分子に到るまでの全ての階層を見なければならない。しかしながら、それぞれの階層に独自の法則があるので、物理学的な還元論では説明できない。ゴルフスイングは量子力学では説明できない。

ドイッチュ<sup>2)</sup>は、還元論では説明できない物理現象の例としてロンドンのパラメント広場にあるチャーチルの銅像の鼻にある銅の分子がなぜそこにあるかの説明を挙げている。これは、より単純な現象に分解しても説明不可能で、より高位の戦争、指導者、像などという概念を持ち出さねばならないとしている (文献2 pp. 21-22)。

P4 処理の方式により取り出せる情報が異なる。あるいは、どのような処理をすべきかがあらかじめ (処理するまでは) 自明ではない。

物理学は複雑な世界を単純化して理解しようとするものであるが、最近の素粒子論などは実験可能なエネルギー領域を超えつつある。また超ひも理論などのような多次元空間を想定する理論の実証実験を三次元空間で行うときには、見たいものだけを見る (3.3節「環世界」参照) ことになっているのではないだろうか。

このような性質を持つ複雑系に関しては以下のような処理方式が求められる:

M1 柔軟な処理方式。状況に応じて動的に処理方式を変更する必要がある。

M2 焦点の制御。多くのパラメータや情報から、必要なものに絞り込む方式が必要である。

M3 全体と部分の関係に対する理解。以前から特にシステム論<sup>14)</sup>において全体と部分の関係が議論されているが未だに明解な理解には至っていない。また、情報を大域的なものから細部へと、トップダウンに処理する手法も研究開発する必要がある。

なお、複雑系の情報処理を行う場合には完全処理をあきらめる必要がある。経済学でも完全合理性から限定合理性を扱うように考え方が変化してきているし、AIにおいても1995年Computer Thought Awardの受賞者ラッセルも限定合理性を強調している。<sup>10)</sup> 彼はAIを「正しいことをするシステムを設計する問題」と定義し、「正しいこと」とは何かを問題にする。そして正しいとは、あるエージェント

\*1 <https://www.ibm.com/watson/jp-ja/>, 2018/10/24にアクセス。

が与えられた情報をもっともなやり方で処理することであるとしている。結果の正しさではなく、処理の正しさ（もっともらしさ）を問題にしているのである。彼は最近、AIに人間の価値観を教えることの重要性を主張しているが、同時に「人間の価値観は完全には理解できない」ということも教える必要があるとしている。<sup>11)</sup>

そのような限定合理性への有力なアプローチの一つが状況依存性の考え方である。必要に応じて環境への依存度の異なる表現を使い分けるのである。状況推論で用いる表現の特徴は以下の通りである<sup>18)</sup>：

推論に用いられる表現は必ずしも表現される対象や状態を完全に模倣する必要はない。表現が環境に適切に埋め込まれている、あるいは表象操作とそれに基づく行為のための主体の構造が適切であれば推論に用いる表現自体は簡略化することが可能である。さらにそれとともなって推論操作も簡略化し、効率的に推論を行うことが可能である。

### 3. AI研究の歴史：完全処理から環境との相互作用へ

知能は複雑系であるし、知能の扱う対象も複雑系である。複雑系の情報処理の要点は、分割統治法が使えないこと、そして対象の完全情報が期待できないことである。情報のごく一部しか見えないし、一部しか処理できない。全体の情報はわからないようなものを適切に処理する能力のことを「知能」と呼びたい。拙著<sup>20)</sup>では知能を「情報が不足した状況で適切に処理する能力」と定義した。人間はこういった処理が得意であるが、AIとしての実現は難問である。<sup>\*2</sup>

#### 3.1 古典的AIの失敗

古典的AIでは外界の情報を記号化して内部に取り込み、その内部表現だけを使って推論しようとしていた(図1)。そこでは直ちに「フレーム問題」が発見されたが、これは対象物に関する知識を、関係するものだけを完全に記述することも困難であるし、仮に記述できたとしても、そこから関係ある知識のみを使って適切な結論を導くことも困難であるという問題である。記述量が爆発したり、推論量が爆発したりして現実的には解けない。

