

生命と「わかる」の数理モデル化の試み

森川健太郎・富田直秀・井上康博

一 「わかる」ことと生命

「わかる」とはどういうことか。我々は普段、自分が何かをわかったのかわかっていないのか、感覚的に判断している。しかし、自分が本当にわかっているのかどうかと問われると、それは答えるのが難しい問題である。例えば、物理学者の朝永振一郎は数学をわかることについての実感を、エッセイで次のように述べている。

数学を勉強しているとき、本に書いてあること、いくつかの公理から出発していろいろな結論を証明して、それをもつて大きな体系を組み立てていくその各段階の論理の展開はすっかりわかっても、全体的に一向に理解したという気もちの起らないことがある。(…) そういう、あと味のよくないわかり方は、おそらく本当の理解でないようで、そういう場合は大抵本を閉じるとともに中味をすっかり忘れてしまう。(一)

このように、各段階での論理の展開がすっかりわかっただら、それはわかっただけでなく、本当に理解したとは

言い難い感覚が残ることがある。また、数学をわかることに関して、数学者の岡潔は次のような実感を語っている。

証明が始まるとともに意識が流れ始め、証明が終わるとともに流れは止まる。そのとき全体が一時にわかるのである。これを経験するまでは、純正数学がわかるとはどういうことかわからないのである。(…)論理や計算は全くの異物であるから、うっかりこんなものを混ぜようとすると流れはビタリと止まる。(…)この流れは継げないのであつて、もし切れたら初めからやり直すほかないのである。(2)

朝永振一郎の言う「本当の理解でない」わかり方は、岡潔の言う「論理や計算」の混ざった切れ切れのわかり方と同じ感覚を表したものだと思われる。このわかり方は、各段階での論理を追うことはできているので、形式的にはわかっていると言えるものであるが、「わかつた!」という実感を伴うわかり方ではない。一方で、岡潔の言う「全体が一時にわかる」わかり方は、自分がわかっていることのはつきりとわかる実感的なわかり方である。この「実感的な」わかる』の「証明が始まるとともに意識が流れ始め、証明が終わるとともに流れは止まる。そのとき全体が一時にわかる」という感覚は、西田幾多郎が『善の研究』で述べている實在の発展・完成の仕方「先ず全体が含蓄的・implicitに現れる、それよりその内容が分化発展する、而してこの分化発展が終った時實在の全体が実現せられ完成せられる」(3)に通じるものと思われる。すなわち、実感的な「わかる」は、西田の言う「厳密なる統一」(3)を保った発展に対応する感覚ではないかと思われる。

さて、形式的な「わかる」しか得られていなくても、それを用いて問題を解くことなどは、ある程度可能である。そのため、実感的な「わかる」に至っていないとしても、それを問題に思わないことが多い。しかし一方で、実感的

な「わかる」が得られたなら、それは「わかった」ことそれ自体に心の充実を感じるものである。これは、自らが「いま」を生きる活動としての充実感であり、形式的な「わかる」の状態では得られないものである。また、実感的に「わかる」ことは、筆者②（富田）による本稿の別論文「科学・技術に『質』なる目標を与える『型』（Art-Science Link Worker: 実感する実践者たち）」で述べられているように、「自分事」として物事に真摯に対峙する」ことも言える。そして、これは、科学・技術の開発において、「質」の高いものを生み出すのに必要なことである。最適化すべき機能として書き下されたものを超えた（書き下される以前の）生の欲求を、その時々を生きた「いま」の実感として持ちながら開発を行うことで、機能として書き下しきれない「質」の高い開発が行われるのである。「いま」を生きる活動として得られるのが実感的な「わかる」（あるいは「本当の理解」）であり、それが心の充実をもたらし、「質」の高い開発を生む。西田幾多郎は、「論理と生命」の序文において「具体的真理は具体的生命の立場から考へられるものでなければならぬ。」⁴と述べているが、これは、右に述べたような、「本当の理解」は「いま」を生きる活動としての「わかる」であるという感覚に通じるもののように思われる。そこで、筆者①（森川）は、西田幾多郎の生命についての捉え方を参考にして、実感的な「わかる」とはどういうことかという問題へアプローチすることを試みた。

