

※ この資料は 2014 年 3 月にジャパンライム株式会社より発売された DVD『基礎情報学に基づく高校教科「情報」の指導法』(<http://www.japanlaim.co.jp/fs/jplm/c/gr1346>)の撮影時に使用した台本をもとに作成されています。

基礎情報学に基づく高校教科「情報」の指導法

第 1 巻 基礎情報学の概要(1)

4.生物と機械

解説:中島 聡(埼玉県立大宮武蔵野高等学校情報科教諭)

監修:西垣 通(東京大学名誉教授、東京経済大学教授)

1.オープニング

2.生物と機械の違いは？

生物と機械の違いは何でしょうか？自己増殖能力があることでしょうか。それとも恒常性(ホメオスタシス)でしょうか。それとも自己組織性でしょうか。他にも有機物と無機物の違いなども上げられると思います。しかし、機械の自己増殖能力の例としてはコンピュータウイルスが、ホメオスタシスの例としてはエアコンの温度設定に使われるサーモスタットが、自己組織性の例としては、粘性の高い流体層を下から加熱にしたときにできる半定常的な細胞状の対流構造であるベナール対流などがあります。また、有機物だけで機械を作ることも可能です。残念ながら、自己増殖能力、ホメオスタシス、自己組織性、構成素材などで生物と機械を区別することはできません。

ここで視点を少し変えてみましょう。個々の生物ではなく生物の歴史、つまり“進化”を考えてみます。現存する生物は、全て太古より原始的な生物から進化してきました。生物の遺伝は DNA を用いています。このことは元々一種類、少なくとも極めて少数の DNA を使った生物が、分化しながら進化してきたことを物語っています。系統樹はこの分化と進化の様子を表しています。生物は進化するものですが、機械は進化するのでしょうか。ロボットは学習を積みながらより効率的な作業を行えるようになります。しかしこれは進化とは言えません。進化とは形質が変化し、結果的に違う能力を身に付けることです。学習により掃除ロボットが洗濯機能を身に着けたなら進化と呼べるでしょう。しかし、現在の学習ロボットの技術をいくら延長してもそれは不可能です。なぜなら学習には目標があるからです。掃除ロボットの目標は床の上のごみを回収することで、掃除ロボットは学習により床の上のごみをより効率的に回収するようになるでしょう。でもそこまでです。目標が達成されれば、それ以上の変化は起きなくなります。一方、生物の進化には目標はありません。水中で効率良く移動することができるようになったら、次は陸上にあがり、さらには空を移動することまで始めました。明らかにこれは学習とは違います。生物と機械との違いを考えるのに“進化”は

重要なキーワードなのです。そして、進化するシステム、進化が可能なシステムを考えなくてはならないのです。

3. マトゥラーナの実験

チリの生物学者であるウンベルト・マトゥラーナは、1960年代の中頃に鳩の視神経についての研究をしていました。その中に、鳩に様々な色の色紙を見せ、そのときの生じる視神経の反応を測定する、というものがあります。当初この実験によって、眼球に到達する光の波長と視神経の反応との間に何かしらの相関関係が観測される、という見込みがありました。赤色なら赤色の視神経の反応パターン、青ならば青色の視神経の反応パターン、などという感じです。ところが、いくら実験を繰り返しても、光の波長と視神経の反応に相関関係を見つけることはできません。さらに実験を深めると、色に対する視神経の反応には光を反射している物体の形が関与していることが分かりました。チャプタ2の「情報の定義」でお見せした錯視の図は、特殊な渦巻き形状により色を正しく知覚できないこと、つまり色の知覚に形が関係していることを示しています。色に関する鳩の視神経の反応が形と関係しているならば、私たち人間の錯視と同じ現象だと考えることができます。マトゥラーナとその教え子であるフランシスコ・ヴァレラは、この実験結果から次のような奇抜な仮説を立てました。

仮説1

視神経にとって光は単なる外界からの刺激、攪乱に過ぎない。

光を波長ごとに分けて感じているのではなく、ただ刺激、攪乱としてしか感じていない、つまり視神経は光のスペクトル分析をおこなっていない、ということです。これは波長ごとに反応が違う感光材を利用しているカラーフィルムや、波長ごとに違う撮像素子を使うデジタルカメラとは全く違うものです。