フレーム問題に関しては様々な小説のモチーフとなっているが、筆者が秀逸だと思うのは人工知能学会誌に連載されているSF作家によるショートショートの一つ、新井素子による、お片づけロボットにゴミとそうでないものの区別を教える問題<sup>23)</sup>である。不要になった書類と、必要な領収書などの紙片の区別は人間の生活全般に関わる問題で、条件を列記できるほど単純ではないのだ。

原理的には人間もこのフレーム問題を持っていることが

<sup>\*2</sup> この部分に深層学習が使えるという期待がある。人間自身にも自分がどう処理しているか理解できない、いわゆる「暗黙知」を深層学習で扱えるかもしれない。

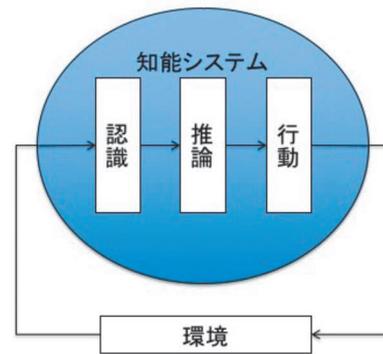


図1 AI黎明期の知能システム像。

指摘されているが、人間はそれが表面化しないように振る舞っている。人間には、不完全な知識の下でも推論し、適切な解を見出す能力がある。これを「常識推論」と呼ぶ。人間が完全情報のないままに常識を働かせて行う推論の定式化が試みられ、<sup>7)</sup>そして失敗した。<sup>5)</sup>

#### 3.2 限定合理性と服属アーキテクチャ

全てを内部表現で処理しようとしたのが失敗の原因だ。複雑系の全てを表現できるわけがない。そこで、限定合理的エージェント (bounded rational agent)<sup>10)</sup> という概念が浮上してきた。情報や処理能力が限られているために完全な合理性を持ってない。その条件の下でどのように振る舞うのが(正解ではなく)ベストかという問題設定である。あるいは別の言い方をすると「鳥の視点から虫の視点へ」の変換が求められている。鳥の視点とは、上空(システムを超越した位置)からシステムの全体を見渡せる視点のことであり、虫の視点とはシステムに埋没した形で自分の周囲のことしかわからないという視点である。限定合理的エージェントという考え方では、理論家あるいは設計者も虫の視点をとらねばならないと主張する。つまり、目的や動作環境などの全体を見渡せる人がエージェントをプログラムするという立場ではなく、システム内の虫(エージェント)の身になって、限られた視点から見ていくとどうなるかという設定が必要である。

虫の視点の考え方は複雑系に関連して提唱されてきた「内部観測」<sup>15)</sup>の視点にも近い。客観的な外部視点ではシステムと環境の全体を見渡せるので完全情報を仮定しがちであるが、状況内のエージェントは内部視点しか持つことができない。

この設定を具体化する方略の一つとして、ブルックスがロボット用アーキテクチャとして内部表現に依存しない(しすぎない)、服属アーキテクチャ(図2)を提案している。<sup>1)</sup>

これは環境との間で複数のループを並列に回すものである。図1の古典的方法ではループを一巡する間に様々な推論を行う必要がある(ロボットの場合だと障害物の認識と回避、操作対象物や目的地の認識など)のでループが遅い。これに対し服属アーキテクチャだと最下位の行動ループな

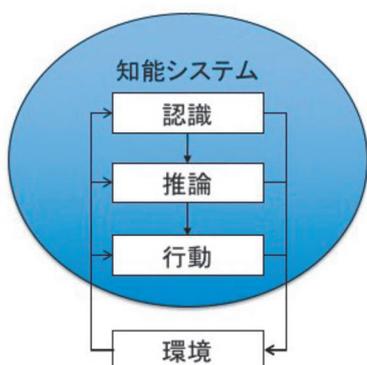


図2 服属アーキテクチャ (subsumption architecture).

