

多様性を生み出すカオス

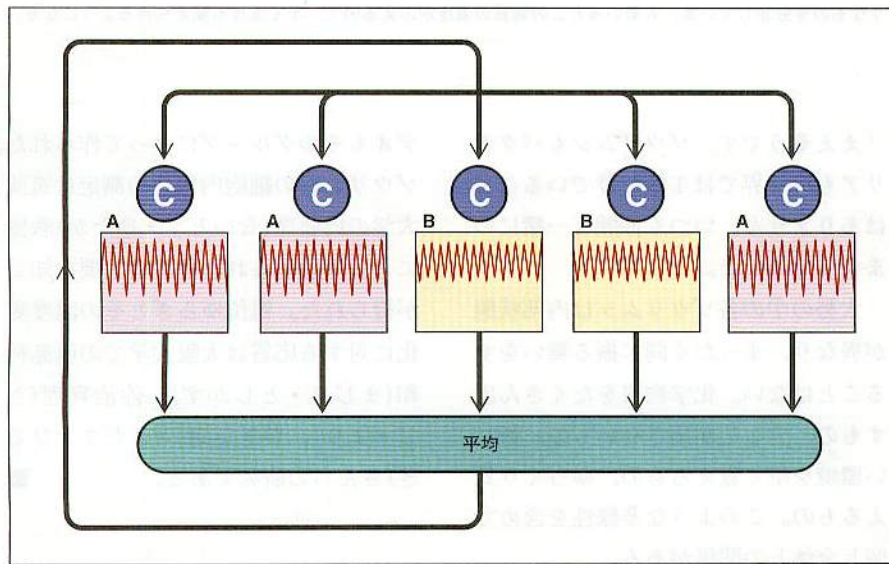
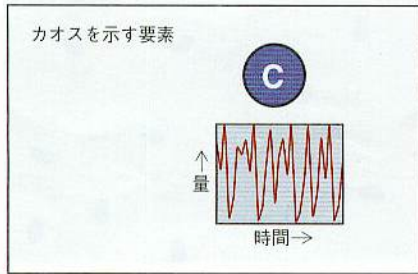
細胞分化のように同じ性質のものから違う性質のものが分かれたり要素と要素の“仲のよさ”が変化したり多様性が維持されたりする現象がカオスを示す要素のネットワークモデルでつくられた

金子邦彦

複雑な系の研究には新しい視点が必要である。一見複雑に見えることを、何らかの理想化を行って単純な原理に還元しようとするのであれば、それは今までの物理学がたどってきた立場と本

質的にあまり変わりはない。この立場でうまくいけばわざわざ複雑系の研究などという新しい問題を提起する必要はない。複雑な系を理解するには、単純なものに還元できないような捉え方をつくっていかなければならない。

多くの要素が互いに関係している系のダイナミクスを理解するには、「多くの要素が強く関係しつつ動的に変化するのをいかに捉えていくか」という視点がぜひとも必要である。本稿では各要素がカオスの振る舞いをする系を扱

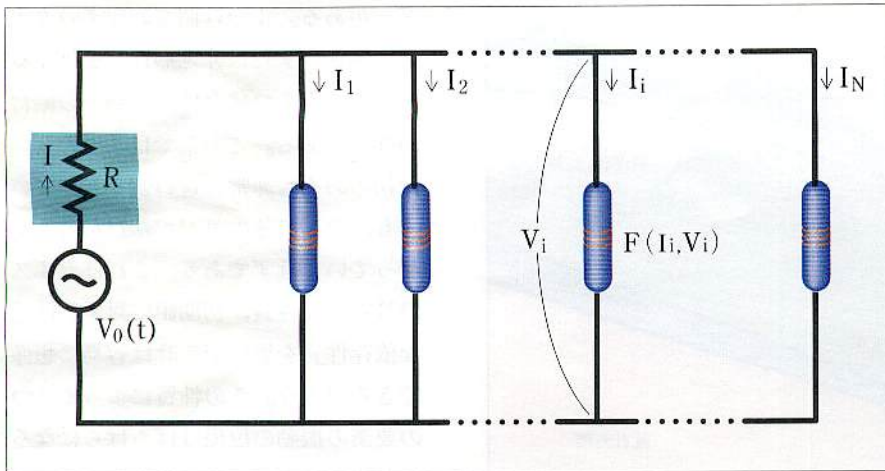


カオス結合系 要素の変数の値がカオス振動しているとする(上図)。変数は電流、神経での局所的な活動電位、エネルギー、個体数、食物など何でもよい。この要素をたくさん用意し、それらを全部と相互作用するように結合する。例えば、すべての要素は「平均」を通して結ぶようにする(下図)。「平均」は保存則など系に何らかの制限を与えるもので、特殊なものではなく、自然界に広く見られる。コンピュータ上でこうした結合を施した結果、興味深い振動パターンが現れた。すべての要素で振動が揃ったり、「仲のよい」要素同士でグループができてたり、すべての要素で振動がバラバラになったりしたのである(36ページの図参照)。図では2つのグループに分かれ、それぞれの中で振動が揃っている状態を描いてある。

うが、初期条件の小さな差が大きく増幅されてしまうカオスの性質から、そうした系では1つの要素が小さな変動を受けるとその差は拡大して他の要素に伝わっていくだろう。すると「個々の要素を切り離して、少数の重要なダイナミクスとその周りのゆらぎに還元する」という物理の伝統的なやり方が必ずしもうまくいかなくなってしまう。このため、多くの要素がカオスのダイナミクスを含みながら互いに強く関係し、その関係自体が動的に変化していく現象を捉えることが必要になってくるのである。物理や化学が対象としてきた分野でもこういった見方の必要性が認識されてきているが、生物科学、さらには社会科学ではこういった見方がますます重要になってくる。

