

第1章 群知能——集団から生まれる新しい知性

群知能とは何か？

群れをなす動物の行動は、かつてはほとんど魔法のように見られていた。昔の科学者のなかには、昆虫の群れ^{スウォーム}や魚の群れ^{スコール}や鳥の群れ^{フロック}①が見事に協調のとれた動きを生み出せるのは、五感以外の何らかの知覚能力〔ESP^②超能力〕によるしかない^②、あるいはもしかすると、集団的意識が発達していくなかで個々の動物が自らの個性性を犠牲にし、操り人形化^③してしまっただけに違いないと思う人々もいたほどだ。

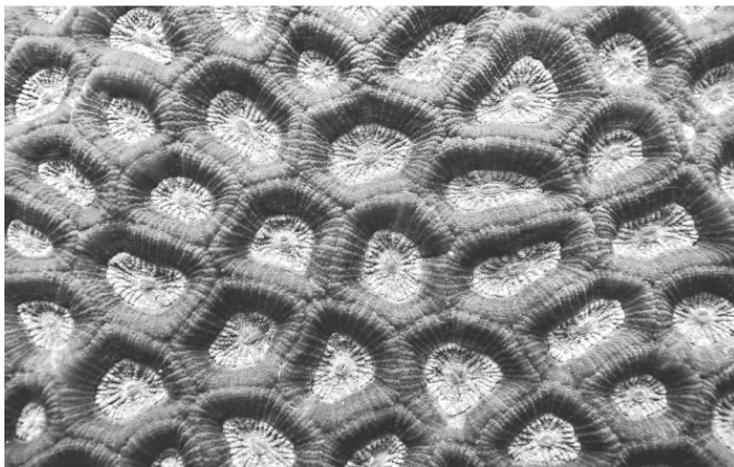
だが動物行動学者は、いまや複雑性の科学を知っており、群れの行動がこのようなどっぴな説明を必要としないことを明らかにしている。群れの行動は、集団の成員間で生じる相互作用の単純な規則から、自然に発生するものなのだ。^④たとえば、サツカーの試合で観客の集団がウェーブを生み出すときがその一例だ。もしそこに火星人がやって来て、ウェーブを見たとしたら、何か複雑なことをして

いるように見えるかもしれない。しかしその力強いパターンは、ある単純な規則に発している。つまり、隣の人⁽⁵⁾が立ち上がって両手を上げるのを見た⁽⁶⁾ら、直ちに自分もそうする（そしてまた手を下ろす）という規則である。

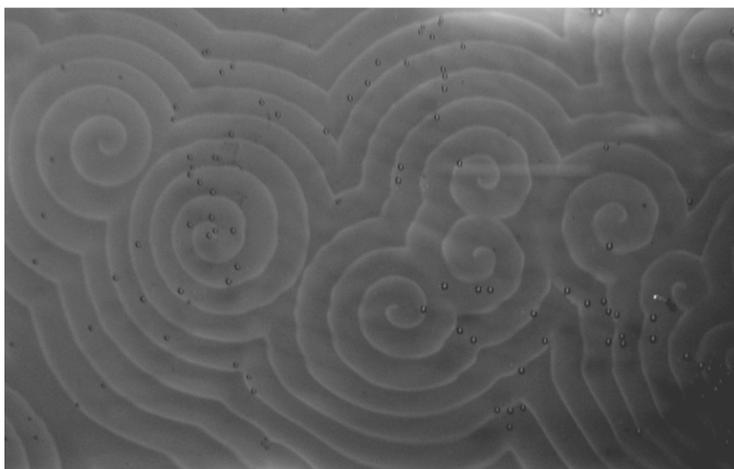
ウェーブでは、個体から個体への迅速な情報の伝達が行われているが、それこそが群れの行動の重要な特徴である。こうしたことは、人間の集団では噂^{ゴシップ}という形で生じることがある——近所の人たちがおしゃべりをし、さらに新しい情報があれば同じ経路で行き来し、最後にみんなが状況を知ることとで、その情報に基づいて行動ができるのだ。私が友人に招かれて妻のウエンディと田舎の催し物に出かけたとき、受付のところであつた見知らぬ女性が私たち夫婦を見て、「お友だちはあちらのビール試飲テントのところにいますよ」と教えてくれた。その女性は私たちの友人と会ったことはなかった。だが、その友人がどこにいますと、かくかくしかじかの風体の二人を待っているということは、人づてに聞いていたのだ。