どでは障害物回避などは脊髄反射的に行うことが可能になっている。複雑系情報処理の観点から見ると様々な時定数のループが混在することにより、様々なスケールの問題に同時に対応可能となる(2節のP2を参照)。アイロボット社の掃除機はこのアーキテクチャを実装したものである。

古典的アーキテクチャを火星探査用のローバーに適用すると、数メートル進むごとに周辺の地形を観測し、地図と照合するので、毎分数メートル程度しか進めないというが、ブルックスの提案した火星ローバーはその十倍以上の速度で動けるといふ。

### 3.3 環境との相互作用

環境との相互作用の重要性は特に生態学の世界で主張されている。多くの生物は、情報の全てを個体内で処理するのではなく、環境をうまく使っている。

マツラナとバレラによって提唱されたオートポイエシス (autopoiesis)<sup>6)</sup> とは、自己 (auto) を産出 (poiesis) するシステム——常に自己を作り直しながら動いているシステム——のことである。バレラは「神経システムには入力も出力もない」という言い方をしている。マツラナは視覚系を調べているうちに、外界にない色が見えるという現象を発見した。物理的に色というのを規定するには波長を使い、普通は我々も大体それに近いものを見ているわけだが、条件によってはまるきり違うようなものが見えてしまう。たとえば照明の明るさを変えてやると、物理的に出てくる波長はどんどん変わるのにもかかわらず、我々は大体同じ色に見ている。これには知識によるトップダウンの介入がある。スキー場などで色のついたゴーグルを装着すると一瞬雪がゴーグルの色に変わるが、すぐに白に戻る。これは脳が「雪は白い」という知識によって補正しているからである。

視覚神経システムというのは目の表面で途切れていて、そこから外が外界で、それより内側が内部だという見方ではなく、対象物と光の刺激、そして認識系の全体をひとまとめにして、一つのシステムとして見なければいけないというのがオートポイエシスの主張である。そうすると、全体のシステムには入力の必要がなく、全てがシステム内の事象で、それらがシステムの次の状態を作り出すだけだと

いうわけである。つまり、対象と脳との相互作用によってものが見えるのである。

先のスキー場の例は、主体の知識を環境に投射した上で、環境を認識している例と考えられる。ユクスキュルら<sup>13)</sup> は「環世界」という概念を提唱した。生物と無関係に外に存在する世界ではなく、生物が自己を投影した形での世界を環世界と呼び、これが生物の生きる環境となるというのである。オートポイエシスが自ら境界を作り出すのと本質的には同じことである。

たとえばヤドカリがイソギンチャクに出会った場合、自らの状態(殻無し、殻だけあり、殻にカモフラージュあり)に応じて3通りの反応がある。殻無しの場合はイソギンチャクに入り込み殻とする。殻ありの場合はイソギンチャクを殻につけてカモフラージュに使う。カモフラージュが既にある場合は食料と見なして食べるというものである。つまりヤドカリの視野にある同じ円筒形の対象物が、そのときのヤドカリの状態によってその意味が変わるのである。

環世界に近い概念としてギブソンの提唱したアフォードンス<sup>3)</sup>がある。これは環境が提供(アフォード)する機能を主体がピックアップするというもので、環境との相互作用を重視するという意味では同じである(さらに、例証として採り上げられている認知現象もほぼ同じである)が、環世界とは情報の流れが逆方向である。AIの立場からは、アフォードンスをピックアップする機構が明示されておらず、アーキテクチャに落とせないため、使えない。

知能の本質は環境との相互作用の中にあるということ、サイモンは蟻の足跡に例えて説明した。<sup>12)</sup> 地面を歩く蟻の軌跡は複雑であるし、障害物をたくみに避け、しかも最短経路をたどっているように見える。しかし、いくら蟻の内部構造を調べてもこの複雑さを生み出す機構は見付からない。たまたま歩きやすい方に歩いている蟻の軌跡が総体として複雑に見えているだけである。このように結果として知的に見える振る舞いの半分は環境の起伏などの複雑さが担っているというのである。環境と主体のインタラクションという観点を抜きにして、いくら主体の構造や性質を調べても本質にはたどりつけない。

図2に、環境との相互作用を明示的に採り入れたのが図3である。ここでは知能システムは環境(環世界)までを含むものとして捉えられている。オートポイエシスの考え方によればこの外側の境界をシステムの動作が決めている。服属アーキテクチャ(図2)との違いは、環境をシステムの一部と見做すことにより、「環境に計算させる」ことが可能となっている点である。これは前述の状況推論の考え方と同じである。