二 西田幾多郎の生命観を参考にしたアプローチ

西田幾多郎が生命をどのように捉えているのかの参考として、筆者①は次の文章に着目した。

我々は有機体と云ふものを考へる時、部分が何処までも全体の部分であると共に、部分が独立的であり、部分が

全体を宿すと考へる。(…)細胞は何処までも身体の細胞であり、一の多である。全体的一に對してそれぞれの機能を果すかぎり細胞である。併しそれが単に一の多となれば、全体的一はもはや有機体ではなくして単なる機械となる。生命と云ふものはなくなるのである。(5)

筆者①は、これを「全体の活動が、単に部分の活動の組み合わせとしてではなく、それが全体として一体となった活動として捉えられるときに、それが生命として認識される」ということだと解釈した。このように解釈すると、これは第一節で述べた数学の「わかる」の実感と対応する。すなわち、「各段階での論理の展開」がわかっただけでは「単に一の多」であり、全体的一としての「生命と云ふものはない」状態で、それらが一つの意識の流れとなったときに「部分が全体を宿す」活動となり、生命となるのだと対応付けられる。

この解釈に基づき、実感的な「わかる」を特徴づけるものは「単に部分の組み合わせではなく、全体として一体となった活動する構造」ではないかと考えた。そして、この構造を数理モデルとして表現することで、実感的な「わかる」についての数理的な喩えを作り、このモデルの振る舞いを観察することにより、実感的な「わかる」とはどういうことかを調べることを試みた。次節でこの数理モデル化について述べる。

三 「わかる」の数理モデル化

「単に部分の活動の組み合わせではなく、全体として一体となった活動」を表現するために、①「部分が独立して活動している状態」と、②「部分が全体として一体になって活動している状態」をそれぞれ表現することと、③前者

から後者へ遷移することを表現することが必要である。本研究では、このそれぞれを、次のようなモデル化によって実現した。

① 簡単のため、0または1の値を状態としてとる要素たちの集合の状態遷移のダイナミクスとしてモデル化(図1)。

② (0または1の値を状態としてとる)要素たちがネットワークとして結合され、そのネットワークの性質として頂点(要素)の状態が遷移する(図2)。

③ ①の要素集合ダイナミクスから、そのダイナミクスを生み出すネットワーク構造、すなわち、ネットワークの頂点集合ダイナミクスが与えられた要素集合ダイナミクスを再現するようなネットワーク構造を生成する過程としてモデル化(図3)。



図1 要素集合ダイナミクス。状態値が0の要素を白色、1の要素を灰色で示している。

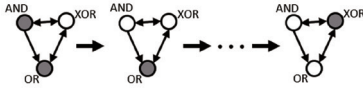


図2 ネットワークの頂点集合ダイナミクス。

②で用いるネットワークは、ブーリアンネットワーク(BN)と呼ばれるネットワークモデルであり、論理演算により各頂点の状態(0または1の値)が遷移する。論理演算は、各頂点に定義された機能(一般には任意のブール関数として定義されるが、簡単のため、ここではAND、OR、XORのみとしている)に従い、その頂点へ入力する頂点たちの状態に対して行われるものである。例えば、図4のように、頂点Aに対して頂点B、Cが入力されており、頂点Aの機能がANDであるとき、頂

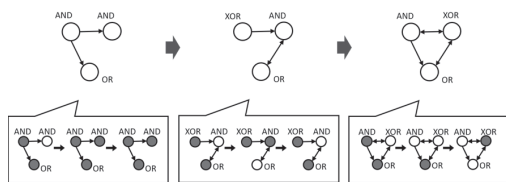


図3 ネットワーク構造を少し変化させて、そのネットワーク構造の頂点集合ダイナミクスを生み出す。そして、そのダイナミクスが与えられた要素集合ダイナミクスとの程度一致しているかを調べ、その結果を参照しながらまたネットワーク構造を少し変化させることを繰り返す。

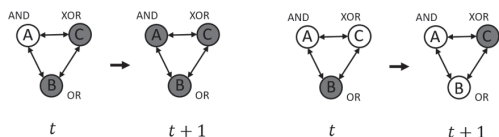


図4 プーリアンネットワーク (BN) の状態遷移 (頂点集合ダイナミクス) の例。

点B、Cの時刻 t での状態が共に1であれば、頂点Aの時刻 $t+1$ での状態は1となる(図4(a))、それ以外の場合は、頂点Aの時刻 $t+1$ での状態は0となる(図4(b))。このように、各頂点の機能と、ネットワークの入出力関係(頂点と頂点を結ぶ矢印)と初期時刻における各頂点の状態が定まると、各頂点の状態遷移のダイナミクスが決定する(各頂点の機能とネットワークの入出力関係を定めたとき、BN構造を定めたと言うことにする)。このダイナミクスは、頂点たちの状態が、それら全てを繋いだネットワークの性質として現れる振る舞いなので、「部分が全体として一体になって活動している状態」と言える。そして、①の

