

複雑系科学

津田一郎
Ichiro Tsuda

北海道大学大学院 理学研究科
数学専攻 教授

The Studies on Complex Systems

1 科学における「切断」と「糊付け」

一般に、科学的な世界認識ではさまざまなレベルで「切断」と「糊付け」が行われる。特に、近代科学においては、自然を認識する主体とそれら認識対象の間に切断が設けられた。これはデカルトによる主体と客体の切断として有名である。これは非常に強力な世界認識の方法である。これにより、我々は自然を人間の行為とは無関係に記述できるようになったのである。量子力学の観測問題においては、フォン・ノイマンが量子的対象と観測装置の間の切断を考え、その境界を脳の感覚野からさらに奥へ奥へともっていった。ノイマンは「自分自身を観測するものは不安定である」という観点を見出すことで、抽象的自我の概念にたどり着いた。これは、脳と心の切断であるデカルトの心身二元論を導くかもしれない。こういった近代科学における「切断による自然認識」に対して、複雑系科学では、切断をしないで対象をどのように記述するかに関心がもたれている。さらに言えば、いったん切断されたものをどのように「糊付け」するかに関心が持たれている(図1)。この切断と糊付けの関係は「チューリング・テスト」に明瞭に現れていると考えられるので次にそれを解説しよう。

アラン・チューリングは、今日、チューリング・マシン、チューリング・パターン、チューリング・テストと呼ばれている三つの重要な概念を提唱した。チューリング・マシンは人間の思考のある特殊な形態を万能計算という形で外在化させたものである。チューリング・パターンは相互作用する興奮性と抑制性の物質が拡散に支配されるとき生成されるパターンであり、拡散による物質の一樣化という常識を最初に覆したものである。チューリング・テストは知能とは何かを操作的に問うために導入されたテストである。チューリング・テストとは次のようなものである(図2)。

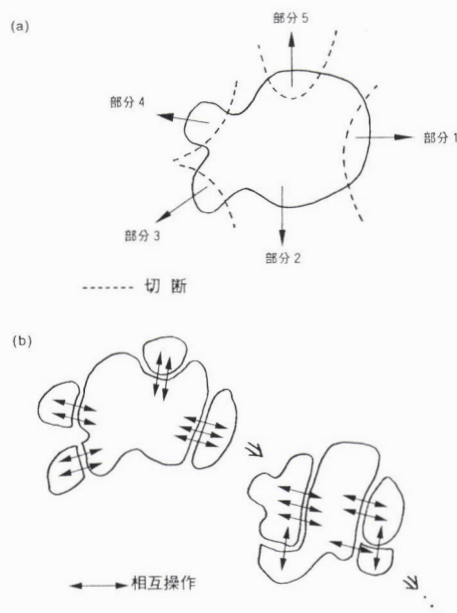


図1 切断による理解((a))と糊付けによる理解((b))

(a)では系全体が部分に分解され、各部分の理解を通じて系全体の理解に至る。(b)では各部分間の相互操作を考慮することで、系全体を理解しようとする。この時、何が部分になるかは相互操作に依存する。部分の“形”に依存して相互操作のあり方も変化する。このような状況では全体理解は必然的に経時変化を考慮に入れて解釈学的にならざるをえないだろう。

最初の段階として、男女の区別が知的に可能かという問題を設定する。男女を互いに通信できない別々の部屋に入れる。第三の人間が、彼らを見ることができない別の部屋にいて、彼らとテレタイプでのみ通信できるとする。女の目的は自分が女であることを、第三者に信じ込ませることであり、男の目的は、自分が女であるように第三者に信じ込ませることである。さらに第三者の目的はどちらが女で、どちらが男かを判定することである。次に、チューリングは人間と機械が知的に区別可能かという問題を設定した。すなわち、前の問題において、男を機械で置き換え、女を人間に置き換える。状況は次のようになる。機械と人間を