群れの行動が群知能⁽⁵⁾をもっていると言われるのは、集団がそれを使って、個々の成員だけでは解決できないような問題を共同で解決できる場合だ。群知能を用いることで、ミツバチは新しい巣の場所を見つけ、アリは餌までの最短距離の経路を探し出す。またそれは、インターネットの仕組みから都市の機能まで、私たちの社会のいろいろな面で中心的な、しばしば予想外の役割を演じているのである⁽⁶⁾。

群知能は今、一部の人々によって予想もしなかった革新的な使われ方をされている。群知能で経営



バブアニューギニアのマダンで撮影したサンゴのパターン。空間を確保しようとするポリブ〔サンゴの基本単位〕が炭酸カルシウムを分泌して仕切りを作り、それによってパターンが生まれる。 Photo by Jan Messersmith



ペロソフ=ジャボチンスキー反応と呼ばれる「振動する」化学反応によってペトリ皿に生まれたパターン。黒い斑点は偶発的にできた気泡。

Courtesy of Anthony Hall

される会社が設立されたり、これを先進的な問題解決法として使うコンピュータ・プログラム⁽⁸⁾が開発されたり、スウォームフェスト⁽⁹⁾という、科学者が群れをなして群知能の新しい応用を論じる毎年の催しまである。

群知能を使う群れにはリーダーは要らないし、中心的な計画もない。だとすると、その一体性を維持し、見たところ合理的な判断を下せるようにしているものは何なのだろう。個々の相互作用が、どうやってそのような複合的な行動パターンに移し替えられるのだろう。私たち自身の個々の相互作用を最大限に利用しようとすれば、こうした問題に対する答えを理解しなければならぬ。その答えの出どころは三つ——現実の動物の世界、科学という想像力による世界、コンピュータによる仮想世界にある。以下、それぞれについて簡単に背景をまとめておこう。

動物からわかること

動物は群知能を使って、集団として餌を探したり、隠れ処を見つけたり、捕食者を避けたりする。動物の行動を科学的に研究する動物行動学は、動物が群知能を生み出すために用いる、いくつかの単純な規則を明らかにしてきたが、その過程では、研究者たちがいささか変わった危険に直面することもあった。

ドイツの動物行動学者マルティン・リンダウアーが陥った状況は、とくに風変わりだった⁽¹⁰⁾。一九五

○年代の半ば、リンダウアーは、新しい巢を作る場所をミツバチの群れがどうやって見つけるのかを理解すべく奮闘していた。彼はいつもミツバチの群れを追って、戦争の爪痕が残るミュンヘン郊外を走り回っていたが、その際は実験室用の白衣を着ているのが常だった。自分は科学者であって、怪しい者ではありませんと周知する目的もあつたのだろう。だが不運なことに、その白衣は近くの精神病院の入院患者が着せられていた服によく似ており、ある日ついに、病院の守衛がリンダウアーのことを脱走した患者だと誤解し、追いかけてきた。幸い、リンダウアーは守衛より走るのが速く無事逃げおおせたが、これはリンダウアーがいかにこの研究に向いていたかを示すだけでなく、ミツバチの群れがどれだけ速く飛べるかの証左でもあつた。