もう1つの視点は構成論的なアプローチとでもいうべきものである。今までの物理学のモデルというのは、どこかに信頼できる方程式があり、それから重要な部分を取り出した近似方程式を導く、というものである。こういった自然の模写型とでもいうべきアプローチは簡単な系には有効だった。しかし、複雑な系に対しては基本プロセスから組み立てて構成するというアプローチがしばしば有効である。例えば、カオスを示す要素を集めて空間的にも時間的にも乱れたどんな現象が現れるかという研究はこういった立場であるが、特に進化のように今ある系がどうして出てきたか自身を問題にしなければならぬ場合には、仮想世界でのあり得る歴史パスを探ることができるのでこういったアプローチは重要と思われるし、実際、そういったアプローチは計算機で進化を探る試みの中に顕著に見られる。

本稿の内容は以下の通りである。まず、カオス振動を示す要素がたくさん相互作用している系を計算機の中に組み立てるとしよう。すると、初めのうち同じ振動をしていた各要素はやがて

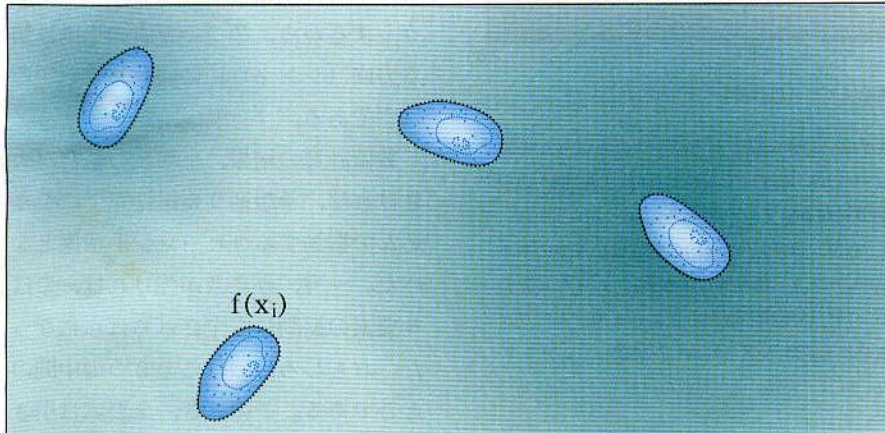


- R : 電源の抵抗
- $F(I_i, V_i)$: 非線形要素 i を特徴づける関数
- I : 抵抗 R を流れる電流
- I_i : 非線形要素 i を流れる電流
- $V_0(t)$: 電源の電圧
- V_i : 非線形要素 i での電圧

$$\dot{I}_i = F(I_i, V_i)$$

$$V_i = V_0(t) - R_i I_i$$

$$= V_0(t) - R \sum_{k=1}^N I_k$$



- X : 栄養スープの濃度
- $F(x_i, X)$: 細胞 i の状態の変化を決める関数
- x_i : 細胞 i の内部状態
- $f(x_i)$: 摂取の割合を決める関数

$$\dot{x}_i = F(x_i, X)$$

$$\dot{X} = - \sum_{k=1}^N f(x_k)$$

身の周りのカオス結合系 カオス結合系は現実にたくさんある。例えば、並列回路(上図)や適当な反応代謝系をもつ細胞集団(下図)がそうである。ここでは個々の非線形要素や各細胞が「要素」にあたり、緑色に塗った

領域が「平均」にあたる。式より、それぞれの要素の変化は非線形で、すべての要素から影響を受けているのがわかる(すべての値の和をとることは平均値を求めることと等価であり、すべての要素との結合を意味する)。

違った振動をし始め、そのうちいくつかの集団(クラスターと呼ぶ)に分かれてしまうことがわかった。それぞれのクラスターはお互い同士では振動が異なるが、内部では振動が揃っている。つまり、同じものが違うものに分化していったのである(これを基本的な仕掛けとした細胞分化のモデルについては最後に触れる)。しかも、この要素同士の“仲のよさ”(振動の引き込み度合い)は時間的にどんどん移り変わっていった。

以上のような現象に立脚して、関係が変化していくダイナミクスという捉え方について述べる。また、このカオスの結合系に基づいて多様性や複雑さの起源を考察し、さらに、多様性や複

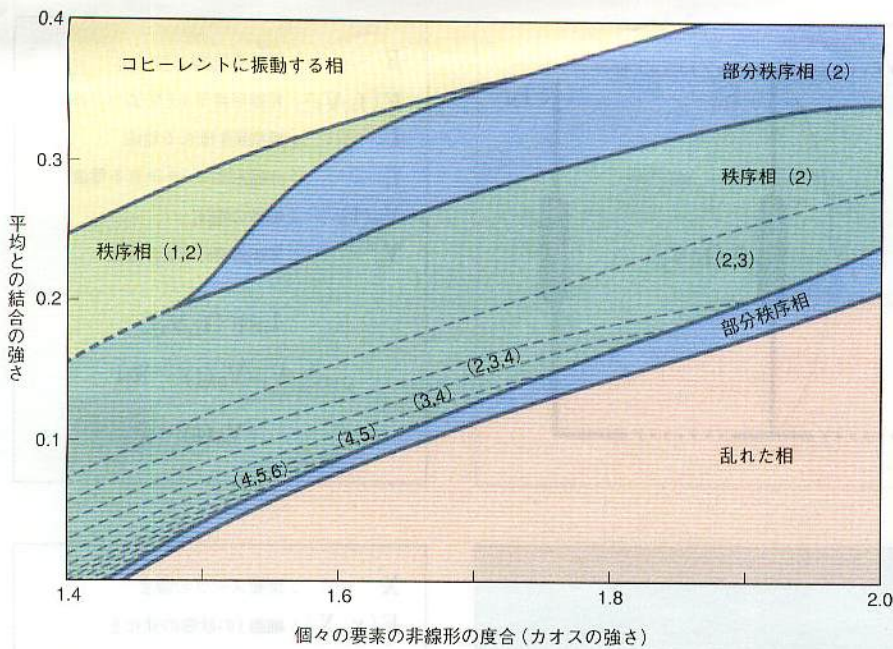
雑さがどのようにして維持されるのかを扱ったホメオカオス仮説を紹介する。こういった考え方によって生物ネットワークの進化を捉えていこうというのがここで述べていきたい主張である。