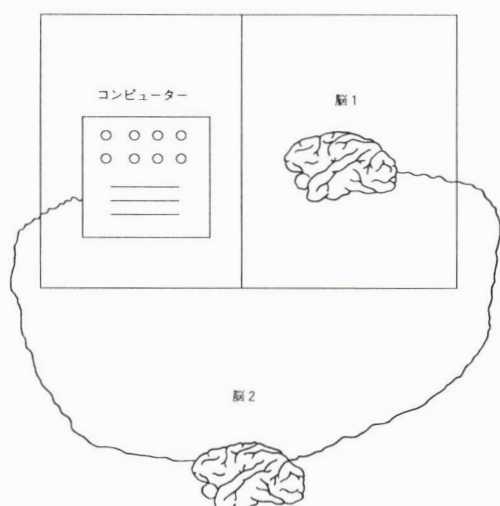


図2 チューリングテストを極端に抽象化した概念図

コンピューターと脳2、脳1と脳2は互いに電氣的に通信可能であるが、コンピューターと脳1は通信不可能であるとする。コンピューターは脳であるように振る舞い、脳1は脳であるように振る舞う。脳2はどちらが脳かを当てなければならぬ。コンピューターはどのような機能を持てば脳2をだませるか？ という問いに答えはない、というのが我々の考えである。コンピューターと脳2とのどんなコミュニケーションが脳1、脳2の組のそれと比較しうるのだろうか？

互いに通信できない別々の部屋に入れる。別の人間が、彼らを見ることができない別の部屋にいて、彼らとはテレタイプでのみ通信できるとする。機械は自分が第三者に人間だと思わせるようにプログラムされている。人間は第三者に自分が人間だと思わせることを目的とする。第三者はさまざまな質問をして、どちらが人間かを判断する。もしも区別ができなるとすると機械(プログラム)は知能を持っていると言ってよいというのである。このテストには、上で述べたような「切断」は存在していない。知能は、複数のエージェント間の「ダイナミックな相互作用」によって定義されているのである。

この問題で、かりに「切断」を導入して知能を定義しようとするとうなるであろうか。まず、人間が持っている知的性質を要素的に列挙し、表を作るであろう。次に、それらを機械(プログラム)が持っているかどうかを逐一チェックするだろう。さて、これは実現可能であろうか。人間の知的性質は脳と身体、およびこれらと環境との動的な相互作用によって決まっている。ここで、環境の中には他の人間が含まれている。従って、相互作用すべき環境自体が変化し、またそれによって相互作用の形態が変化する。従って、我々は知能を断片に分解し、その性質を列挙することはできない。具体的に説明しよう。今、A博士が「知的」なプログラムを作ったとしよう。B博士がやってきて、「君の作ったプログラムは知的ではない。なぜなら、「知的」

であるためには性質 α が必要であるからだ。」とA博士に進言する。A博士は、性質 α をプログラムに追加し、B博士を満足させることができた。ところが、そこにC博士がやってきて、「君の作ったプログラムは知的ではない。なぜなら、「知的」であるためには性質 β が必要であるからだ。」という。この手続きは知的であるための性質が尽きるまで繰り返されるであろう。ところが上に述べたように知的な性質は他の人間を含めた環境との相互作用によって規定される。他方、相互作用自体がいったん規定された性質によって変化する。このように、ブートストラップ的に性質と相互作用が互いを規定する。注意しなければならないのは、互いを規定する仕方は必ずしも自己無撞着的ではないかもしれないということである。つまり、無矛盾につじつまが合うというようには必ずしも規定されない可能性が残るということである。このように、もしも性質を列挙するという形で知能を定義しようとする、どんな「知的」な機械が作られても、「この機械は知的でない。なぜなら、我々の持っている知的性質のこれこれを持っていないからだ。」と主張することが可能である。しかし、上で述べたように、知的であることはさまざまな動的相互作用や不定な状況を前提にしているので、それを断片に分解し性質という形で列挙することはできないのである。問題の立てかたが間違っていたのである。しかし、これがまさに多くの現実の人工知能プログラムに適用されてきた方法である。代わりの質問は、まさにチューリング・テストによって示唆されている。すなわち、どのような相互作用が機械(プログラム)を知的に見せるのかである。

