

## 創発仮説とその考察 (3) — カオスの縁のデジタル性について —

稲垣 耕作  
京都大学大学院情報学研究科

あらまし 複雑適応系の分野では、カオスの縁という概念が広く知られている。カオスの縁は離散的な性質をもつ系で発見されていて、著者の知る限りでは純粋な連続系では発見されていない。本論文では Wolfram のセルラーオートマトンモデルにおいて、カオスの縁が離散性と密接な関係をもつ概念であり、セルのとり状態数およびセルの近傍サイズのいずれが増えても、カオスの縁の出現する割合が漸近的に 0 に近づくという証明を与える。生命を情報という観点から見ると、複雑適応系の分野では、生命の自己組織化現象とカオスの縁との密接な関係を推測されることが多い。この立場の下では、本証明は生命現象の根源にデジタル性が関与していることの理論的根拠となる可能性をもつ。証明では、カオスの縁の増殖的性質よりも、生長停止性が本質的な役割を果たす。

## The Emergence Hypothesis and Its Study (3) — On Discreteness at the Edge of Chaos —

Kosaku INAGAKI  
Graduate School of Informatics, Kyoto University

**Abstract** The edge of chaos is a well-known concept in the field of complex adaptive systems (CASs). As far as the author knows, the edge of chaos is observed in systems which have some discrete characteristics, and has not been discovered in purely continuous systems. In this paper, based on the cellular automaton model proposed by S. Wolfram, it is proved that the occurrence probability of the edge of chaos asymptotically approaches 0 with the increase of either the number of states or the neighborhood size. CAS researchers who pay attention to information aspects of biological life, suppose that the edge of chaos has some close relation to self-organizing processes in living organisms. The proof presented here would contribute to such a theory that biological life utilizes digital phenomena. The proof shows that growth termination, rather than self-reproduction, is an essential property at the edge of chaos.

### 1 まえがき

複雑適応系 (complex adaptive system, CAS) の分野には、いわゆるカオスの縁 (edge of chaos) と呼ばれる興味深い概念がある。Wolfram[1, 2] がセルラーオートマトンの研究で発見し、Packard[3] が命名した概念である。Kauffman[4] のランダムネットワークモデルにおいてもこの言葉が使われる。

カオスの縁を特徴づけるのは、そこで起る自己組織化に類似した現象であって、Langton[5] などこれを創発 (emergence) と呼ぶ研究者が多い。創発とは高い確率での自己組織化とでもみなすのがよいと考えられるが、カオスの縁とともに、厳密に科学的定義がなされている概念ではない。ただ、著者は創発仮説の下で基本万能性 (elemental universality) [6, 7, 8, 9, 10] の

概念を導入して、Wolfram[2] が予想したカオスの縁に計算万能性が伴うことを証明した。

本論文では、Wolfram によるセルラーオートマトンモデルを取上げ、カオスの縁の性質を更に考察して、この概念をより精密にしていこうと試みる。著者の知る限りでは、カオスの縁は何らかの離散的な性質をもつ系に付随していて、純粋な連続系では発見されていない。Wolfram[11] もこれについて考察している。ここではカオスの縁のデジタル性に関する一つの証明を与える。

ここでの証明では、セルの状態数あるいは近傍サイズのいずれかが増すにつれ、Wolfram のいうクラス 3 の出現が支配的となり、クラス 1, クラス 2, およびカオスの縁と呼ばれるクラス 4 の出現確率は漸近的に 0 に近づくという方法をとる。この証明によって、カ

オスの縁はデジタル性と密接な関連があると考えられる。

複雑適応系の分野では、生命の自己組織化現象とカオスの縁との密接な関係を推測されることが多い。著者も創発仮説に関連して提唱した情報物理学 [7, 8] において、カオスの縁のデジタル性を重視している。創発仮説は現段階ではあくまで仮説であるが、計算万能性など離散系の性質を導入することにより、生命の発生と進化に離散的な自然法則の関与を推測している。本論文では、この観点からも考察を加える。

## 2 記法と定式化

$d$ 次元セルラーオートマトン ( $d$ -CA)  $M$  とは、 $(K, Z^d, X, F)$  なる 4 字組で表される。空でない有限集合  $K$  は状態アルファベットである。 $d$ 次元の整数格子の全体  $Z^d$  は、整数の  $d$  字組から成る座標の集合である。 $Z^d$  の要素はセルと呼ばれ、座標をその名前とする。 $X = (x_1, \dots, x_n)$  は近傍形であり、セル  $i$  に対して  $N(i) = (i + x_1, \dots, i + x_n)$  を  $i$  の近傍という。