大域結合カオス系

関係が変化していく多元的なダイナミクスの例として、カオスを示す要素がたくさん結合した系を考えよう。結合にはいろいろなタイプが考えられる。隣同志と相互作用する場合、全部と相互作用する場合などである。ここでは、まったく同じカオスを示す要素があり、それぞれの要素の量の平均値を通して全部が影響を受ける系を対象とする(前ページの図)。

このように非線形要素が他の要素に対して大域的に相互作用している系はしばしば見られる。例えば、多くの非線形要素が保存則などによる制限を受けて発展する場合には、「平均場」を通じた大域結合が現れる。非線形要素が電流を通して並列に結合している系がそうである(上の図)。各素子の電流 I_i の変化はそれにかかる電圧によって変わるわけだが、その電圧は全体の電圧 V_0 から $R \sum_{k=1}^N I_k$ を引いたもので与えられる(R は電源部分での抵抗)。すなわち、 I_i の変動はすべての電流の和に支配されることになり、完全に大域的な相互作用が現れてくる。

神経のネットワークにおいても、個々のニューロン(神経細胞)ないし



相図 カオス結合系の各要素は、それ自身の非線形性が強いときにはどれも勝手にばらばらに振動する(ピンク色)。逆に、平均との結合が強いときにはみんないっせいに揃って振動する(黄色)。個々の要素の非線形性と平均との結合が競合しているとき、系は振動の異なるいくつかの要素グループに分かれ、それぞれのグループの中で振動が揃う現象が見れる(黄緑色、緑色、青色)。括弧内の数字はいくつのグループに分かれるかを示している(黄緑色の領域で1の場合はコヒーレント相と同じになる)。いったん完全に揃って振動するグループに分かれると、それは維持される。部分秩序相では大小さまざまなグループができるほか、ほぼグループ化した状態とばらばら状態を行き来する現象も見られる(下の図)

いくつかの集団にさまざまな非線形振動が見いだされ、それらが大域的相互作用をしていることがよく知られている。また、有限の資源を多くの要素が取り合う系ではこういったダイナミクスはよく現れる。多モード励起の光学系が物理の例ではあるし、生態学や進化系、細胞の集団などでも食物や化学物質を通して大域的結合を行っている例が見られる。一方、経済の例をとると、多くのエージェントが平均的な市

場(例えば株式市場)を通して相互作用しているような問題がそうである。

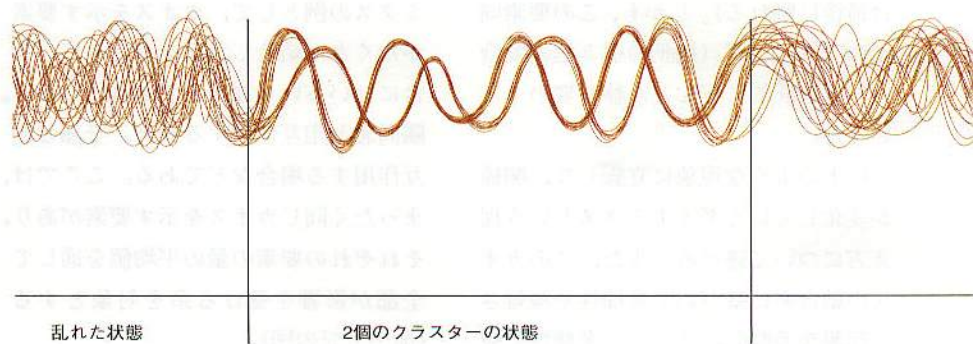
筆者はカオスを示す要素を大域的に結合した簡単なモデルを調べた。これは抽象的なモデルであるが、各要素の変数を電流、神経での局所的な活動度(電位)、エネルギー、個体の数、食物、化学物質、各エージェントの値段、などと読み替えればさまざまな現象に当てはめることができる。

この系には2つの基本的なパラメー

ターがある。1つは個々の要素のカオスの強さ(または非線形性)を与えるもの、もう1つは全体の平均との結合の強さである。この系では2つの要素は初めのうち非常に近い値をとっていても、やがてその差がだんだん大きくなっていくはずである。これはカオスの基本的な性質、「初期値に対する敏感な依存性」を思い起こせば容易に想像できるだろう。この性質によって2つの要素の振動の位相はばらばらになるうとするはずである。しかしその一方で、平均との結合は要素を平均化しようとするから、2つの要素の振動は揃う方向(シンクロ)に向かおうとするはずである。

数値計算の結果、平均との結合が大きければ、予想通り要素は完全に引き込んで振動するコヒーレント状態となった。一方、カオスが強ければ、やはり要素の振動は完全にばらばらになった。おもしろいのはこの2つの中間のときである。このとき、全要素は引き込んで振動するいくつかの集団(クラスター)に分かれ、それぞれの集団では揃って振動するようになった。同じクラスターに属する要素は揃って振動しているが、その振動の位相や振幅は(場合によっては周波数も)、クラスターごとに異なっている。まったく同じ要素の集団であったのに違った振動を行う集団に分化してしまったことに注意しよう。これによってカオスの結合が多様性を生むもとをなし得るのである。

カオスの遍歴 部分秩序相では、各要素の変数の値はばらばらに振動する状態と、少数のグループ(クラスター)に分かれてそれぞれの中でほぼまとまって振動する状態を行き来する。2つのグループができたときに同じグループに属していた2つの要素は、次に例えば3つのグループができたときに同じグループに属するとは限らない。これは要素間の“仲のよさ”が時間的に変化していくことを意味する。このような現象をカオスの遍歴と呼んでいる。