仮説2

視神経は過去の反応パターンにもとづいて反応している。

過去の反応パターンとは、個々の生物個体の経験のようなものではなく、遺伝として引き継いできたものを指しています。視神経の反応は光の波長とは一切関係なく、遺伝的に決まっていることを繰り返しているだけ、ということです。二つの仮説を合わせて平たく言うと「視神経は光にビックリするけど、それが何だか分からないまま、とりあえず昔(先祖)と同じ反応をしている」という感じでしょうか。ずいぶんと乱暴な仮説のような気がします。

4. 閉鎖系システム

マトゥラーナとヴァレラは、自分たちの仮説をさらに発展させました。私たちが見ているものは、視神経のでたらめな反応から出来ていると言うのです。

私たちが物を見るとき順番を一般的に考えて並べると、ステップ1 物体の像が瞳孔を通り眼球の網膜に映ります。ステップ2 網膜に映った像に視神経が反応します。ステップ3 その反応が脳に伝わり意識の中に像を作り出す、ということになるでしょう。マトゥラーナの実験の目的も、まさにこの手順を調べるためのものでした。ところが実験結果は全く異なり、網膜に映った像と視神

経の反応には何ら相関関係が見つからなかったのです。つまり、一般的な考え方のステップ 2 で破綻しているのです。マトゥラーナとヴァレラの仮説では、網膜に映った像は攪乱としてしか作用しないので視神経は勝手に反応している、こととなります。この考え方は実験結果と一致します。これをステップ 2' としましょう。そしてこの勝手な視神経の反応により脳が画像を意識の中で作り出すこととなります(ステップ 3')。論理的には辻褄があっており、間違いとは言えません。実験結果からすると、むしろ正しいと言えるでしょう。となると意識の中の像と網膜に映った像は全く関係のないものになります。この仮説が正しいとすると、視神経と脳は外部から入力を受けることができません。つまり、視神経と脳は外部から遮断された閉鎖系システムということになります。外部からの入力がないのに物が見えている、また視神経の勝手な反応で物が見えている、とはにわかには信じられませんね。確かに私たちは、人間の環世界に生きていて客観世界を知りません。それでも目の前にあるものを見て掴むことができます。でたらめな反応でそんなことができるのは到底思えません。「そんなバカな」という気もしてきます。でも寝ているときに見ている夢のことを思い出してください。このときあなたのまぶたは閉じられており、網膜にはいかなる像も映っていません。外部からの入力がないのに、脳には像が構成されているのです。寝ている時に見る夢を、入力があるとする開放系で説明することはかなり難しいでしょう。寝ているときに夢を見ることは、視神経と脳が閉鎖系システムであることの示す一つの証拠なのです。

5. 脳の神経システム

睡眠中に見る夢が閉鎖系システムの証拠であるということは良しとしても、「閉鎖系システムで有効な環世界を構築できるのか」という素朴で大きな疑問が残ります。非常に気になる問題ですが解決は少し先にして、もう少し閉鎖系システムについて考えてみましょう。

人間の脳は約千数百万個ニューロンで構成されています。ニューロンは、他のニューロンからの電気的信号を受け取る樹状突起と呼ばれる部分と、他のニューロンに信号を送る軸索と呼ばれる部分を持っています。ニューロンに限ったことではありませんが、生物の細胞は電気的性質を持つイオンを出入りさせることにより、細胞の内外に電位差を作っています。この電位差が何らかの刺激により極めて短い時間で一時的に逆転することがあります。これを活動電位といい、スパイク、インパルス、発火などと呼んでいます。ニューロンはこの活動電位を利用して他のニューロンと信号をやり取りしています。外科的な手術を行えば別ですが、ニューロンの活動電位が脳の外部から入ることはありません。また特殊な装置を使わない限り、脳の外に取り出すこともできません。つまり脳神経のシステムは閉鎖系なのです。

脳では、あるニューロンが何らかの刺激・攪乱により発火すると、そのニューロンに継っているニューロンが発火します。そして、他のニューロンによって発火したニューロンとつながっている別のニューロンが発火します。ニューロンの発火現象は次々と繋がっているニューロンを発火させながら脳内を伝わって行きます。つまり、ニューロンの発火現象が別のニューロンの発火現象を作り出しているのです。私たちの意識はこのようなニューロンの発火現象の集まりで構成されているのです。