すべてのセルは同一の有限オートマトンである。各セルは  $K$  の要素を状態としてとる。 $F: K^n \rightarrow K$  は状態推移関数である。 $a_i^{(t)}$  をセル  $i$  における時刻  $t$  の状態とすると、次式のように、直前の時刻  $t-1$  の状態からの写像によって決定される。

$$a_i^{(t)} = F(a_{i+x_1}^{(t-1)}, \dots, a_{i+x_n}^{(t-1)}) \quad (1)$$

本論文では Wolfram [2] のモデルを扱い、1-CA を対象とする。自然数  $k$  と  $r$  を用いて、 $K = \{0, \dots, k-1\}$ ,  $X = (-r, -r+1, \dots, 0, \dots, r-1, r)$  とする。セルの状態数は  $k$  であり、近傍のセル数は  $2r+1$  である。

このとき、状態推移規則の別の形は、

$$a_i^{(t)} = f\left(\sum_{j=-r}^r \alpha_j a_{i+j}^{(t-1)}\right) \quad (2)$$

である。ここで  $\alpha_j$  は整数定数である。Wolfram モデルにおいて式 (1) は、 $\alpha_j = k^{r-j}$  とおくことにより、必ず式 (2) に表現し直すことが可能である。

ここでは特に Wolfram が行ったように、全体性規則 (totalistic rule) を採用し、すべての  $\alpha_j = 1$  とする。また通常の CA では静状態  $s_0$  を定め、 $F(s_0, \dots, s_0) = s_0$  とするが、ここでは状態 0 を静状態として、 $f(0) = 0$  とする。本論文では静状態が長く連続したセルを白地と呼ぶことがある。またある時刻  $t$  におけるセルの状態を一括してとらえるとき、それを様相と呼ぶ。

CA の各セルは有限状態であるが、一般に  $a_i^{(t)}$  は時刻 0 における  $a_{i-rt}^{(0)}, \dots, a_{i+rt}^{(0)}$  という  $(2rt+1)$  個のセルの状態に依存する。時間の進行とともにその範囲が

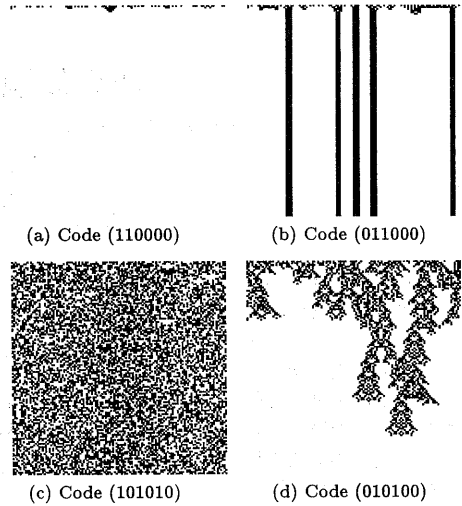


図 1: セルラーオートマトンの 4 分類

広がり、有限性を保てない。また状態推移関数は一般に非線形であり、時刻 0 におけるセルに対する簡単な関数に還元することもできない。そのため扱いにくいモデルである。

コード  $C = (c_{(k-1)(2r+1)}, c_{(k-1)(2r+1)-1}, \dots, c_0)$  を、関数  $f$  に  $c_j = f(j)$  という規則で対応させる。容易にわかるように、1-CA は全部で  $k^{2r+1}$  種類あるが、全体性規則を採用した通常の 1-CA は  $k^{(k-1)(2r+1)}$  種類である。全体性規則を採用した通常の 1-CA を  $(k, r)$ -CA と表記することにする。常に  $c_0 = 0$  であることに注意せよ。

また 1-CA には、セル数が有限のもの、有界でないもの、有限の場合には、円環状にセルを配置したと仮定して、剰余演算でセルに名前をつけることが多い。

図 1 は、(2, 2)-CA において、各セルの初期状態として 0 と 1 を等確率にランダムに割当て、0 を白、1 を黒で表示したものである。時間軸は下向きにとっており、上辺が初期状態である。また有限個数のセルを円環状に配置したとして計算している。

図 1(a) ~ (d) は Wolfram によってそれぞれクラス 1 ~ 4 と分類された。連続系との類比では、クラス 1 はリミットポイント、クラス 2 はリミットサイクル、クラス 3 はカオス的というべきストレンジアトラクタに相当する。そしてクラス 4 がカオスの縁と呼ばれる。