数値実験に用いたカオス結合系のモデルでは、結局、カオスの強さと、平均との結合度合いによって以下のような相の間の転移現象が見られた。①ほとんどすべての初期状態が完全に引き込んで振動する状態におちるコヒーレント相②要素の数とは無関係に少数個のクラスターが形成される秩序相③要素の数が増えればそれだけたくさんクラスターができる部分秩序相④各要素が完全にばらばらに振動する乱れた相——である（前ページの図）。

部分秩序相ではクラスターの個数が多くて、さらに要素のクラスターへの分かれ方が一様ではなく、さまざまな大きさのクラスターができてくる。例えば、100個の要素が50個、20個、15個、8個、1個、……、1個のように分かれる。こういった分かれ方は初期条件によってさまざまである。この相ではさらに、興味深いダイナミクスがしばしば見られる。例えば、全要素がほぼ2つのクラスターに分かれてそれぞれでほぼ引き込んで振動する状態を長く続けた後、ばらばらになり、それをしばらく続けた後で、またほとんど2個（ないし数個）のクラスターに秩序化し、またばらばらに……といったことを繰り返す。つまり、いくつかの秩序的な状態の間が乱れた状態を経由してスイッチしていくのである（36～37ページの図）。

こういった現象はカオスの遍歴とよばれ、上のようなカオス結合系の他に、京都大学基礎物理学研究所の池田研介

（いけだ・けんすけ）、東海大学の大塚建樹（おおつか・けんじゅ）、北海道大学の松本健司（まつもと・けんじ）による光乱流のシミュレーション、津田（本誌43ページ参照）による生理的な非平衡神経回路モデルで同時に見いだされている。カオスの遍歴で注目すべきことはそれが要素間の関係を変えるダイナミクスの基本型を与えることである。というのは、最初にほぼ2つのクラスターになったとき同じクラスターに属していた2個の要素は、次にまた同じクラスターに属するとは限らないからである。要素の間の“仲のよさ”が時間的に変化していくのである。なお、カオスの遍歴状態ではある要素の振動が他の要素と揃うかばらばらになるかを長い時間にわたって平均してみると、その両者が均り合っている。

乱れた相と記した状態についても一言触れておこう。一見、各要素の運動はばらばらに見えるので、全体の平均値はほぼ相関のない、でたらめな値の平均のように見える。でたらめな変数 N 個の平均は、大数の法則によって、その分布 $P(h)$ の標準偏差は N とともに $1/\sqrt{N}$ で減少することが予想される。そこで長時間にわたって平均値を測ってその分布 $P(h)$ を求めてみた。するとサイズ N を増やしていくとあるサイズまでは予想通り分布はやせ細っていくが、それ以上サイズを増やしてもやせ細らなくなってしまう。標準偏差はあるサイズまでは減少するが、それ以上ではある有限の値に保たれるのである。

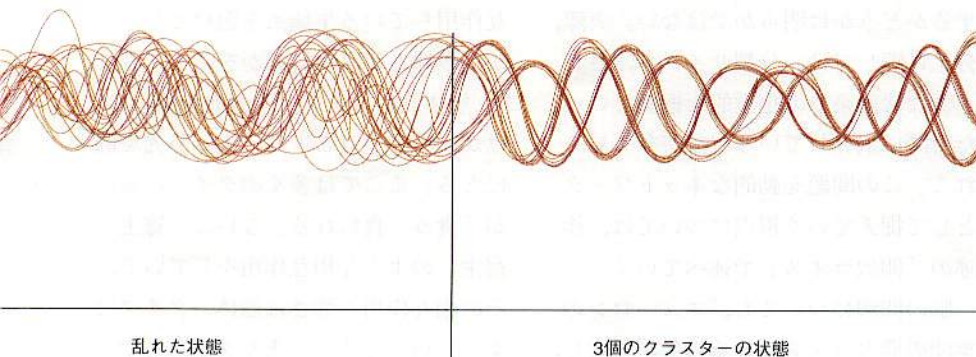
このことは、カオスを大域的に結合した系は一見ばらばらに振動しているように見えても、でたらめなもの集合とは違って要素の間の相関が常に残っていることを意味している。

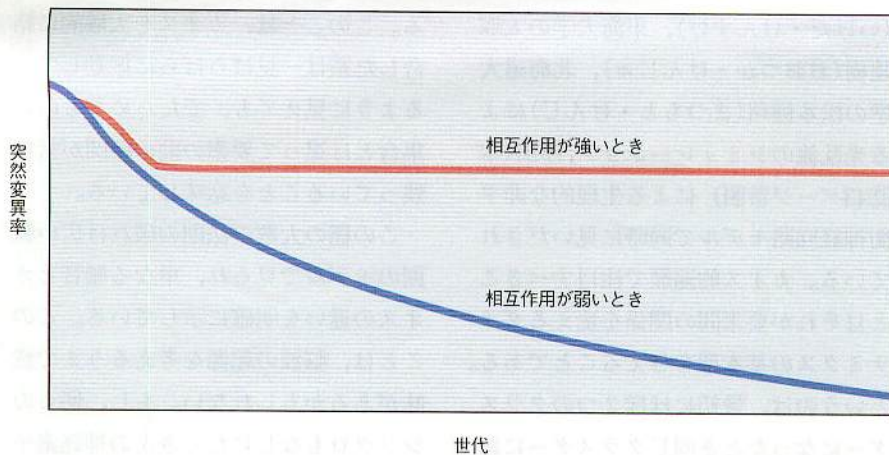
この種の大数の法則の破れは広い範囲のモデルで見られ、単なる雑音とカオスの違いを明確に示している。このことは、脳波の起源を考えるうえで意味があるかもしれない。もし、何らのシンクロもなしにたくさんの神経素子（集団）が発火しているのであれば、大数の法則により、その平均の変動は非常に小さくなってしまはずである。脳波はかなりの多くの神経の電位の平均を測っていることになるのだから、その変動は微細なものになってしまうはずなのである。ところが実際に脳波の変動を測ってみるとそうではない。つまり、神経素子は何らかの相関を保ちながら活動していることになる。