チューリング・テストには複雑系科学において問題にされている本質的な構造が潜んでいる。それは次のように表現できるだろう。観測者や記述者を対象から切断しないで、むしろそれらと対象を糊付けし、観測者、記述者と対象を一体と考えて初めて定義されうるもの、さらにはそれらのダイナミックな相互作用によってはじめて表現されるようなシステムの性質を複雑系科学は問題にしているのだと。

2 マシン、パターン、テスト

我々は今までさまざまな場所でさまざまな形態の複雑系研究会を行ってきた。今年の京都大学基礎物理学研究所での「複雑系6」では、チューリングの行った上記三つの大きな仕事に焦点を当てることで複雑系研究の現状を把握し、将来の方向性を探る試みを行った。生命を科学的に理解する仕方を考えよう。分子生物学の発展により、生命活動を作り出すさまざまな材料の基本運動が明らかにされた。生物学者はまさに、機械としてそれらの運動を理解しよう

とした。典型的な描像がチューリング・マシンによる記述である。もちろんこれはアナロジーにすぎないが、生物学者は、チューリング・マシンが与えられたルールにしたがって、情報を読み、書き込んだり、消去したりしてマシンヘッドがテープ上を移動するさまをタンパクやDNAが行っていることだというイメージを描いたのである。

それに対して、生命を力学系的に見る見方が存在する。典型的な描像はチューリング・パターンで与えられた。マクロパターンがミクロな運動と独立に決定される場合や、ミクロな運動から一方向的にマクロパターンが決定されるのではなく、ミクロとマクロがどちらが原因でどちらが結果であるということはないような循環型の因果関係、もしくは原因と結果を一对一で捉えられないような多対多の因果関係によって運動が決定される場合は、マシンのような見方を保持したままマクロパターンの生成という機能を発現させるのは困難なように思われる。すなわち、これらの状況はマシンが停止する以外にないような状況に対応している。

力学系的な見方の弱点を補う見方が現れた。通常の力学系では、力学変数の数は固定されているので、運動を記述する空間の次元は運動を通して一定である。これは、外部と相互作用する系の記述としては貧弱である。そこで、世界を閉じたものとして捉えるのではなく開いたものとして捉える見方を定式化するためにゲーム的な記述が導入された。これが、まさにテストの概念である。一方、運動を記述する空間の次元が運動と共に変化してもよいように力学系を拡張する試みも為された。複雑系とはまさに、開いた力学系として記述されるべき運動をもとに、情報的に開いた世界と相互作用するような系と考えられるのではなかろうか。そこにはマシン概念では捉え切れないものが含まれているように思われるのである(図3)。カオスが興味深いのも、チューリング・マシンの計算概念を超えた概念をそこから取り出せる可能性が見えているからに他ならない。

3 過去のいくつかの事例

既存の分野の規範だけでは捉えきれない問題群が多くの人々によって意識されているために複雑系科学が注目されているのであろう。最近では、それは、非平衡統計の現象論、散逸構造論、カオス、などの概念が人々の意識に上り、物理科学の既存の枠組みで捉えきれない現象に注意が向けられた結果、生命科学が持っていた物理科学のそれとは異なる複雑さが再認識されてきたためと思われる。もちろん、こういった言い方は物理サイドからの言い方にすぎず、生

