

力学系の見方を広げる試みについて：カオスの遍歴、ミルナーアトラクター、相互内部ダイナミクス、インターフェース生成、パラメータ化

東大総合文化研究科・金子邦彦

力学系の立場から生命をとらえるために、どのようなことが可能か、力学系の現象としてどのようなものが有望であるか、力学系をどう拡張していけばよいか、などについて議論した。むろん、そこでえられた結果は力学系として考えれば、(広い意味での)力学系の現象にすぎず、それを生命とどう結びつけるかの解釈についての答えには必ずしもなっていない。しかし、生命が結局のところ生命が互いを生命と見る構造という(セルフコンシステントな)再帰的定義しかできないのであれば[1]、最低限それを許すための力学系構造を探るというのは、たぶん答えうる範囲の本質的な問いかけであろう。

研究会では以下の点について議論した。

(1) アトラクターというそれ自体は Static な見方を超えるものとしての Milnor Attractor :

カオスを大域的に結合した系(例えば Globally Coupled Map: GCM)の部分秩序相とよばれる状態では、多くのアトラクターが共存している。その状態でアトラクターの強さを調べて見た。ここで強さとは、アトラクターに σ の摂動を加えたときに必ずアトラクターに戻ってくる最大の σ である。GCMの数値計算によると、不思議なことに $\sigma = +0$ のアトラクターが頻繁に見出され、さらにそのベイシンの割合(そのアトラクターに引き込まれる初期条件の割合)はしばしば大きい。また、外からノイズを加えるとういう「弱い」アトラクターへの吸引が大きくなる[2-4]。

これまでアトラクターはそれ自体カオスであっても、そこへの落ち着きかたとしては安定であるという前提がしばしばされていた。上のようなアトラクターの存在はこうした「static」な見方に変更をせまる。さらに、こう

した弱いアトラクター (Milnor Attractor) がたくさんあって、それが互いに $\sigma \rightarrow +0$ の摂動で連結していれば運動は Milnor Attractor 間を長期的に遷移する過程となる。こうしてみると、タイプ II の時空間欠性 [5] や次のカオスの遍歴 (の一部) [5] は、そのような遷移過程としてとらえられる可能性がある。

(2) ダイナミクスを与えるためのカオスの遍歴

上のようにカオスの遍歴をとらえると、全体としてのアトラクターは Milnor Attractor 間の遷移列として上位レベルのダイナミクスと記述され、一方各 Milnor Attractor は「下のレベルの」ダイナミクスで得られる。この際、Milnor Attractor は riddled basin を持つので上のレベルの遷移過程は、GCM に加わったどのような小さな摂動によっても変更されうる。このことは、(精度こみで実数上の計算可能性を定義した [6] 際に)、はたしてカオスの遍歴の上位レベルの遷移は下のレベルから決定可能なのかという問題を提起する。そして、下位レベルから決定不能な上位レベルが作られる例を見出すことは複雑系としての生命を考える基本的要件である。

(3) 全体の情報を内部に表現する力学系としての相互内部ダイナミクス

内部に自由度を持ったユニット (細胞) が互いに相互作用し、その内部ダイナミクスを通して増殖していくという「相互内部ダイナミクス」モデルを調べ [1,7,8]、その示す現象のクラスを議論した。それを通して、細胞の分化、発生過程の基本的部分が上のような「相互内部ダイナミクス」系の示す普遍的構造の 1 タイプなのではないかという仮説をたてている。特に、このモデルでおもしろいのは、「幹細胞」が、まわりの細胞の分布の情報をその細胞内部のダイナミクスにうめこみ、それによって、どのタイプの細胞に分化するかの確率を自発的に制御するという点である。つまり、集団によって部分 (各細胞タイプ) の性質が決められ、その部分からの分化制御を通して集団レベルの発生過程が安定に進行するという、部分と集団のダイナミクスの相補的關係が見出されている。

(4) つながった中から適度に自律したユニットを形成するためのインターフェイス生成ダイナミクス

こうした各細胞の状態は、ある程度までは内部のダイナミクスのアトラクターに近いものとしても記述されるが一方で細胞間相互作用を通してそのダイナミクスが選択されるという点も欠かせない。各状態の決定における内部と相互作用の度合の違いで、未分化細胞、分化の決定した細胞、生殖系列、幹細胞、ガン細胞などの違いをクラス分けすることをこころみている。特に、幹細胞では、内部の状態としての安定性と他の種類への分化可能性の両面が、内部ダイナミクスと相互作用の適度なバランスとしてあらわれており、これ

は Milnor Attractor で議論したような「弱い」状態を形成しているとも考えられる。

(5) 分化を固定し、情報を形つくるために変数-パラメータを分離する過程としてのパラメータ化ダイナミクス

複雑系の基本問題の一つに、シンボルとパターンの相補性 [1] があげられるが、これは細胞の問題に関していえば、多くのケミカルの中から、他をほぼコントロールしているように見え、シンボル化された情報を持つ遺伝子がどのようにあらわれてきたかという問題になる。これについてはいまだ決定的な解答は得られていない。

一方、コントロールパラメータとしての遺伝子の存在を仮定した上で、相互内部ダイナミクスモデルで議論したと表現型のダイナミクスを考えると、種分化(進化)過程について、新しい視点がえられる。セントラルドグマを満たすべく遺伝型をパラメータとして、表現型を変数として表現し、これらを持つユニットが内部のダイナミクスと相互作用を通して増えていき、さらに競合があって一部は取り除かれるとする。このような完全に「古典的」な設定のもとで、種分化過程が (1) 競合的相互作用による表現型の分化 (これは相互内部ダイナミクスモデルの帰結) (2) 増殖と競合による、その分化の遺伝型への固定 (遺伝型-表現型の差異の相互増幅) (3) 分離した遺伝型の生成 (最終的には表現型と 1 対 1 に対応している) という形でおこることが示される [9]。これは進化を考える上でも興味深い。シンボル化された情報がパターンのダイナミクスをあとから takeover するという考えは認知や言語の問題でも重要ではないかと考えている。

[1] 金子邦彦・池上高志「複雑系の進化的シナリオ—生命の発展様式」(朝倉書店、1998)

[2] K. Kaneko, Phys. Rev. Lett., 78 (1997) 2736-2739

[3] K. Kaneko "On the Strength of Attractors in a High-dimensional System: Milnor Attractor Network, Robust Global Attraction, and Noise-induced Selection", Physica D, in press

[4] 金子邦彦、数理科学 1997 年 408 号 59-65

[5] 金子邦彦・津田一郎「複雑系のカオスのシナリオ」(朝倉、1996)

[6] A. Saito and K. Kaneko, Prog. Theor. Phys. 99 (1998) 885-890 および準備中

[7] K. Kaneko and T. Yomo, Bull. Math. Biol. 59 (1997) 139-196

[8] C. Furusawa and K. Kaneko, Bull. Math. Biol., 60 (1998) 659-687

[9] K. Kaneko and T. Yomo, "Genetic Diversification through Interaction-driven Phenotype Differentiation", preprint