要素集合ダイナミクスに対して②のBN構造を生成する③の過程は、ベイズ統計学などでよく用いられるマルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)によるサンプリングの過程としてモデル化した。すなわち、要素集合ダイナミクスが与えられたときに、最初にランダムにBNを生成して(この段階では、BNの頂点の状態遷移のダイナミクスは、与えられた要素集合ダイナミクスとは一致しない)、そこからBN構造を少しずつ変化(頂点のどれかの機能を変更したり、入出力関係を一部繋ぎ替えたり)させたBNを(確率的に)生成してゆくことで、だんだんと与えられた要素集合ダイナミクスに一致する頂点集合ダイナミクスを生成し、出すものに近いBN構造を生成してゆくアルゴリズムを

採用した。

このモデルの振る舞いを、第一節で挙げた数学の「わかる」の実感に対応させて述べると、次のようになる。まず、要素集合ダイナミクスが与えられるが、それは、わかりたい問題が与えられた状態に対応する。そして、与えられた要素集合ダイナミクスに一致する頂点集合ダイナミクスを生み出すBN構造をMCMCにより生成しようとしている過程は、わかつらうとして考えている状態に対応する。この過程が進行し、与えられた要素集合ダイナミクスを生み出すBN構造が生成された状態が、実感的にわかつた状態に対応する。ここで、そのBNの生み出す頂点集合ダイナミクスが、「証明が始まるとともに意識が流れ始め、証明が終わるとともに流れは止まる」における意識の流れに対応しており、その頂点集合ダイナミクスを生み出すBNが生成された状態（頂点集合の状態遷移ダイナミクスが起こる前）が、「全体が含蓄的に現れ」た状態に対応すると考えられる。実感的な「わかる」は、自分がわかつていることがはっきりとわかるわかり方であり、わかつているのかわかつていないのかが定まるようなものであるが、このモデルにおいても、その区別（実感的な「わかる」に至っているかどうか）は、生成したBNが与えられた要素集合ダイナミクスを生み出すかどうかによって定まるものである。すなわち、わかつていない状態からわかつた状態への遷移が不連続的である実感が、このモデルでは表現されている。また、「各段階の論理の展開はすつかりわかつても、全体的に一向に理解したという気もちの起らない」状態（形式的な「わかる」）は、要素集合の部分的なダイナミクスについてはそれを生み出すBNが生成できているが、全体として一つの（連結な）BNは生成できていない状態に対応すると考えられる。以上のように、第一節で挙げた例に表れている実感に対応するものが、このモデルで表現されている。また、以上の説明は、数学の問題に対する「わかる」のみならず、一般の現象についての「わかる」についても当てはまるものだと考えられる。

四 計算機シミュレーション

第三節で説明した数理モデルは、計算機上で実装し、その振る舞いを観察することができる。例えば、図5のような三つの要素からなる要素集合のダイナミクスに対して、そのダイナミクス（と等しい頂点集合ダイナミクス）を生み出すBN構造生成シミュレーションを実行すると、図6のようなBN構造が生成された。ここで、四つの異なるBN構造を示しているが、これらは全て同じ頂点集合ダイナミクスを生み出すBN構造である。すなわち、同じ要素集合ダイナミクスに対して、対応するBN構造は複数存在し得る。

この例は、三つの要素からなる単純な系についてのシミュレーションであったが、次に、要素数を少し増やした七つの要素からなる図7のような要素集合ダイナミクスについて同様のBN構造生成シミュレーションを行った。その結果、生成されるBN構造は、シミュレーションの度に異なるBN構造（ただし、生み出す頂点集合ダイナミクスは等しい）が生成され、同じBN構造が生成されることはない、つまり、この要素集合ダイナミクスに対応するBN構造が無数にあることが示唆される結果となった（生成されたBNの数列を図8に示す）。これは、同じ問題や現象に対して、その実感的なわかり方が多様であり、人によつて、あるいは時によつて千差万別であることを示す結果と言える。なお、シミュレーション結果として同じBN構造が現れない故に同じ頂点集合ダイナミクスを生み出すBN構造が無数にあると述べたが、それは「無数」と呼ぶ根拠としては弱いものである。同じ頂点集合ダイナミクスを生み出すBN構造が、例えば数百程度の数しかなければ、無数とは言えない（何度もシミュレーションを繰り返せば同じBN構造も生成され得る程度の数なので）。そこで、同じ頂点集合ダイナミクスを生み出すBN構造がいくつ程度あ