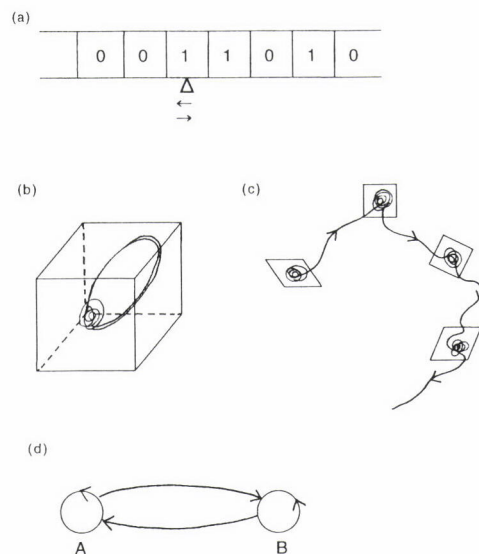


図3 生命に対するさまざまな記述

(a)マシンとしてみる見方。世界は閉じている。(b)力学系の時空パターンは何かを計算しているとみなせるかもしれない。パターンを記述する変数の数は固定しているため世界は閉じたものとして記述される。(c)力学系による記述でも変数の数や種類が時間とともに変化する場合は考えられている。これは力学変数の作る空間という意味では開いた系である。(d)観測者あるいは記述者A, Bが互いを観測し記述しあっている。これは、ゲームに現れる典型的な状況である。このようにして記述は情報的にAやB単独の中に閉じたものではなくなる。

物学者は、とっくの昔に複雑性の本質を直に感じ取っていたのかもしれない。しかし、一方で、分子生物学のように、認識のあり方や方法論が物理科学のそれであるものが近年、生物学の主流であったわけで、生物学者の多くが生命を複雑なものとして捉えて科学にする努力をしてきたとも思えない。生物学者の中では細胞レベル以上のレベルで生命現象を考えてきた人、「生物学」ではなく「生命誌」のような感じ方を大事にしてきた人が、生命現象の持つ複雑性から目をそらせないでそれ自体を捉えようとしてきたのではなかっただろうか。

こういった努力は過去にもあったが、比較的最近のものとしては、サイバネティックスは一例になるかもしれない。ノーバート・ウィーナーがサイバネティックスを創始したとき、複雑なシステムに潜む現象を解き明かす総合的な学問の創始、という意識が働いていたことは疑い得ない。ウィーナーはホワイトノイズ解析とフィードバック制御の概念を武器にして、「複雑システム」の解析を試みた。これらは、一方でミサイルの制御という軍事研究とつながっていたが、他方で、この研究は基礎科学のあり方に一定の問題意識を投げかけるとともに、オートメーション工場のアイデアを与えた。

サイバネティックスの研究においては、複雑な現象に潜む数理的な構造を新しい数学を創始することで抽出し、数

理の力で物理現象、化学現象、生物現象など、一見異なる分野に属すると思える現象群の中から共通普遍項を抜き出すことで複雑現象を理解する方法が取られたといつてよい。ウィーナーの場合、共通普遍項はフィードバックという概念であり、新しい数学が、ホワイトノイズ解析であった。共通普遍項から個別事象に関する解析が進められた。一例として、マッカロとピッツの神経系の制御機構の研究が挙げられる。彼らは一つの神経細胞の働きを単純化し形式ニューロンモデルで置き換え、形式ニューロンからなるネットワークシステムの持つ計算能力を調べ、万能チューリングマシンと等価であることを示した。**論理、デバイス、計算能力**の三項の組みで評価すると、この研究は**古典論理、形式ニューロン、万能チューリング・マシン**となる。最近の多くの研究を参考にすると、現在我々は**古典論理、連続値を許すニューラルネットもしくは一般化シフト写像、実数計算**というところまでマシン概念を拡張できるが、他方**連続値論理、カオス型動的関数写像もしくはそのネットワーク、アナログ計算**というアイデアもだされている。後者はもはや既存の計算機械という概念からは外れている。生命的な複雑さを捉える一つの“計算理論”がこのような枠組みから提案されている。