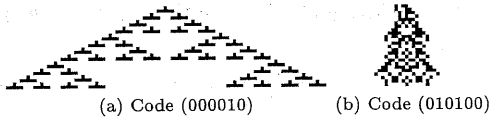


図 2: 発散的と非発散的の例

### 3 カオスの縁の基本的性質

ここではセル数が有界でない  $(k, r)$ -CA を考察対象とする。Wolfram[2] は、 $k$  と  $r$  が大きくなるにつれて、クラス 3 が非常に多くなると指摘した。クラス 1 と 2 は減少する。一方、クラス 4 は増えると推測した。ただし彼は視察によっただけであり、対象としたのは (2, 1)-CA, (2, 2)-CA, (2, 3)-CA, (3, 1)-CA の 4 種のみだった。

カオスの縁は厳密に定義されていず、その研究は多くの問題点を含んでいる。Kauffman によるものとの共通性も明らかでないなど、従来の研究は不完全である。ここでは、クラス 4 を真部分集合として含む集合に関して証明を行う方法により、間接的にカオスの縁の考察を深める。次の補題は式 (2) の性質より容易にわかる。

**補題 1**  $(k, r)$ -CA において、時刻  $t$  の様相が  $a_i^{(t)}$  を中心に左右対称ならば、それ以後の任意の時刻  $t+j$  における様相は  $a_i^{(t+j)}$  に関して左右対称である。

また  $(k, r)$ -CA において、時刻 0 における次のような初期状態の配置を考え、これを基本初期様相と呼ぶ。即ち  $-r \leq i \leq r$  のとき、 $a_i^{(0)}$  の値は任意であって、それ以外の  $i$  については 0 とする。 $(a_{-r}^{(0)}, \dots, a_r^{(0)})$  を配列とみたとき、この配列には  $k^{2r+1}$  通りの任意の値を割当て、それ以外のセルを 0 としたのが、基本初期様相である。

ある基本初期様相から始めたとき、 $a_i^{(t)} \neq 0$  である  $i$  の最小値を  $m^{(t)}$ 、最大値を  $M^{(t)}$  とする。 $t$  が大きくなったときに、 $M^{(t)} - m^{(t)}$  が有界でなく、その間にある非 0 要素数も有界でない基本初期様相があるならば、発散的であるという。また常に有界であるならば、非発散的であるという。

図 2 の (2, 2)-CA において、図 2(a) は発散的であり、これ以後幾らでも広がる。発散的なとき、その基本初期様相に相当するパターンさえ与えられれば、比喩的に述べるならば、それ以後は白地をどんどん埋め尽くそうとする。即ちこれはクラス 3 の十分条件であり、従来もそのように分類されている。

**補題 2** 発散的な  $(k, r)$ -CA は、クラス 3 に属する。

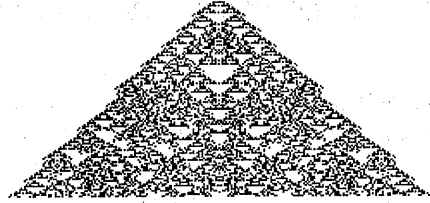


図 3: コード (00010100) の (2, 3)-CA

図 2(b) は非発散的であり、これ以後は静状態のみである。図 1(d) に示したクラス 4 である。この図は基本初期様相の中で最も長い時間にわたって非静状態を生じた場合を示している。

図 1(d) に示したカオスの縁は、視察によっても、必ずしも白地を埋め尽くす性質をもっていない。その生長の先端部で発散するのではなく、しばしば生長を停止する。これがカオスの縁の一つの特徴である。基本初期様相以外から出発した場合には、より複雑な現象も起るが、ここでの証明には必要ない。

またその一見して有機的と見える形状の特徴は、図 2(b) のように基本初期様相からの状態推移に現れる。元から CA の状態推移関数の中に組込まれているとみなすべきものである。

常に  $m^{(t+1)} < m^{(t)}$  かつ  $M^{(t)} < M^{(t+1)}$  となる基本初期様相があるとき、その CA を単調増加的と呼ぼう。

単調増加性をもつときには、発散的であることを証明しやすい。しかしそうでない場合には、発散的であることの証明が困難なことが多い。例えば図 3 に示す CA は発散的であると予想されるが、その証明をここでは与えられない。個々の CA を対象としても、数理的性質を分析するのは難しく、CA は複雑である。