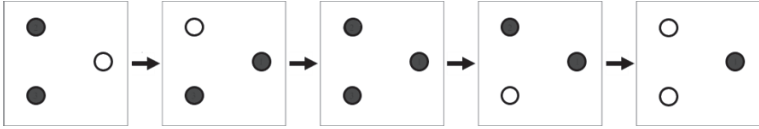


図5 要素集合ダイナミクス。

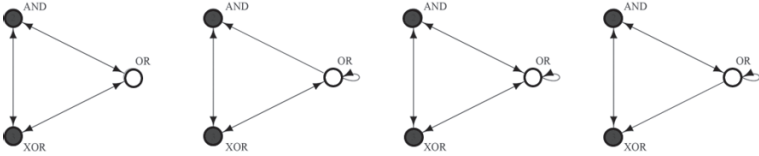


図6 生成されたBN構造。これら四つのBN構造は、すべて同じ頂点集合ダイナミクスを生み出す。

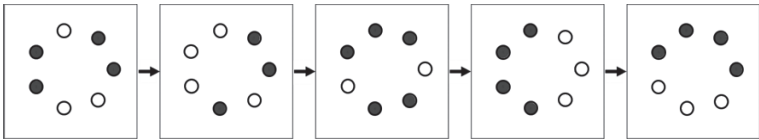


図7 要素集合ダイナミクス。

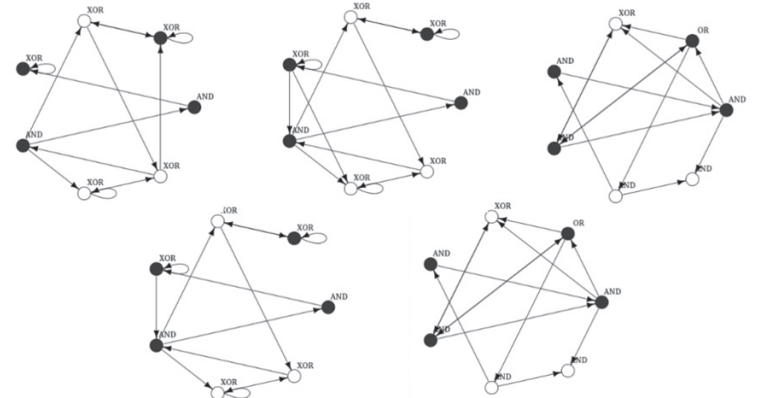


図8 生成されたBN構造の例。これらのBN構造は、すべて同じ頂点集合ダイナミクスを生み出す。同じ頂点集合ダイナミクスを生み出すBN構造はこれらの他にも無数に存在する。

るのかを推定することを行った（非常に多数であるので、厳密に数え上げるとは不可能だが、推定することは可能）。ここで用いた推定手法は、ヒストグラム再重法と呼ばれるものである。これは、MCMCサンプリングで生成されたサンプル（BN構造）たちから作られるヒストグラムに対して適切に重み付けすることで、対象系についての様々な量を推定する手法であり、計算統計物理の分野で、（任意の温度での）物理量の期待値を近似的に求めるのに用いられている。この手法を適用し、七つの要素からなる要素集合ダイナミクスに対して、それに対応するBN構造の個数を推定すると、その数は二百億個程度と計算された。これほどの数が可能性としてあるのであれば、何度シミュレーションを行っても、同じBN構造は現れないと考えられる。また、三つの要素の系では対応するBN構造は四個であった（この系については、個数が少ないので厳密に数え上げることができた）のに対し、要素数を七つに増やすだけでこれほど対応するBN構造の個数が増加することから、要素数の増加に従い爆発的にBN構造の数が増加することが示唆される。それ故、このモデルでは、同じ現象（要素集合ダイナミクス）に対する実感的な「わかる」が無数に存在すること、すなわち、人により、また時により得られる「わかる」が一回きりであるという性質が表現できると言える。