リンダウアー以外にも、科学の大義のためにあえて危ない橋を渡つた動物行動学者がいて、そのおかげでわかつたこともたくさんある。たとえば、ブラジルの二人の科学者は、シュノーケリングでピニアの群れを追いかけた⁽¹⁾。二人はピニアに襲われる危険を顧みなかつたわけで、それはおそらく正しい判断だつたのだろう。だが近くではワニも獲物を狙っていて、その襲撃を受ける危険も顧みなかつたのには確かな根拠はなかつたはずだ。それでも二人は科学者らしい控えめな表現で、ワニが尻尾でばしゃばしゃやるので水が濁つて夜間の観察が邪魔された、と不満を述べただけだった。

魚の群れを追うためにシュノーケリングをしたのは、このブラジル人科学者たちが初めてというわけではない。その榮譽は、ギリシャの哲学者アリストテレスに与えられているようだ。一部の歴史家によると、アリストテレスはフェイスマスクを被り、髭だらけの顔をエーゲ海につっこんで、「ヨ

ロツパスズキという魚と、それと仲の悪いボラの群れが「一か所に集まって来る」のを観察したとされている。⁽¹²⁾

とはいえアリストテレスの場合は、リスクといつてもせいぜい髭が濡れる程度のことだ。私がオーストラリアのグレート・バリア・リーフで珊瑚礁の生態系を調べたときに一緒だったある科学者は、海底にいた、一見無害に見えるホシザメを足に着けたひれでつついてからかったが、これはアリストテレスの場合よりずっと危険なことだった。その科学者は、このサメは顎の力が弱いし、歯も小さくて貧弱だと私たちには説明していた。しかしそれは結局どちらも間違っていた。サメは足ひれにがちりと噛みつき、獐猛な顔でむしゃぶりついたのである。海の深さは一八〇センチあまりで、当の科学者の身長は一七七センチだった。溺れないようにするには、かがみ込んで足ひれを脱ぎ、サメに与えるしかなかった。

こうした科学者は皆、自分が調べている動物についての独創的な発見をした。しかしながら、動物の集団が時として一個の超動物体であるかのように、移動し、行動し、意思決定することについて、実際的な理解をもたらした最初の科学者と言えば、マイアミ大学の生物学者ブライアン・パートリッジで、その研究対象に選ばれたのはセイスだった。

セイスはポロック（ポラック）とも呼ばれる魚で、タラ漁が衰退した後には西洋の食卓に進出してきた。「世界で残っている食べられる魚の最大の資源」とも言われるアラスカのポロックと、大西洋のポロックとの二種類があるが、どちらも体長が一メートル近くあり、重さは二〇キロにも達する大き



パラオのジャーマンチャネルで撮影したユメウメイロの群れ。魚群の自己組織化は、それぞれの魚がレイノルズの三法則に従うことで生み出される。

©Reinhard Dirscherl/FLPA

な魚である。

パートリッジが調べていたのは大西洋の方のポロックだったが、この魚も、他の多くの魚と同様、群れの行動を示す。やがてパートリッジは、群れが群れであり続け、ひとまとまりで動く仕組みを理解するには、個々の魚をすべて特定し、追跡しなければならぬと考えるようになった。

特定はすぐにできた——単純に魚の背中に印をつけたのだ（焼き印ではなく冷凍烙印を使った）。しかし、追跡をするのはそう簡単ではなさそうだった。そこでパートリッジは、スコットランドのアバディーン大学に直径約一〇メートルのドーナツ形の水槽を用意し、二〇尾ないし三〇尾のセイスの群れが泳ぎ回るようにした。魚が泳いでいる間、研究者は水槽の上の回転する作業台に横になり、群れの動きを追い、個々のセイスがどう行動したかについて継続的に観察記録を残す。群れは秒速三〇センチほどの速さで泳いでいた。したがって、観察者は

うつぶせになったまま、一分に一回転ほどの速さでぐるぐる回されることになる。たいしたことではないように思われるかもしれないが、私が遊園地のメリーゴーラウンドで再現してみたところ、かなりの目眩がする実験だということがわかった。