ここで、ニューロンの発火現象をシステムの構成素と考えると、脳システムでは構成素が構成素を産出している、ということになります。このような構成素を自己循環的/再帰的に産出している動的なプロセスのネットワークをオートポイエティック・システムと呼んでいます。オートポイエティック・システムは、システムの構成素がシステムの構成素を作り出していますので、自分で自分を作

り出しているシステムと言えます。

6. オートポイエーシス(自己創出)

オートポイエティック・システムは自分で自分を作り出すシステムですが、自己増殖能力とどこが違うのでしょうか。コンピュータウイルスも自分で自分を作っています。一見すると同じように思えます。実は、両者の違いは閉鎖性にあります。具体的には「自分を作り出すルールを誰が作っているのか」ということです。生物の設計図はDNAです。自分のDNAは自分の中で作られています。減数分裂による生殖細胞を使って場合、両親からDNAを半分ずつ引き継いでいますが、新しいDNAはその個体の内部で新しく構成されたその個体だけのものです。さらにDNAに書かれている内容が全て実行されるとは限りません。例えば、DNAの中には“がん”の設計図も入っています。しかし、その設計図が実行されてがんを発病するかどうか(がん細胞を作り出すかどうか)はその個体次第です。一卵性双生児はDNAはほぼ同じですが、全く同じ形態ではありません。「どんなDNA構成にするか」、また「その内容の何を使って生きるのか」はその個体次第なのです。これは閉鎖系であることからくる仕方のないことなのです。

一方、コンピュータウイルスの設計図はプログラムです。そしてプログラムはプログラマという人間によって書かれています。たとえ、そのプログラムが“プログラムの自動生成機能”で作成されていたとしても、プログラムの自動作成機能をプログラムした人間が存在しています。どちらにしても、外部から自分を作るルールが入り込んでいる点で開放系であることに変わりありません。

閉鎖系では誰も指示を出してくれませんので、自分を作り出すルールまで自分で作り出すしかないのです。このように閉鎖系の自己増殖能力のことをオートポイエーシスと呼んでいます。オートはギリシャ語で自己を、ポイエーシスは制作や生産を表す言葉で自己創出と訳されています。また、開放系で他者が自身の作成に介入している場合をアロポイエーシスと呼んでいます。アロとはギリシャ語で他者を意味する言葉です。そして、オートポイエーシスを原理として動作するシステムをオートポイエティック・システム、アロポイエーシスを原理として動作するシステムをアロポイエティック・システムと呼んでいます。

これまでの説明でお分かりの通り、アロポイエティック・システムでは外部から介入のために、必ず外部の誰かの意図、目的が反映されています。逆に言うとアロポイエティック・システムには必ず目的が存在することになります。車や電車は速く移動するためのもので、時計は時間を知るためのものです。コンピュータも論理計算をするためのもので、プログラムはコンピュータに目的の論理計算を行わせるためのものです。どんな機械にも目的がありますが、それはアロポイエティック・システムだからなのです。閉鎖系のオートポイエティック・システムでは、いかなる意図も目的も外部から入り込むことはできません。生物に客観的な目的が存在しないのは、オートポイエティック・システムだからなのです。このように「生物と機械の違い」は、「オートポイエティック・システムとアロポイエティック・システムの違いである」と結論できるのです。

7. 蜂の巣が六角形の理由

そろそろ、「閉鎖系システムが何故有効な環世界を構成できるのか」という問題に取り掛かりましょう。視神経は光に攪乱されて勝手な反応をしています。それでちゃんと物が見えるようになるのでしょうか。それが上手く行くのです。

蜂の巣のことを考えてみましょう。ご存知の通り、蜂の巣は六角形をしています。この構造は非

常に軽量であり、かつ高い強度を持つことで有名です。ところで蜂は、自分たちの巣が非常に頑丈であることを認識しているのでしょうか。材料工学や構造力学を知って巣を作っているのでしょうか。そんなことはありません。なぜならば、材料工学や構造力学は人間の環世界での話だからです。もし、蜂の巣作りに材料工学の話を持ち出したとすれば、それは人間から見た客観的な観察結果であり明らかに間違っています。