五 今後の展望

これまで述べたのは、一つの問題や現象に対する「わかる」についてのモデル化だった。しかし、実際には、一つの「わかる」は次の「わかる」へと応用され、そうして「わかる」の体系が作り上げられる。これを表現するためには、個々の「わかる」が結合され、「わかる」の体系を作り、その体系が次の「わかる」にフィードバックされる

構造をモデルに組み込むことが必要である。個々の「わかる」を「わかる」の体系に結びつける過程は、要素集合ダイナミクスに対してそれらを一つの全体と捉える過程（BN構造生成）と同様に考えることができる。すなわち、BN構造生成という一つの原理によって、個々の「わかる」と「わかる」の体系の形成の両方が記述できると考えられる。そして、既に生成された「わかる」の構造がフィードバックされながら体系が成長することで、「わかる」活動に関して「個性」が創発することなどが、モデルの振る舞いとして観察されることが期待される。

また、「わかる」は人から人へと伝えられるものである。筆者②による本稿の別論文で強調されているように、科学・技術の「質」の維持は、アーティストの感覚を持った技術者たちが欲求に「自分事」として対峙することで為されてきた。それは、機能や技術として書き下せない実感を持って開発を行うことである。すなわち、科学・技術の「質」の伝承は、実感的な「わかる」を持った人が、それを人に伝え、伝えられた人がまた実感的な「わかる」を得ることで行われてきたと言える。ここで注意したいことは、実感的な「わかる」は人によって、また時によって唯一のことであることと、実感的な「わかる」の感覚そのものを伝えることはできないということである。実感的な「わかる」の唯一性は、「自分事」としての「わかる」はコピーできないものであるという経験的な事実であり、BN構造生成モデルでは、同じ問題・現象（要素集合ダイナミクス）に対して、それに対応する「わかる」（BN構造）が無数に存在することに対応している。では、唯一的な「わかる」が伝えられるとはどういうことか。この問題は、実感的な「わかる」の感覚そのものを伝えることができるが、伝えることができないことにもつながるものである。実感的な「わかる」の感覚そのものを伝えることができないというのは、BN構造生成モデルでは、現象は要素集合ダイナミクスの形で現れるものであるため、BN構造そのものは認識の対象とはならないことに対応する。すなわち、「わかる」の感覚そのもの（BN構造）ではなく、要素集合ダイナミクスの形で「わかる」を表現し、その要素集合ダイナミクスに対して受け手がBN構造

を生成する形になる。あくまでも実感的な「わかる」を得るのは、わかる主体の「能動的」な行為（BN構造生成）によるのである。そして、わかる主体によって生成されたBN構造はその時々で唯一であるので、実感的な「わかる」の感覚としては、伝え手の持つていた元の実感とは異なるものになる。「わかる」を伝えることについては、まだ数理モデルにはまだ組み込まれていないが、以上のことに注意しながらそれを数理モデルに加えることで、実感——唯一であり、さらに直接には伝えられないもの——が伝えられることを、数理モデルという喩えを通して理解できるようにすることが期待される。

形式的な「わかる」と実感的な「わかる」の違いや、実感的な「わかる」の唯一性（コピー不可能性）、コピー不可能な「わかる」を伝承するとはどういうことか、それは如何にして（どのような意味で）可能かといったことは、技術や機能として書き下せるものだけに着目しては理解することのできないことであった。書き下しきることのできない実感に着目し、その実感の構造を数理モデルという比喩表現で表すことにより、それらを理解することにつながるものが期待される。本稿では、その数理モデルを構築する一つの試みとして、西田幾多郎の生命観を参考にして構築したBN構造生成モデルを提案した。ここで提案したモデルは、西田幾多郎の哲学についての十分な理解に基づいたものではないが、この試みが人文科学の知見と自然科学の知見とを相互に活用し合う方法の一つを切り拓く契機となれば幸いである。

注

- (1) 朝永振一郎『科学者の自由な楽園』(岩波文庫、二〇〇〇年)
- (2) 岡潔『二葉舟』(角川ソフィア文庫、二〇一六年)
- (3) 西田幾多郎『善の研究』(岩波文庫、一九五〇年)
- (4) 西田幾多郎『西田幾多郎全集』第八卷(岩波書店、一九六五年)
- (5) 西田幾多郎『西田幾多郎全集』第十二卷(岩波書店、一九六六年)