しかし、パトリリッジは目眩など気にはいられなかった。実験を終えて魚を海に放した後（あるいは食べた後。論文はどちらだったかには触れていない）、パトリリッジと助手たちは、一万二〇〇〇コマ以上あるフィルムから魚の相対的な位置を苦勞して測定しなくてはならなかったのである。

そしてついに、群れをひとまとまりで動かす鍵となる規則を見つけることができた。魚が従っていた規則は次の二つだけだった——正面に見える魚の後を追うこと（それがいれば*）、そして、横にいる魚と速さをそろえることである。

群れの複雑な動きの根底には、表れ方は様々であっても、常にこの二つの規則があることが今では知られている。これは、魚の群れが形や方向を変えるときに生じる見事なきらめきや、鳥の群れ、昆虫の群れ、人混みなど、あらゆる群れの動きにあてはまる。だが、こうした集団の動きに見られる複雑性は実際にはどうして生じるのだろうか？ そこにはどんな作用が関与しているのか？ この問いの答えを見つけるには、物理学の世界という、別のよりどころに目を向ける必要がある。

科学からわかること

複雑性の問題に科学を応用した事例と私が最初に出会ったのは、一九七〇年代の初めにブリッジ「トランプのゲーム」をしていたときのことだった。私と組んでいたのはロバート・メイで、自分の番でないときはテーブルの隅っこにノートを置いて、私には理解できない文字や記号を書き込んでいた。メイが歴史に残ることをしていたとは、当時は思いもよらなかった。

メイは、あるとても単純な方程式のふるまいについて頭を悩ませていた。ロジスティック差分方程式¹⁴と呼ばれるもので、数学者はこれを用いて、動物の個体数がどのように増えるかを記述することができた。この方程式は文句なく立派な代物であり、文句なく立派な答えを出した。たとえば、個体数は当初は指数関数的に増えるが¹⁵、餌や空間などの資源が限られてくると、環境を維持できる水準で頭打ちになることが、この式から予測できる。

しかしメイは、逆説^{パラドックス}もひとつ見つけていた。個体数の増加率によつては方程式はとんでもない答えを出し、そこから、なだらかな変化ではなく、急上昇と急降下が周期的に、あるいはカオス的に入れ替わることが予測されたのだ。つまり、集団は榮えているように見えていても、突如として破綻することがあるのだ。方程式がこうした結果を生み出したのは、正や負のフィードバックという要

* いなければ、当然第二の規則だけが適用される。

因が含まれているからである。こうした要因は今では、自然界での個体数の劇的なゆらぎや、株式市場のやはり劇的なゆらぎ、群知能にあるような安定したパターンなど、あらゆる種類の複雑性の創発にとって中心的な役割を果たしていることが知られている。

正のフィードバックは循環を伴う過程であり、コンサート会場で、アンプのボリュームを大きくしすぎたときに生じる、キーンという音の原因でもある。あの現象は次のような仕組みで起こる——まずはじめにスピーカーからの音がマイクで拾われ、それがアンプを通してさらに増幅されてスピーカーに戻り、それがまたマイクとアンプを通してスピーカーに戻る。この悪循環に陥ると、最後には装置の限度を超えて抗議の悲鳴を上げるといふわけだ。

イギリス政府の科学情報部の専門家 R・V・ジョーンズ⁽¹⁶⁾は、第二次世界大戦中、人里離れた飛行場でその見事な例を目撃した。滑走路の一方の端にはマイク、反対側にはスピーカーが置かれていて、たまたま誰かがマイクのそばで笑った。マイクとスピーカーはちょうど正のフィードバックが起きるぎりぎりの距離にあったので、笑い声は本人が歩いてどこかへ行ってしまった後も、ゆつくりと増幅され続けた。そのためジョーンズは、こいつは人間を必要としない、自力で笑える機械なんじゃないかと思つたといふ。⁽¹⁷⁾