関係のダイナミクス

以上では要素の間の引き込みの関係が変化していく過程を見た。多くの要素が集団でネットワークを形成し、その間の相互作用を通じて非線形のダイナミクスを示している際には、一般に全体としても、個々の要素としても、要素間の関係としても複雑なダイナミクスが現れてくる。動的に複雑な系の見方として関係の変化過程を捉えるという視点の必要性は多くの分野で感じられ始めている。そういったダイナミクスとして捉えるべき問題の例を生物系のネットワークの中から拾ってみよう。

生物学者は1対1の対応関係をいろいろな分野で探索してきた。脳生理における“おばあさん細胞”仮説（特定の物体に1対1に対応して発火する神経が存在しているという仮説）などはその最たるものだろうし、免疫学における1抗原対1抗体の対応、生態学における1ニッチ対1種の対応、生化学





突然変異率の変化 多くのタイプの個体が「食う・食われる」あるいは「寄生・宿主」という相互作用をしている生態系を考える。相互作用が弱いとは、宿主と寄生体の依存関係が弱くそれぞれ環境に適応していることを意味するので、突然変異率が低ければそれぞれ同じパターンの子孫を残せて有利である。一方、相互作用が強い場合には、突然変異率が高ければ宿主は寄生体の攻撃をかわせて有利であり、また寄生体も変異した宿主を追うことができる。このような相互作用と突然変異率の変異を取り入れた生態系モデルをつくり、計算機実験を行ったところ、突然変異率の変化は上の議論に適合していた。

における1遺伝子対1酵素といった仮説もその例だろう。しかし、ここ数年、どここの分野でもこういった1対1対応への疑義は広がりつつあるように思われる。実際、ある種のネットワークの中で、多くの安定な状態が存在することを利用して、静的な多対多の対応を探そうという研究が各分野で見られる。しかし、ここではむしろそういった安定状態ではなく、動的に変動している多対多の関係を重視してみたい。

例えば、生態系では多くの種が相互に共生、競争、寄生といった作用を含む複雑なネットワークをなしていることが認識されてきている。熱帯雨林はそういった多種の複雑なネットワークの典型だろう。そこではとても種の個体数が平衡状態を保っているとは考えられないという議論もなされている。また、免疫系の中でもB細胞、T細胞などの相互作用が生態系での食物連鎖と似たようなネットワークを形成していると考えられている。実際の免疫系では抗体数はさまざまな時間変動を示しており、動的なネットワークを理解する論理が必要とされていると思われる。

こういった問題は細胞集団のネットワークでも見られる。多細胞生物においてどのように分化が起こり、形態形成がなされていくかは大きな問題である。分化については、遺伝子が互いに他の遺伝子のスイッチのon/offをコントロールするネットワークをつくっていることに着目し、それをランダムなon/off回路のネットワークとしてモデル化したカウフマン(Stuart A. Kauffman)の先駆的な研究がある。彼はこのネットワーク系が最終的におちる安定な静止状態が数多くあることを示し、それを分化した細胞の種類と関連づけた。これは多数の安定状態に着目する点では先駆的なものであり、その点からも極めて注目すべきものであるが、はたしてこういった見方が成立するかどうかは明らかではない。実際、分化に際しては、分裂サイクル、さまざまな代謝系での化学的な振動といった時間に依存している現象が多々見られる。この問題を動的なネットワークとして捉えていく視点については、後述の「開放カオス」で述べていく。

脳の問題についても、ニューロンの集団の発火パターンにある対象が対応し、

そうしたニューロン間の“機能的結合”に記憶が割り振られているという見方が最近の神経回路網ではよく採用されるようになってきている。一方、この数年、ニューロン集団の活動度の振動や引き込みの研究が盛んに行われている。ドイツのグループは神経の電位の相関を見て、その間の機能的な結合の強さが変化していることを見いだした。このことはちょうど、カオスの履歴で要素の間の引き込み度合いが変わっていくことに対応していると考えられる。こういった脳の動的な見方は津田により先駆的に提唱されているものである。

ホメオカオスと多様性の維持

生態系などの生物ネットワークの進化を考える際において、複雑さや多様性の起源と維持は重要な問題である。大域結合カオス系のクラスター化が多様性のもとをなし得ることはすでに見たが、複雑な振る舞いの起源については「カオスの縁」への進化という言葉をしぼしぼ聞く。カオス状態と秩序の状態の境界が情報処理などの点で優れていて、それに向かって進化が起こるのではないかという仮説である。この考えは行動パターンの進化などには有効であるかもしれないが、ちょうどカオスと秩序状態の境界という狭い領域をめぐるといふ話なので、多様性の安定な維持には当てはめられそうにない。もっと多くの種類のものが関係した問題で、安定な多様性、複雑性の維持はどのように実現できるのだろうか。

ここでは、多くのタイプの個体が相互作用している生態系を題材とし、いかに多様性が保たれるかを考えてみよう。具体的には東京大学の池上高志(いけがみ・たかし)と筆者による研究を例にとる。ここでは多くのタイプの個体が「食う・食われる」ないし「寄生・宿主」のような相互作用をしていて、その相互作用の強さは個体のタイプによっているとする。またタイプを変え

ていくような突然変異が存在し、さらにはその突然変異率自身も突然変異するというモデルを考えてみる。突然変異率は生物では複製の際の間違いの修復度合い等を通して変わり得るものなので、突然変異率の突然変異というのは不自然なことではない。