なお、図では示せていないが、実際にはこのループは様々なスケールのループが入り混じったフラクタル構造となる。たとえばロボットの歩行を想定すると、障害物を回避して歩いていくという、行動と環境の間のループが矢印で図示されているが、その矢印は実際にはセンサーによる

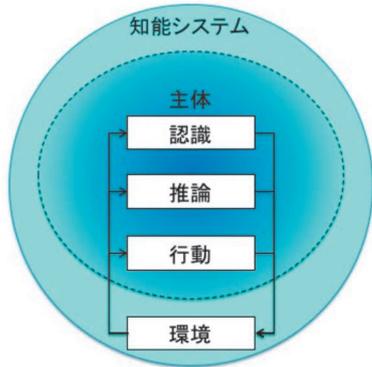


図3 環境と相互作用する知能像。

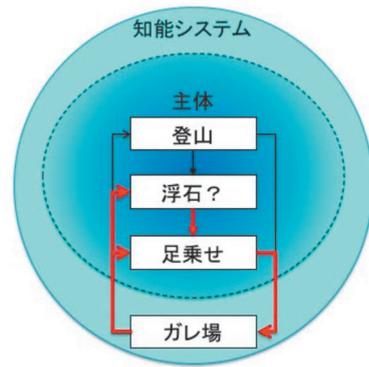


図4 ガレ場登山の例。

距離の測定，サーボによる足の運動制御などのより細かいループが含まれている。

ボストン・ダイナミクス社では軍事利用などを想定した運動能力の高いロボットを開発している。<sup>\*3</sup> これらは最下位の行動ループを高度に発達させたものである。一方で上位の，認知機能レベルのループの開発は遅れている。これには，以下の3.4節の考え方や4.1節で述べる方法論が必要とされる。

### 3.4 環境に計算させる

「環境に計算させる」という概念を具体例で示したい。以下は登山の番組で実際に解説されていたことである。

登山で石の多いガレ場を登るとき，浮石に足をとられなないように注意しなければならない。しかし，浮石かどうかは一見ただけでは判断できないので，軽く足を掛けて，動かないことを確認してから体重を載せるようにすればよい。これを図示したのが図4である。浮石かどうかを判断したい上位モジュールが，行動モジュールに軽く足乗せすることを指令する。その結果を観測して（足で感じて）次の行動に移れば良い。古典的AIアーキテクチャで浮石かどうかを判断させると，カメラなどのセンサー情報を取り込んだ上で，推論を行うことになる。新しい方法論ではセンサー情報だけから判断しないで，環境に介入し，環境に計算させているのである。

ロボットの世界でアクティブセンシング<sup>22)</sup>と呼ばれているものはこれに近い考え方である。ロボットやセンサーを能動的に移動させたり，触覚を使ったり，あるいはレーザーのように信号を環境に向けて発射したりすることなどが含まれるが，対象物を動かすことまでは想定されていないようである。

最近のAI研究動向の主流は深層学習を応用したものになっているが，その一方で上記のような環境を経由したループとして知能を研究する方向性は，身体性を持つロボット研究の分野で顕著である。図3で示した構図がブルックスの服属アーキテクチャ（図2）を拡張したものになっているのは自然な流れである。知能は環境との相互作用

用によって支えられていると主張するロボット研究者は多い（たとえばファイファー<sup>8)</sup>や國吉<sup>27)</sup>など）。ロボットに深層強化学習を採り入れ，様々なマニピュレーションを行う研究（論文よりはWeb上の動画発表が多いが，たとえば文献9など）も盛んで，Amazon Robotics Challengeという大会が毎年開催されている。深層学習によって画像認識性能が格段に向上したため，自分の動作の結果を目で確認できるようになったことも大きい。強化学習は，様々な試行錯誤によって図3のようなループを回し，結果の良かった行為を強化していく学習である。原理的には進化計算と同様の試行と選別のループである。