二〇〇八年に起きた信用収縮^{クレジット・クラッシュ}（銀行が一気に貸出を制限すること）も正のフィードバックが作用した例だが、こちらはそれほど笑えない。このときの信用収縮では、金融制度への不信が増幅され、国際的な金融システムが崩壊の危機に瀕し、それによって多くの銀行が破綻した。取り付け騒ぎという形

で姿を現した正のフィードバックによって、個々の金融機関にストレスがかかったのである。その一例は二〇〇八年九月二五日に起きたワシントン・ミューチュアル銀行の破綻だ¹⁸。このときは、他の人々が預金を引き出していることに気づいた人たちが預金を引き出そうと殺到し、それがまた他の顧客を引き寄せるといった騒ぎが一〇日にわたり続いた。引き出された預金の総額は一六七億ドルに達した。

何かへの強い嗜好、あるいは流行も、最初はどうかということもなから始まることもある。そこに微かなランダムなゆらぎが生じ、正のフィードバックが作用するのだ。たとえば、あなたの友人の大半がフォードかトヨタの車を所有しているとして、あなたがそのどちらかのメーカーの車を買おうと思っているとしよう。周囲に聞いてまわり、たまたま最初に出会った三人がフォードを所有しており、それぞれその車に十分に満足していれば、あなたはフォードを買うだろう。

あなたがフォードを買えば、フォード派が一人増えたことになるわけで、これにより、次の人が聞いてまわったとき、トヨタ派よりもフォード派に出会う可能性が高まる。次の人もフォードを買えば、フォード所有者は二人増える。こうした過程が繰り返されると、この「フォード効果」¹⁹は増幅され、そのうち集団の大半がフォードに乗っているという結果になる（もちろん、最初に出会った何人かがトヨタだったら、「トヨタ効果」になっていた可能性もある）。

このように、すべての人がフォード（あるいはトヨタ）を所有しているというパターンが創発するのは、単純な局所的規則（最初に会った三人が所有していて満足している車を選ぶ）が適用され、そ

れが偶然のゆらぎ（最初の三人がたまたま同じメーカーの車を所有している）に対する正のフィードバック作用に後押しされた場合である。

際限のない結果を生み出すのは正のフィードバックだけではない。作家のジェイムズ・サーバーは、『ダム決壊の日』²⁰という自伝的な文章を書いているが、そこに描かれたような連鎖反応からも、そういう結果が生じることがある。きっかけは、一人の住民が逃げているのが目撃されたことだった。たったそれだけのことによって、心配するようなことはないと何度も念を押されたにもかかわらず、オハイオ州コロナバス東部の住民全員がおりもしない津波から逃げ出したのである。サーバー一家もその脱出組の中にいた。「最初の半マイルのうちに、町の住民のほとんど全員が追い越していった」とサーバーは言う。パニックに陥ったある人は、背後から「怒濤が押し寄せる」音を聞きさえしたそう
だ。だが、結局それはローラースケートの音だった。

パニックが起きたのは、最初に逃げた人を見て何人かの住民が逃げ始め、今度はその住民が、さらにまた何人かが逃げる元になり……、ということが繰り返されたからだ。この過程は住民全員が逃げ出すまで続いたのである。原子爆弾の内部でもこれと同じ過程が進行する。原子爆弾では、まずある原子核が崩壊して、近くの原子核を何個か分裂させるだけのエネルギーをもった高エネルギーの中性子を放出する。それが他の原子核を分裂させ、分裂した原子核がそれぞれまたさらに何個かを分裂させるだけの中性子を生む。こうして次々とドミノが倒れて、中性子の数と放出されたエネルギーの量が指数関数的に増大すると、大爆発となるのである。