そうすると、個体数の変化の仕方は、寄生体と宿主の個体数の間の非線形の相互作用によって定まっている。多くのタイプの個体数の非線形ダイナミクスと突然変異による個体数の流入流出（あるタイプが突然変異すればそのタイプにとっては個体数が流出し、変異先のタイプにとっては個体数が流入する）を考えれば、この問題は非線形振動と相互作用といった既述の大域結合カオス系と共通になってくる。実際、突然変異率を固定したとき（結合度を決めることに対応する）、理想的な場合にはこのダイナミクスでも大域結合カオス系と同様に、いろいろなタイプの個体数の間の振動の引き込みのクラスター化やカオス的遍歴などが見いだされる。

では、突然変異率自身が突然変異す

る場合はどうなるだろうか？ もし個体間の相互作用が弱い場合には、最終的には突然変異率は減少していく。例えば相互作用が全然ない場合を考えよう。いったん環境に適応した個体のタイプが生まれれば、それと同じパターンを子孫に伝えた方が有利であるから、突然変異率が低い方が有利であることは予想されることである。これに対して、相互作用が強い場合には突然変異率は高く保たれることが見いだされた（前ページの図）。例えば宿主と寄生種の相互作用がお互いのタイプに依存している場合には、あるタイプの宿主を攻撃する寄生体の数が増えたとき、変異率が高ければ宿主は別なタイプへと変異して寄生体の攻撃をかわすことができ、一方、寄生体は宿主を追ってそのタイプを変えていくのである。

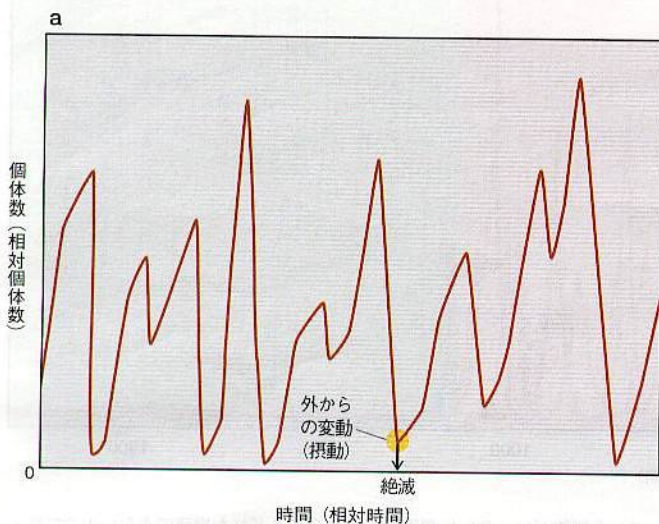
こうして多くの異なる遺伝子をもつ集団が、その内部ではお互いに変異をしつつ集団として遺伝子プールを残すことになる。こういう、変異で移り変わる集団の形成はアイゲン(Manfred Eigen)の言うウイルスの準種と同じようなものと考えられる。実際、

免疫系とウイルスの相互作用を単純化して考えるとここでのモデルに近いものとなるし、また現実にそのどちらでも突然変異率は高く保たれている。

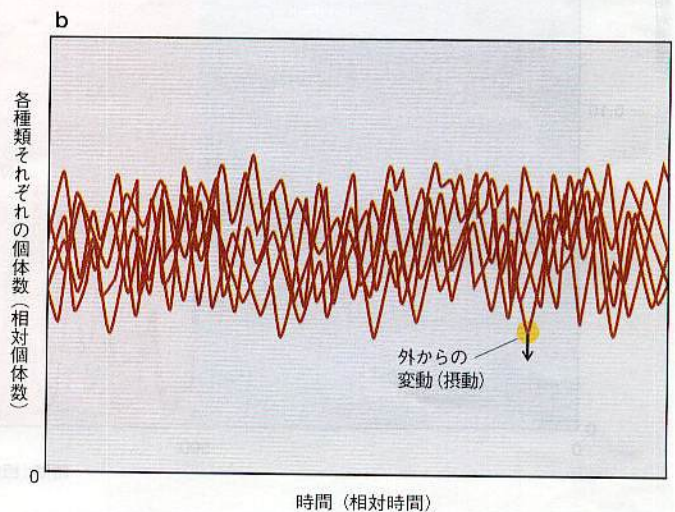
変異率が高い状態では、多くのタイプが共存している。それではこういった多種類の共存はどのようにして保たれているのだろうか？ まず個体数は一定でなく、その変動は不規則であることに注意しよう。そこで、カオスの不安定性の度合いとそれに関係している変数の数を測ってみる。その結果、不安定性の度合いは非常に弱い、関連する変数の数は多いことが見いだされた。こういった弱いがたくさんの変数の関係したカオスによる安定性機構をホメオカオスと名づけた。

ホメオカオスでは多くのタイプの個体数の振動は完全にばらばらでもなく、完全に揃っているわけでもない。上の例では長い時間スケールで見えていくと、突然変異率が適度に保たれることにより、相図の部分的な秩序状態のあたりをうろうろすることとなり、弱い不安定状態を実現しているのである。

こういった安定性機構の例として生



ホメオカオスと多様性の維持 突然変異率が高いときには多くの種が共存することになり、要素の変数の数が増える。逆に低いときには種数が少なく、変数の数も少ない。変数の数の少ないカオス系では、変数の値は激しく上下した。変数を個体数として捉え、値がゼロに近づいたときに外から小さな変動(環境変化)が加わると個体は簡単に絶滅してしまうことに



なる。一方、変数の数の多い場合には、変数の変動の不安定性は弱く、変動の上下幅が小さかった。この場合には少々の変動でも絶滅が起こらないことになる。こうした計算結果は、多くの種類の個体が相互作用することが生態系の多様性の維持に役立っていることを示している。このような安定性機構をホメオカオスと呼んでいる。