### 4 状態数に関する漸近的性質

コード  $C = (c_{(k-1)(2r+1)}, c_{(k-1)(2r+1)-1}, \dots, c_0)$  から、クラス 3 の  $(k, r)$ -CA を判定する十分条件の一つを与えよう。単調増加的のうち、最大単調増加的という条件である。この条件がクラス 3 の割合の下限を与え、ここでの証明にはこれで十分である。

$a_i^{(0)}$  のみが非 0 である基本初期様相から始めて、任意の時刻  $t$  において、 $a_{i+rt}^{(t)}$  が非 0 であるようにできる  $(k, r)$ -CA を最大単調増加的と呼ぶ。

なお補題 1 より様相は左右対称的である。また、時間と共に様相がどのように変化していくかは、図 2(a) が最大単調増加的な場合の簡単な実例である。次の補題が成立つことが容易にわかる。

**補題 3** 最大単調増加的な  $(k, r)$ -CA は、クラス 3 に属する。

最大単調増加的な場合を対象として、 $k$  に関して  $(k, r)$ -CA がどのような漸近的性質をもつかを考えよう。次の補題が成立つ。証明での  $1/k$  という関数形は複雑系で頻繁に現れるものである。

**補題 4**  $(k, r)$ -CA において、最大単調増加的な状態推移規則の割合は  $(k-1)/k$  である。

(証明)  $a_{i+r(t+1)}^{(t+1)}$  は  $a_{i+rt}^{(t)}$  の値  $1, \dots, k-1$  のみで決まる。従ってコード  $C$  において、 $c_1, \dots, c_{k-1}$  だけに注目すればよい。その値の割当て方は  $k^{k-1}$  通りある。また  $c_0 = 0$  である。その他の  $c_l$  の値は任意である。

この部分のコードの状態推移を通常の方法で有向グラフ表現したとき、状態 0 の頂点を含まないループが一つでもできることが、最大単調増加的である必要十分条件となることに注意せよ。

最大単調増加的でない場合には、この有向グラフは状態 0 を根とする木になる。従って、グラフが木になる場合の数を  $k^{k-1}$  から引けば、最大単調増加的な割合を求められる。

$k$  頂点の無向木の数は、Cayley[12] によって与えられていて、 $k^{k-2}$  である。そのそれぞれの木において、状態 0 の頂点を根とする向きに各枝の向きを決めることによって、ここで考えている木とちょうど 1 対 1 に対応する。その割合は全体の  $1/k$  である。よって、最大単調増加的な場合の割合は  $(k-1)/k$  である。(証明終)

**定理 1**  $(k, r)$ -CA において、 $k$  が大きくなったとき、クラス 4 が出現する割合は漸近的に 0 に近づく。

(証明) 補題 4 により、 $k$  が大きくなるとともに、最大単調増加的な場合の割合が 1 に近づく。補題 3 により、これらはクラス 3 である。よってクラス 4 が出現する割合は漸的に 0 に近づく。(証明終)

## 5 近傍サイズに関する漸近的性質

次に  $r$  が大きくなったとき、 $(k, r)$ -CA の漸近的性質を考えよう。その証明は Shannon の第 2 定理 (通信路符号化定理) にやや類似した方法で行うことができる。即ち CA のコードに典型的系列の考え方を適用するのである。

コード  $C = (c_{(k-1)(2r+1)}, c_{(k-1)(2r+1)-1}, \dots, c_0)$  において、 $l \neq 0$  である  $c_l$  が値  $j \in \{0, \dots, k-1\}$  をとる個数を  $w_j$  と書く。  $p=1/k$ ,  $N=(k-1)(2r+1)$  と置き、

また  $\delta$  を任意に固定した正数とすると、すべての  $j$  について、

$$\left| \frac{w_j - Np}{\sqrt{Np(1-p)}} \right| < \delta \quad (3)$$

を満たすとき、コード  $C$  を典型的と呼ぶ。

ここでは  $C$  における  $c_0$  以外の各  $c_l$  には、すべての可能な値を割当てるので、この典型的系列の考え方を適用できる。情報理論でよく知られているように、漸近的等分配律によれば、 $k$  あるいは  $r$  が大きくなって  $N$  が大きくなると、ほとんどすべてのコード  $C$  は典型的となる。またそれらは一様乱数とみなすことができる。