原子力発電の場合、この連鎖反応²¹⁾は、分裂する物質にカドミウム²²⁾の棒を挿入することで制御される。制御棒は連鎖反応を止めるのに十分な数の中性子を吸収するので、それによってエネルギーの放出量をうまく調節することができるのである。複雑性の科学による大発見の一つは、負のフィードバックを導入して正のフィードバックや連鎖反応による不安定化の作用に対抗させれば、多くの社会的な状況で安定化と同様の結果が生じることだ。^{*} その結果、独自の安定性を内在した複雑な動的パターンが生まれるが、そのパターンには進化や成長へとつながる可能性が潜んでいるのである。

負のフィードバックは、現状を維持するように作用して、バランスをとる働きをする。単純な例としては、エンジンに対する調速機^{ガバナ}が挙げられる。調速機は、エンジンの出力が上がると燃料を供給する速度を徐々に下げ、エンジンが制御不能になることを防いでいる。

負のフィードバックは、誤りを修正するために使われることが多い。²³⁾ 誤りが忍び込むようになると、現状からの変化がフィードバック・システムを起動し、その誤りを修正させようとする。具体的には、たとえば車を運転していて少し右に逸れてくると、脳は自動的に負のフィードバックを起動してハンドルを左にきり、車を元のコースに戻す。これが正のフィードバックであれば、小さな作用を次々と増幅するので、ハンドルはさらに右に切られ、コースからさらに逸れることになる。

* 混乱を避けるために言くと、物理学者の使う正や負のフィードバックという言葉は、心理学者の使っているものとは違う。心理学者にとって、負のフィードバックとは破壊的で不安定化するものであり、正のフィードバックは望ましいものである。物理学者にとっては、含みはふつう逆になる。

経済学には、市場は自己調整をされていて、乱れがあっても必ず均衡を回復するという考え方がある。これはアダム・スミスの言う「見えざる手」⁽²³⁾のことで、市場経済が負のフィードバックを組み込んでいるという考えに基づいている。だが後で見ると、現代の複雑性の理論は、それが現実とはかけ離れていることを認めている。私たちの複雑な経済システムは、正負のフィードバックからなる入り組んだバランスに支配されているが、そこにとまどき連鎖反応が投げ込まれるというのである。

正負のフィードバックのバランスは、結局のところ、個体間の相互作用の規則によって決定される（この規則は、専門的には「行動アルゴリズム」と呼ばれる）。群知能のような集団特有の能力の創発を理解する際には、考えるべき中心的な問題が二つある。それは人間をはじめとする動物の個体が従っている相互作用のパターンを特定することと、個体間を情報がどう流れているかをつきとめることだ。本書では、主に前者について論じ、そのパターンを私たちがどう利用できるかを明らかにしようとしている。

集団が集合的な適応能力（集団が全体として状況の変化に対応する能力）を得るには、ふつう、非線形的な規則だけでは十分でない。複雑性理論家のジョン・ミラーとスコット・ペイジは、その適応能力について、仏教の八正道^{はつしょうどう}をふまえて、おおよそそれに基づいた次の八つの基準を挙げている。⁽²⁴⁾

正見 集団内の個体（複雑性の科学者はそれを行為者と呼ぶ）^{エージェント}は、集団内の他の個体や広く世界から情報を受け取り、それを理解しなければならない。

正思惟 エージェントは、達成したいと思う何らかの目標を持たなければならない。たとえば、魚は食べられるのを避けたいというものでもいいし、人は政治的変化を実現するために集団で行動したいと思うというものでもいい。

正語 エージェントは情報を受け取るだけでなく、送らなければならない。これは必ずしも言葉による必要はない。たとえば、キイロタマホコリカビのような粘菌がグレッグスの状態にあるときは、化学物質によるメッセージを送って通信するし、私たちの脳のニューロンは電気的な刺激をやりとりする。