態系の安定性を考えてみよう。少数自由度のカオスの集まった系のダイナミクスでは個体数の変動は激しい。その結果、個体数がゼロに近づくことがあるので、外から小さな摂動が加わると簡単に絶滅してしまう。これに対して、多くの種類の個体の相互作用で保たれたホメオカオスでは個体数の変動はずっと小さく抑えられるために、小さな

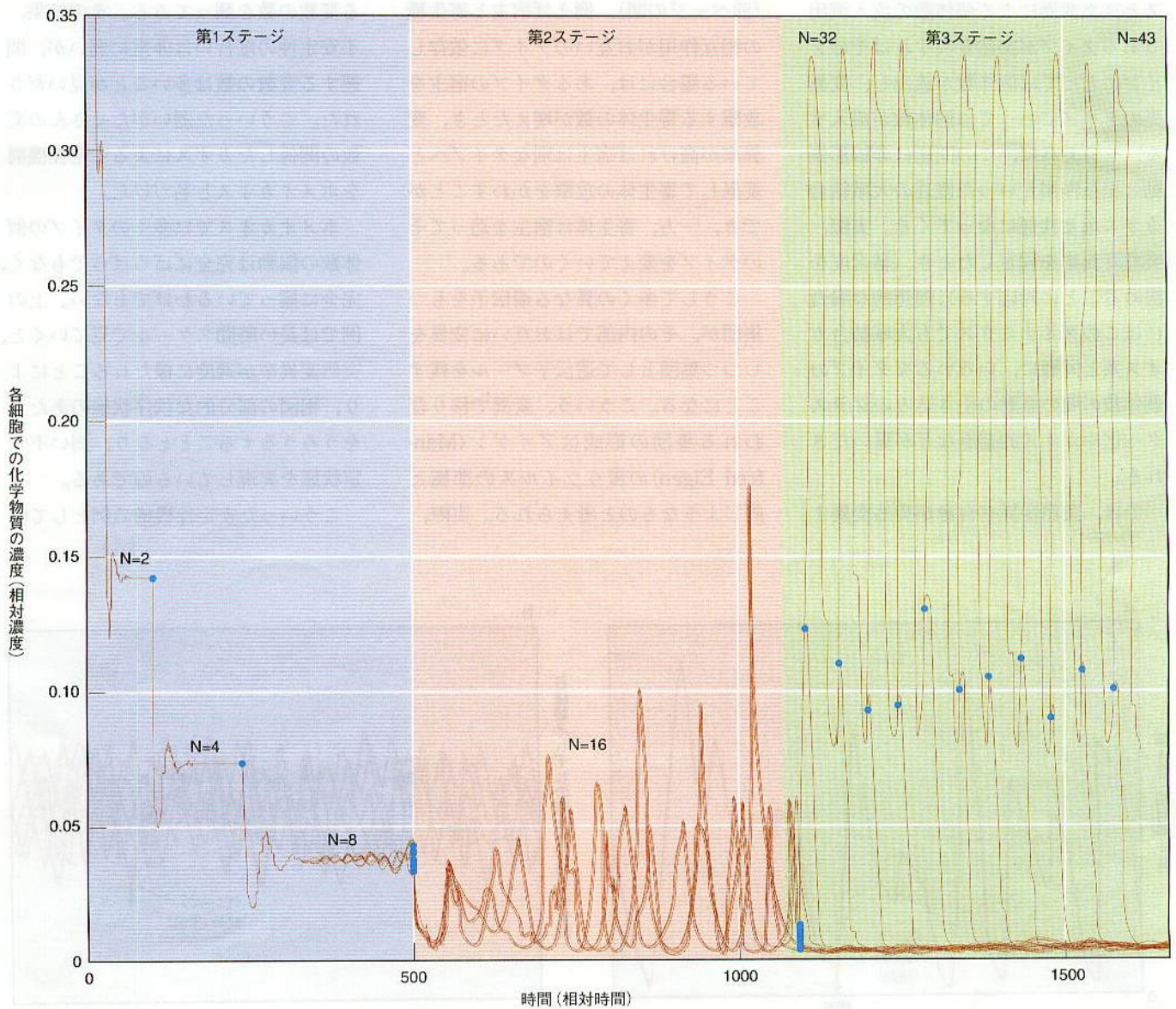
摂動では絶滅には至らない。これにより、摂動に対して安定な状態が実現する（前ページの図）。

ホメオカオスは生態系の安定性のみならず、免疫系やウイルスの多様性を維持する動的安定性、生体の安定性の維持にも重要なのでなかろうか？ 従来、ホメオスタシスという、静止状態の周りでのゆらぎと考えられがちだ

ったが、ダイナミックな安定性であるホメオカオスに目を向ける必要がこれから出てくると思われる。これと関連して、多くの適応ネットワーク系の安定なコントロールへのホメオカオスの応用も期待される。

開放カオスと多様性の起源

多様性を生むには同一のものから異



細胞の増殖と分化 細胞内の非線形代謝反応と細胞の数の増殖を考慮したモデルをつくった。このモデルには①細胞内で化学反応を起こす②培地から化学物質を取り込む③反応が進行して最終生成物がある値以上に蓄積されると2つに分裂する——ということを取り入れている。数値計算の結果、最初はただ単に分裂が進んだ(第1ステージ)。ところが、やがてそれぞれの細胞の代謝反応はいくつかのグループに分かれて振動を始めた(第2ス

テージ)。全細胞がいっせいに栄養源を取り合うとどれも増殖できないので栄養をとるグループの順番が生まれた、と解釈できる。さらに細胞の数が増すと、今度は活発に分裂する一部の集団とほとんど分裂しない大多数の集団とに分化してしまった(第3ステージ)。以上の結果は1個の細胞から性質の違う細胞が生まれたことを示しており、細胞分化や多様性の起源を考えるうえで興味深い(図中のNは細胞の数、青色の丸は分裂開始時点を示している)。