## 4. 研究方法論への展開

### 4.1 構成的研究の方法論

これまでに述べてきたような複雑系を扱う知能の構築には新しい方法論を必要とする。自然科学の主な方法論である分割統治，すなわち複雑な系をより単純な要素に分割してそれぞれを理解するという手法が使えない。システムを全体として捉え，それが環境中で動作している状態を捉える方法論が必要である。つまり部分同士の有機的繋がり方（システム論）こそが研究の対象となる。

そこで，分割統治を中心とする分析的方法論と並置できるような，構成的方法論を提案する。分析は全体から部分への分割であり，構成は部品を組み立てて全体を作り上げることから，両者は単に方向が逆であると考えられることもあるようだが，実はそうではない。プラモデルのように部品が揃っている場合はその通りであろうが，現実の問題ではその部品が同定されていないところから始めなければならない。部品を個々に研究できないため，それらを組み合わせた状態を観測し，その結果を部品やそれらの関係（システム）のデザインに戻していく必要がある。

構成的方法論の核心は環境を経由する速いループを多数，並列に回すことである。近年ソフトウェア工学で採り入れられているアジャイル開発技法<sup>17)</sup>はこの例である。ループを回しながら全体の構成を修正して目標に近づけるのである。また，このループの一つを展開するとそれは更に多数のループが並列する構造になっていて，構造自体がフラ

\*3 <https://www.bostondynamics.com/bigdog>, 2019/2/8 にアクセス。

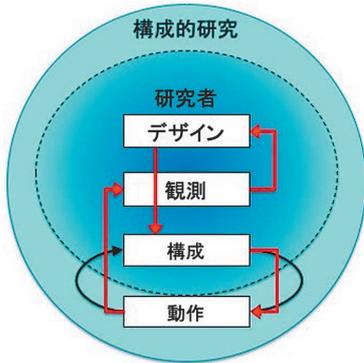


図5 構成的研究の方法論。

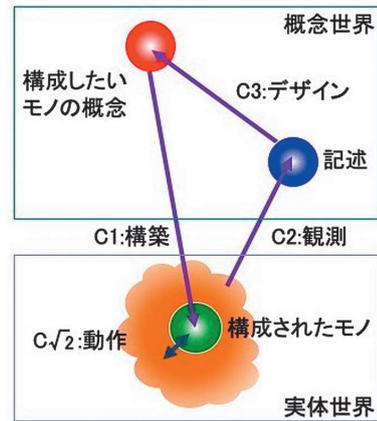


図6 構成のループを表現したFNSダイアグラム。

クタル構造となっていることがある。実際、分析的方法論のループは構成的方法論の一部となっていると考えられる(4.3節)。

構成的方法論は主として工学に適用される<sup>19)</sup>ものと考えているが、その適用範囲はかなり広く、自然科学以外の様々な分野(化学、デザイン学、サービス学など)で有用である。

図3で示したアーキテクチャはそのまま構成的研究の方法論を表すものとして使える(図5)。

矢印が入り組んでいるので説明しておく。

図の最上部に位置しているのが構成したいシステムのデザイン(完成イメージ)である。このデザインを実現すべくシステムが構成される。研究者の構成したシステムは環境内で動作する。構成と動作の間に細い黒曲線で示したループが形成されることもある。その上にシステムの動作を観測し、それとデザインとの差異を検知し、必要ならデザインを変更し、システム構成へと戻すループ(赤い太線で示している)が形成される。

#### 4.2 FNSダイアグラムによる定式化

図5の赤太線で示した「8」の字状の2番目のループは以前の文献21で図6のように表現していたものと同型である。こちらの方が簡明なので参考までに図示しておく。このFNS(Future Noema Synthesis)ダイアグラムは日本の現象学を作り上げた木村敏の著作にあるノエマとノエシスの間のループ<sup>25)</sup>にヒントを得て定式化したものである。<sup>\*4</sup>ここでは概念世界と実体世界の行き来を定式化しているが、概念世界(図5の点線で区切られた内側のエリアに対応)は研究者のもの、実体世界(図5の点線の外側のエリアに対応)は研究対象とするシステムが存在する実世界環境である。図5で四角い枠内に示しているのは全て動作であるが、図6ではそれが矢印として示されている。「目標」は(デ