4 複雑系科学の特徴

少し見方を変えれば、一つの学問分野の知識だけでは、十分な理解にはいたらないような現象が注目を集め、複雑系と呼ばれているようにも見える。サイバネティックスの中で、上のマッカロとピッツの研究だけを取り出しても、現在の学問分野で言えば、数学、制御工学、電気工学、計算機科学、脳神経科学などが関係している。現在においても、一つの個別学問分野の知識だけでは、十分な理解を得ることが困難なシステムが多数存在している。「環境」問題はその一例かもしれない。物理学、化学、生物学、工学、社会学などの学問分野を総合しなければ、本質的な解決ができない問題を含んでいるからである。その構成要素に起こる問題群のなかには、個別学問分野で解決可能な問題が含まれているかもしれない。しかし、それらを他の事象とは独立な事象とみなし、個々別々に解決することで「環境」という系を解決したことになるかということ必ずしもそうではない。理由は、「環境」という系が次のような性質を持つからである。一般に、系の問題が構成要素のレベルで解決されるのは、系に現れる結果の原因が構成要素に還元できる場合である。構成要素が非線形系であったり、構成要素間の繋ぎめが無視できない場合には、システムに現れる結果の原因を単一の構成要素に求めることはできなくなる。

「環境」は、その構成要素自体が常に変化する非線形系であり、要素間の関係もダイナミックに変化しているので、原因を構成要素のレベルで一義的には決定できない。さらにもっと重要なことは、そもそも何が構成要素の候補になるかさえあらかじめ決定することが困難だということである。

系に現れた結果の原因をマイクロレベルの要素に還元できないとき、あるいは還元しても意味がないとき、物理学ではマイクロレベルの力学を平均操作などを通じて塗りつぶし、マクロなオーダーパラメーターを抜き出す、という方法が取られてきた。これにより、 10^{23} といった巨視的オーダーの系の巨視的な性質が理解できるようになった。しかし、このようにして抽出した巨視的な平均方程式がカオスなどのそれ自体複雑な動的振る舞いを示すという例が多数存在することが分かった。これは次のことを意味するだろう。現れた巨視的カオスが目的の巨視的性質の動的側面を捉えているならば、平均化の操作は正しいが、オーダーパラメーターによる記述はそれがカオスであるためにシステムに内在する複雑さを減少させることができない。従って、系全体の理解の方法としては振り出しに戻った感がある。系の複雑さと巨視的カオスが関係するのはこのような場面においてである。

熱対流はナヴィエ・ストークス方程式と熱拡散方程式を連立させて記述される。ザルツマンはこの系を二重フーリエ変換し、フーリエ成分のうち三個を除いて他はゼロに漸近するという結果を得た。そこでロレンツはこの三個のフーリエ成分だけで閉じた方程式を求め、カオスを発見した。この発見並びにロレンツの精緻な思考は自然科学的な観点をとったとき、その後の巨視的カオスの研究、ならびに乱流現象一般の理解に果たした役割は他を圧倒している。興味深いことに、実際の大気の運動でロレンツの発見したカオスはみつからない。複雑系研究に通じる大事な点は、ロレンツ方程式は流体乱流を必ずしも正確に記述する方程式ではなく、乱流理解のための現象学的な視点、あるいは解釈学的な基底を与えたという点である。この意味で、従来の現象論とは異なる乱流理解のためのよりメタな現象論的なアプローチがそこに展開されていると見なすことができるだろう。他方で、ロレンツの仕事が再認識されたことで、層流から初期乱流の発生をカオス力学系の分岐の問題として捉える研究が盛んになり、巨視的レベルの平均化方程式が実験室で観測される層流一流乱転移を見事に説明することができた。複雑系に潜む新しい問題の一端がここに現れているといえよう。

脳と心、生物の発生、分化、進化、蛋白質、流体乱流、経済システムなどは、上で述べたのと同様の構造を持つ複雑系であると考えられる。すなわち、論理的にはミクロと

マクロの間の循環型の因果関係の存在、物理的には巨視的状态と微視的状态の切断の不可能性を指摘することができる。さらにこのような系では、解釈学的なアプローチを一つの軸としたメタレベルの現象論による理解が不可欠になるだろう。

参考文献

- ・金子邦彦, 津田一郎: 複雑系のカオスのシナリオ, 朝倉書店, (1996)
英訳がSpringer-Verlag社から今世紀末までには出版の予定
- ・金子邦彦, 池上高志: 複雑系の進化的シナリオ, 朝倉書店, (1998)

(1999年9月6日受付)