なる種類のもが生じてくる機構がどこかに必要である。カオス結合系が分化を与え得ることはすでに述べた。そこで、こういった考えに基づき、細胞の分化と発生の問題を動的な観点から見てみよう。ここで最近、注目すべき実験結果が大阪大学の四方哲也(よも・てつや)たちによって得られている。スープの培地の中にある大腸菌が、酵素活性の異なるいくつかの集団に分化するというものである。実験では大腸菌の間に突然変異は見いだされていないので、遺伝子の変化に原因を求めることは難しい。また上の分化は空間的に分離していないので、化学物質の濃度が空間的に変化しているという立場からでも説明は困難である。また、活性の変化やそれぞれの活性をもった細胞の個数の不規則な振動が見られることから、動的な見方が必要とされる可能性が強い。

個々の細胞の代謝反応は、酵素で調整され、その酵素は他の化学物質からつくられるから、非線系の振動が起こり得るし、また細胞同士は栄養源を取り合って相互作用をしている。そこで多くの非線形要素が結ばれた既述の大域カオス系のモデルと共通の問題となってくる。ただし、ここでの問題では要素の数 N が一定でなく、細胞の分裂や死に伴って増減するというのが大きな違いである。そこで、①個々の細胞の簡単な反応系(ただし酵素を通して非線形になっている)②培地からの化学物質の取り込み(ただしこれは細胞の活性、つまり細胞がもつ化学物質の量に依存する)③反応が進行し、最終生成物がある値以上に蓄積されると、2つに分裂する——ということを取り入れた、細胞の数の増殖を考慮した結合系のモデルを考えた。つまり、ここでは系の自由度は増殖に伴って増大していく。

このモデルのシミュレーションの結果、細胞が分裂するのにしたがって、

その代謝反応は同一の性質を失い、違った位相で振動を始めることが見いだされた(前ページの図)。全細胞の振動が引き込んでしまうと一斉に栄養源を取り合うことになって増殖ができないのに対し、化学物質(活性)の振動がクラスター化していると、それによって順番に栄養を取る強さが変わってくる。まずあるクラスターに属する細胞が活性化して栄養を取り、ついで別のグループが、……といった時間的な棲み分け(コンピューターシステムでのタイム・シェアリング・システムのようなもの)を実現する。

さらに興味深いのは、もっと細胞数が増していくと、細胞が活発に代謝反応を行って速く分裂する集団と、あまり反応を起こさずに休眠している集団に分化してしまうのである。これは有限な資源(栄養)の取り合いに応じて貧富の差が生まれたことを意味する。この結果は生殖/体細胞の分離と対応しており、また細胞分化と多細胞生物の起源を考えるうえでも興味もたれる一方、成長や資源の有効利用という点では経済の問題にも意義があるかもしれない。

この細胞増殖のように自由度がどんどん増えていく系においては、カオス的な不安定性が引き金となって新しい変数を生成していくという、従来のカオスとは少し違う、「開放型のカオス」とでも言うべき機構が存在する。ここで見たように開放型のカオスは新しい状態を次々と作り出していくので、多様性の起源として働いている。

例えばこのような描像が成り立つのではないだろうか? 系は不安定性が増すと開放型のカオスによって新しい自由度を獲得し、もとにあった不安定性が弱まり、弱いカオス状態に戻る。こうして新しい状態が次々と生まれていく一方、そのための過渡期を除くと、系はホメオカオスとしての安定性を維持できる。実際、新しいタイプの種や

新しい戦略をもった集団が生まれるとして個体数の変動とともに変数自身の数が増減できるとした、リンドグレン(Kristian Lindgren)や池上たちのモデルでは、こういったシナリオが成立しているようにも見える。生物系の多様性、複雑性に対して開放カオスとホメオカオスによる見方をさらに追求していくことは、これからおもしろい課題だと思われる。 ■

著者 金子邦彦(かねこ・くにひこ) 東京大学教養学部基礎科学科助教授、理学博士。東京大学理学部物理学科卒。同大学大学院を修了後、米国のロスアラモス国立研究所、イリノイ大学などを経て現職。専門は物理学で、カオス、大自由度カオス、生物ネットワークの進化などを研究している。

もっと詳しく知るために

CONSTRUCTIVE COMPLEXITY AND ARTIFICIAL REALITY (in press), K. Kaneko, I. Tsuda, T. Ikegami. eds, Special Issue of *Physica D*.

THEORY AND APPLICATIONS OF COUPLED MAP LATTICES, K. Kaneko eds. John Wiley and Sons ;1993.

CLUSTERING, CODING, SWITCHING, HIERARCHICAL ORDERING, AND CONTROL IN NETWORK OF CHAOTIC ELEMENTS, K. Kaneko, *Physica* 41 D-137; 1990.

MEAN FIELD FLUCTUATION IN NETWORK OF CHAOTIC ELEMENTS, K. Kaneko, *Physica* 55 D-368; 1992.

THE ORIGIN OF ORDER, S. Kauffman, Oxford Univ. Press; 1993.

ARTIFICIAL LIFE, ARTIFICIAL LIFE II, ARTIFICIAL LIFE III, C. Langton eds. (Addison Wesley); 1990, 1992, 1993.

HOMECHAOS: DYNAMICS STABILITY OF A SYMBIOTIC NETWORK WITH POPULATION DYNAMICS AND EVOLVING MUTATION RATES, K. Kaneko and T. Ikegami, *Physica* 56 D 406-429; 1992.

「ウイルスをとらえる新しい概念「準種」」. M. アイゲン, 「日経サイエンス」1993年9月号

DYNAMIC CLUSTERING OF BACTERIAL POPULATION, E. Ko, T. Yomo, I. Urabe, submitted to *Physica D*; 1993.

CELL DIVISION, DIFFERENTIATION, AND DYNAMIC CLUSTERING, in Special Issue of *Physica D*, K. Kaneko and T. Yomo.