ザインされた結果の)達成すべき未来ノエマ<sup>\*5</sup>である。これを実現すべく「C1:構築」されたモノが「C√2:環境と相互作用」して作り出す動作や現象(図では雲状に示されている)がノエシスである。この現象を「C2:観測」(あるいは分析)して現在ノエマとしての「記述」が生まれる。現在ノエマと未来ノエマの差を解消するために次の「C3:デザイン」がなされる。パラメータの絞り込み(2節のP1, M2を参照)もC3で行われる。

少し脇道にそれるが、同様の構成と分析のループは進化論にもみられる。進化論を非常に単純化して述べると、突然変異で様々な可能性を産み出し、それらが生存環境で淘汰される。この考え方はALifeなどでも進化計算<sup>26)</sup>として採り入れられている。ただし、生物進化自体はそうに単純なものではないという批判があり、グールドをはじめとして様々な修正ダーウィニズムが提案されている。こうして考えると科学や工学の研究行為も進化システムなのである。<sup>24)</sup>

#### 4.3 分析的方法論の定式化

構成的研究の方法論における「デザイン」を「仮説生成」に、「構成」を「実験」に置き換えると、それは直ちに分析的科学の方法論となる(図7)。理論を検証するための実験を計画し、その観測結果を元に仮説生成を行うのである。そしてこの仮説は更なる実験によって検証される。ただし、分析と構成は方向が逆である。構成的研究はシステムが無い状態から始まり、その構成を目的とする(図5ではデザインから動作という上から下への流れである)が、分析的研究は既に存在する現象から始まり、その理解を目的とする(図7では現象から仮説生成への下から上への流れである)。

実は分析は構成における観測からデザイン(特に、デザインを支える理論)への矢印(図6では「C2:観測」の部分)をフラクタル的に展開したものである。例としては、飛行

<sup>\*4</sup> ノエマとノエシスは元々フッサールによる現象学の用語であり、ノエマは意識の对象的側面、ノエシスは意識の作用的側面とされているが、筆者は木村<sup>25)</sup>に従い、ノエマは意識の対象物すなわち概念そのもの、そしてノエシスはその概念が現象を作り出すという行為、あるいはその生成物の意味で使っている。

<sup>\*5</sup> 木村の用語。まだ達成されていないという意味で未来である。実際に構成されたものに対応する概念が現在ノエマとなる。

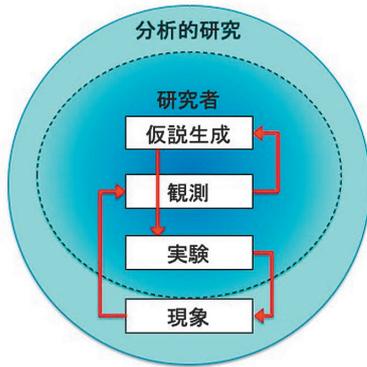


図7 分析的研究の方法論。

機や船を構築する研究(工学)において、形態と揚力や抵抗の関係を観測する過程で、それらの理論化(科学)である流体力学が、航空工学とは切り離された形で産まれたことを挙げておく。そしてこの流体力学の知見はその後の設計の指針として使われるのである。

また、分野によっては実験が存在せず、観測と仮説生成の間のループで理論が構成されるものもある。天文学や宇宙論がその例である。

## 5. まとめ

複雑系の情報処理とは、全体を処理できないので複数の切口(階層)や多自由度系を視点を絞り込むことにより必要に応じて適切な処理をする方式のことである。人工知能で扱う知能はまさにそういう処理を行っていると考えられる。そのような処理方式として状況依存近似処理が有望である。

そのために服属アーキテクチャを拡張し、環境を積極的に利用するアーキテクチャを提案した。そして、このアーキテクチャがそのまま構成的研究の方法論となることを示した。

## 参考文献

- 1) R. A. Brooks, *Artificial Intelligence* **47**, 139 (1991); 柴田正良訳, 現代思想, **18**, 85 (1990).
- 2) D. Deutsch, *The Fabric of Reality* (The Penguin Press, 1997); 林一訳, 『世界の究極理論は存在するか—多宇宙論から見た生命, 進化, 時間』(朝日新聞社, 1999).
- 3) J. J. Gibson, *The Ecological Approach to Visual Perception* (Houghton Mifflin, 1979).
- 4) C. Langton, ed. *Artificial Life* (The MIT Press, 1995).
- 5) H. J. Levesque, The Winograd Schema challenge. in AAAI Spring Symposium: Logical Formalizations of Commonsense Reasoning, 2011.
- 6) H. R. Maturana and F. J. Varela, *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living* (D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, Holland, 1980).
- 7) J. McCarthy, *Artificial Intelligence* **28**, 89 (1986).
- 8) R. Pfeifer, J. Bongard 著, 細田耕, 石黒章夫訳, 『知能の原理—身体