ではどうして六角形の巣を作っているのでしょうか。オートポイエティック・システムは勝手な行動・反応を行います。したがって、蜂は丸や四角形などの六角形以外の様々な形の巣を作ったはずですが、六角形以外の巣を作った蜂は、巣の強度が足りず天候などの影響から巣が潰れてしまい死滅してゆきます。たまたま六角形の巣を作った蜂のみが生き残ったのです。現存する蜂は自分たちが何故六角形の巣を作っているのかを知りません。ましてや六角形が丈夫であることなど知る余地もありません。「なんだか分からないけど上手くいっているだけ」、つまり過去の反応パターンにもとづいているだけなのです。これが蜂という閉鎖系から観察した結果です。現在私たちが観察する蜂の巣が全て六角形なのは、他の形の巣を作る蜂たちが淘汰圧力によって死滅してしまった結果なのです。このように淘汰圧力の結果によって、オートポイエティック・システムがあたかも外界を客観的に分析して合理的な行動や反応をしているように見える状態を**構造的カップリング**といいます。

8. オートポイエティックシステムと外界

蜂の巣の例でお分かりになった通り、勝手にランダムな行動や反応をしていた生物も十分な淘汰圧力がかけられることによって、合理的な行動や反応をしている生物だけになってしまいます。そして、その結果だけ、つまり生き残った生物だけを観察すると、あたかも客観的で合理的な判断のもとに行動しているように見えてしまうのです。これは非常に重要な考え方なので確認しておきます。生物の合理的な行動を観察して、「環境に適応している」と説明することがあります。しかし、生物は閉鎖系なので外界を知ることはできません。したがって、適応することは不可能なのです。外界からのあらゆる影響は、生物には攪乱として届きます。攪乱された生物は自身が攪乱された客観的な意味を知ることはできません。だから、勝手な行動や反応を起こします。生物の取った行動には合理性はありませんので、その結果は運に左右されます。たまたま上手くゆく場合もあるでしょうが、駄目な場合もあるでしょう。例えば、小さい生物が巣穴のそばにいたとします。このとき、目の前に大きな影が現れたとしましょう。小さい生物の反応としては、驚いて巣から飛び出すか、逆に巣の中に引きこもるか、またはそのままそこに居残るか、など色々な選択が可能です。しかし、この生物は客観的な判断ができないので、どの行動を選ぶかは単なる確率の問題となってしまいます。この場合、たまたま巣の中に引きこもったものだけが生き残ることになるでしょう。閉鎖系の生物にとっては、生き残るか死ぬかはまさにギャンブル、運の問題なのです。この様子を客観的に観察すると、生き残った方に合理性があり、死んだ方には合理性がなかったと判断され、あたかも生き残った方に適応があったように思われるのです。

とは言え、こんなギャンブルを繰り返しては生物などすぐに死に絶えてしまい、とても40億年もの間、生命を伝えてゆくことは不可能なように思えます。しかし、それがそうでもないのです。確かに初めのうちはギャンブルにほとんど負けて、その数を減らすことでしょう。しかし、生き残った生物は徐々にギャンブルをしなくなるのです。先の巣穴の前の生物で考えてみましょう。一回目のギャンブルに勝って生き残ることができたのは、巣穴に引きこもったものたちです。この状況で同じ攪乱に遭遇したとしたら、生き残った生物はどんな行動をとるでしょう。一回目のギャンブル

ルに負けた生物たちはもういません。二回目のギャンブルに進めたのは一回目のギャンブルの勝者たち、つまり巣穴に引きこもったものです。二回目のギャンブルに進んだのは、巣穴に引きこもる性質の強いものたちなのです。このことから二回目のギャンブルに参加したものの行動は、単なる均等な確率ではなくっており、巣穴に引きこもる行動を選択する割合が増えていると考えられます。確かにギャンブルに参加する総数は減りましたが、ギャンブルに参加している生物の勝つ確率は高くなっているのです。さらに同じような攪乱に遭遇すると、より巣穴に引き込む性質の強いものたちだけが生き残ります。このように淘汰圧力は客観的な理由など知らなくても、客観的で合理性のある行動や反応をする生物だけを選び出してゆくのです。そして、十分に淘汰圧力が加わった後には、確実に生き残る行動をする生物だけになってしまいます。攪乱に対する生き残った生物の行動や反応にはすでにギャンブル性はなくなり、むしろ再現性がみられるようになります。蜂の場合は六角形の巣という再現性が生じたのです。このように閉鎖系であるオートポイエティック・システムが外界や他のオートポイエティック・システムとの相互作用に再現性が生じている状態を構造的カップリングと呼んでいます。私たちの視覚も淘汰圧力により、より明るさが分かるもの、より細部が知覚できるもの、が選択され続けた結果なのです。そして生物の知覚器官の違いは、その生物と外界との構造的カップリングの違いと関係しています。蜂が紫外線を知覚できるのは、紫外線を知覚することが生命維持に関して必要だったことを示しています。同じように人間以外の哺乳類にとっては20kHz以上の超音波を知覚することは生命維持に必要なものでしょう。逆に、人間にとっては超音波を知覚することは生命維持には必要ではなかったため、そのための聴覚がないのです。蜂は生命維持のため紫外線と構造的カップリングを作り、紫外線を知覚できるようになりました。そして、その結果として蜂の環世界が構成されているのです。同じように、人間以外の哺乳類は生命維持の為に超音波と構造的カップリングを作り、超音波を聴くことのできる聴覚を持ったのです。外界からの攪乱のなかで、生命維持に必要なものに構造的カップリングが作り出され知覚されるようになることで、それぞれの環世界、それぞれの環境が構成されているのです。