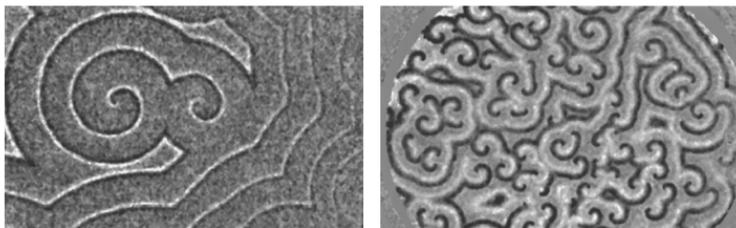
正業 エージェントは何らかの形で付近のエージェントの行動に影響を及ぼすことができなければならない。

正命 エージェントは集団内での自らの行動に対して、行った仕事に対する給与であるとか、仕事をしなかつたら辞めさせられるといった罰の恐れなどの、何らかの賞罰を受け取らなければならない。

正精進 エージェントは、他のエージェントの行動を予測したり、それに対応したりするときに使える戦略を必要とする。

正念 合理性にはいろいろな種類や水準がある。複雑な社会にいる私たちのエージェントとしての課題は、各人にとって正しい水準の合理性を選んで用いることである。

正定 複雑性がどう生じるかを理解するには、時として、昔ながらの科学的手法に戻らなければならない



土壌中にすむ「粘菌」アメーバのキイロタマホコリカビが何万と集まってできたパターン（ペトリ皿の寒天培地で培養した）。このカビは、周囲の仲間が出す「主食となる細菌がない」という化学信号に反応する。そして最終的には各個体が結集し、専門用語でグレックスと呼ばれるナメクジ状の集合体になる。グレックスは、新しい餌場を見つけるべく、個々のアメーバより速く土中を進むことができる。

Courtesy of Prof. Cornelis Weijer, University of Dundee, UK

らないことがある。つまり、一つか二つの重要な過程に狙いを定め、一時的に他は無視してみるのである。

本書ではこれ以降、これらの基準を折に触れて取り上げていく。だが、時にはまったく異なる文脈で登場することもあるだろう——たとえば「正念」は、個人が適切な意思決定をしなければならぬときにどの程度の細目が必要かとか、集団として合意に達するためにはどんな考え方を採用する必要があるかといったことまで、適用することができる。

仮想世界からわかること

先に挙げた基準が、複雑な状況下での私たちの行動の選択にどう影響するかを理解するには、多くの場合、コンピュータによるモデルに頼る必要がある。そうしたシミュレーションを用いないで複雑な状況の結果を予想す

るのは、実際の、倫理的理由から考えて事実上不可能であるからだ。

実際上の理由の一つとして、複雑適応系に内在する個々の違いや変わりやすさをすべて取り上げるのは、人間の頭ではとうてい無理だという点が挙げられる。こういう事実があったからこそ、科学のほとんどすべての進歩は、問題のエッセンスを抽出できるような徹底した単純化をすることで達成されてきたのである。太陽、地球、月のそれぞれに対する運動という話でさえ、そのうち二つの軌道を知ろうと思えば、私たちは残りの一つの影響については無視をして計算するしかない。三つ合わせた厳密な計算（「三体問題」と呼ばれる）は、私たちが使う解析学の力の及ばないところであり、近似値を求めるだけでもコンピュータによるシミュレーションに依存せざるをえないのである。

社会での相互作用はこれよりもっと複雑で、強力なコンピュータが登場してはじめて、単純なものから複雑なものがどう生じるかを見せるモデルができるようになった。今ではこうしたモデルは、群集行動やネットワークなど、私たちの複雑な社会に見られるいろいろな側面を理解するために用いられている（とりわけ群集行動の研究では、実際に実験すると被験者を危険な状況に置くことになるなど倫理的な懸念があるため、実行できない場合が多い）。

これらのモデルは「トウーム・レイダー」などのゲームのようなもので、仮想の人物が特定の行動規則を与えられている⁽²⁵⁾。ただしゲームと違って、モデルには、仮想の人物の動きを外部からコントロールするプレーヤーはいない。仮想の人物たちが相互作用の規則だけを与えられて仮想世界に放たれ、プログラムを実施する側は、そこで何が起きるかを見つめるだけなのである。