- 9) A. Rajeswaran et al., <https://arxiv.org/abs/1709.10087v2>.
- 10) S. Russell, Rationality and intelligence. in Proc. of IJCAI-95, pp. 950-957 (1995).
- 11) S. Russell, Provably beneficial ai. in IJCAI 2017 (2017). <https://www.youtube.com/watch?v=pmSc9ZxyA-4>, accessed March 16, 2018.
- 12) H. A. Simon, *The Sciences of the Artificial* (MIT Press, third edition, 1996); 稲葉元吉, 吉原英樹訳, 『システムの科学 第3版』(パーソナルメディア, 1999).
- 13) J. V. ユクスキユル, G. クリサート著, 日高敏隆, 羽田節子訳, 『生物から見た世界』(思索社, 1973, 岩波文庫版2005年).
- 14) ルードヴィヒ・フォン・ベルタランフィ著, 長野敬, 太田邦昌訳, 『一般システム理論—その基礎・発展・応用』(みすず書房, 1973).
- 15) 郡司ベギオ幸夫, 松野孝一郎, オッター・レスラー, 『内部観測』(青土社, 1997).
- 16) 津田一郎, 『カオスの脳観—脳の新しいモデルをめざして(サイエンス叢書)』(サイエンス社, 1990).
- 17) 片岡雅憲, 小原由紀夫, 光藤昭男, 『アジャイル開発への道案内』(近代科学社, 2017).
- 18) 片桐恭弘, 状況推論とその機構について. 日本認知科学会第8回大会発表論文集. 日本認知科学会, 1991.
- 19) 中島秀之, *科学* **71**, 620 (2001).
- 20) 中島秀之, 『知能の物語』(公立はこだて未来大学出版社, 2015).
- 21) 中島秀之, 諏訪正樹, 藤井晴行, *情報処理学会論文誌* **49**, 1508 (2008).
- 22) 金子真, *計測と制御* **35**, 274 (1996).
- 23) 新井素子, *人工知能学会誌* **31**, 581 (2016); 人工知能学会編, 『人工知能の見る夢はAIショートショート集』(文春文庫, 2017)に再録.
- 24) 市川惇信, 『暴走する科学技術文明』(岩波書店, 2000).
- 25) 木村敏, 『あいだ』(弘文堂, 1988).
- 26) 金子邦彦, 池上高志, 津田一郎, 『複雑系の進化的シナリオ—生命の発展様式(複雑系双書)』(朝倉書店, 1988).
- 27) 國吉康夫, *人工知能学会誌*, **23**, 283 (2008).

## 著者紹介

**中島秀之氏**: 大学院生であった1978年にMIT人工知能研究所に留学して以来、40年間AIの研究を続けている。1983年東大情報工学専門課程修了(工学博士)。同年より日本のAI研究の最高峰であった電総研に入所。産総研サイバーアシスト研究センター長、公立はこだて未来大学学長、東大先端人工知能学教育寄付講座特任教授を経て2018年4月より札幌市立大学学長。

(2018年10月24日原稿受付)

## AI Research and Its Methodology from the Viewpoint of Complex Information Processing

Hideyuki Nakashima

abstract: When a complex system is decomposed into subsystems, it loses some of the essential property. In other words, the whole is not the sum of its parts. Therefore, the traditional divide and conquer method, which is a common strategy for natural sciences, is not applicable.

Intelligence is a complex system. The world that an intelligent system handles is also a complex system. Analytical approach cannot be used to construct of control intelligent systems. We will review the history of AI research from the viewpoint of complex systems and propose a new constructive methodology. This methodology applies both to the research and the design of intelligent systems.