9. 生物の進化

このように、生物が勝手な行動や反応をしたとしても完全に死滅することはありません。また、淘汰圧力によって生じた構造的カップリングは、あたかも外界に適応したように見えます。オートポイエーシス理論を使うことにより、生物の生き残りと環世界の構成を非常に明確に説明できます。さらにオートポイエーシス理論は生物の多様性も説明することができます。オートポイエーシスは、自分で自分を作り出すときに作り出すルールも自分で作り出すことができます。そして、自分を作り出すルールは勝手に変えることもできます。ルールの変え方は外界に関係なく勝手なものでランダムなものと言えます。このランダムに自分を作り変えることが多様性に繋がるのです。

例えば、ある生物、仮に0としましょう、が生存していたとします。この生物0は自分を作り出すとき、ほとんどの場合過去の反応パターン、つまり遺伝に従いますので、生物0は生物0を作り出します。ところがときにはオートポイエーシスにより自分の作り方を勝手に変えます。このときの変わり方は外界を無視していますので、勝手に変わった生物のほとんどは生き残ることができません。生物01と生物02は死滅します。ところがごく稀にたまたま外界とうまく折り合いをつけることができた生物03が登場することがあります。この新しい生物03は、たまたま自分の変化した結果が外界と構造的カップリングを作り出し、生き残ることができたのです。さらに生物03は同じ生物03を作りつつも、勝手に自分の作り方を変えていきます。このときの変化も外界を無視した

基礎情報学に基づく高校教科「情報」の指導法 1-4 生物と機械

勝手なものなので、変化した新しいほとんどの生物は死滅してしまいます。ここでもごく稀に親の代である生物 03 よりも効率の良い構造的カップリングを作ることができた生物 030 が生まれることがあります。この生物 030 は生物 03 の進化形で生物 03 の構造的カップリングを遺伝として継承しています。この遺伝の継承こそが、過去の反応パターンなのです。さらに極々稀に親の代と全く違った方法で外界と構造的カップリングを作り出すことができた生物 032 が生まれることもあるでしょう。これが種分化です。生物 03 と生物 032 の構造的カップリングは異なりますので、両者の環世界、つまり環境は異なるものになります。新しく分化して生まれる生物、つまり新しい構造的カップリングがどんなものになるのかは全く分かりません。なにしろ、外界を無視したランダムで勝手な変化ですから予測することは不可能です。仮に無理に予測を立てたとしても、それは人間の環世界をベースにしたものであり、客観世界をもとにしたものではありません。したがって、その予測は限定的なものになってしまうでしょう。何が出てくるか分かりませんが、何が出てきたとしても外界と構造的カップリングさえ作り出せれば生き残れるのです。そしてまた、出来た構造的カップリングの効率の良し悪しを問うことは、全く意味のないことです。なぜなら効率を判断しているのは人間であり、人間の環世界からの独断にすぎないからです。世界には、私たち人間から見てビックリするような生き方、生活史の生物が無数に存在しています。この多様性は、構造的カップリングの多様性の表れなのです。そして、この構造的カップリングの多様性は、自分自身を作るルールを勝手に変えることができるオートポイエティック・システムだからこそ生じたものなのです。

Copyright(C) 2014-2016 Tadashi Nakajima All Rights Reserved.