**定理 2**  $(k, r)$ -CA において、 $r$  が大きくなったとき、クラス 4 が出現する割合は漸的に 0 に近づく。

(証明) 時刻 0 における様相として、十分長い区間のセルに  $0, \dots, k-1$  という状態が一様乱数として割当てられているとする。

時刻 0 において、 $a_i^{(0)} \neq 0$  である最大の  $i$  を  $M$  とする。時刻 1 において、 $M+1 \leq i \leq M+r$  である  $a_i^{(1)}$  を考える。 $s_i = \sum_{j=i-r}^M a_j^{(0)}$  とするとき、その値は  $f(s_i) = c_{s_i}$  である。

$s_i$  は  $k$  値一様乱数の和とみなすことができる。また  $s_i - s_{i+1}$  が  $a_{i-r}^{(0)}$  であるので、これらの  $a_i^{(1)}$  を決める過程は、コード  $C$  において、 $c_l$  を順次に、 $k$  値乱数の値が示す間隔によって、飛び飛びに右へと読んでいく過程に相当する。コード  $C$  が典型的でありさえすれば、飛び飛びの間隔にかかわらず、 $a_i^{(1)}$  は  $k$  値一様乱数とみなせる。従って  $M+1 \leq i \leq M+r$  である  $a_i^{(1)}$  のすべてが 0 である割合は  $k^{-r}$  であるので、 $r$  が大きくなるとほとんど無視できる。

これを任意の時刻  $t$  において考えても、次の時刻  $t+1$  では前段の右端から  $r$  個のセルの値はやはり  $k$  値一様乱数とみなせる。これは左端についても同じ議論ができる。従って  $r$  が大きくなると、CA はほとんど常に単調増加的であることがわかる。

では両端ではなく途中の位置のセルはどうだろうか。時刻 1 における途中の一般位置のセル  $a_i^{(1)}$  を考える。その値は  $S_i = \sum_{j=-r}^r a_{i+j}^{(0)}$  に依存して決まる。 $S_i$  は平均値  $(k-1)(2r+1)/2$  であり、分散をある値  $\sigma^2$  とすると、 $\sigma$  は  $\sqrt{r}$  に比例すると考えられる。

コード  $C$  において、 $1 < K$  なるある正定数  $K$  を用いて、 $d = (k-1)(2r+1)/2 - K\sigma \leq i \leq (k-1)(2r+1)/2 + K\sigma = u$  なる  $c_i$  を考える。このとき  $(c_u, \dots, c_d)$  を考えると、 $\sigma$  が十分大きければ、この系列にも典型的の概念を適用することができて、そのほとんどすべてが典型的となる。

$a_i^{(1)}$  はほぼこの  $(c_u, \dots, c_d)$  によって写像される。その値は乱数に近く、多くの非 0 を含むだろう。

う。ただし  $S_i$  はその平均値を中心とした値をとり、 $S_{i+1}-S_i=a_{i+r+1}-a_{i-r}$  によって飛び移るので、必ずしも乱数とみなせる保証はない。

しかしながら、ほとんどすべてのコード  $C$  は単調増加的であることを既に示した。ここでの場合には、もし途中のセルに白地が広がってきたとしても、ほとんどすべての場合に、そこはまた非 0 の値によって埋められていくのである。即ち途中のセルの様相は  $k$  値乱数ではないが、ほとんど常に多くの非 0 を含み、クラス 3 に相当する。よって定理が成立つ。(証明終)

## 6 カオスの縁の考察

クラス 4 あるいはカオスの縁は、数理的に厳密に定義された概念ではない。しかしカオスの縁を真部分集合とする集合を対象としたので、その漸近的性質を求めることができた。Wolfram の推測と異なり、 $k$  あるいは  $r$  の増加とともにクラス 4 の出現割合が減少するとの証明となった。即ちカオスの縁はむしろ単純を好むという見方をすることもできよう。

左右対称でない規則の場合については、ここでの証明は片側ごとに行えるので、容易に拡張される。多次元への拡張も容易と思われる。全体性規則ではなく、式 (1) の一般の状態推移規則を用いた場合については、コンピュータ実験を行った。傾向として式 (1) を用いた方がカオスの縁が現れにくい。指定すべきパラメータが多くなるためと推測される。カオスの縁は単純を好む傾向が強いようである。

この証明は離散系に関するものだったが、 $k$  および  $r$  が大きくなった極限は、アナログ的性質をもつ系であるといつてよいだろう。ただし不連続関数をすべて含んだ極限であるので、それを連続系と呼ぶのでなく、ここではアナログ系と呼んでおく。証明は、アナログ系にカオスの縁が存在しないという意味ではないことに注意すべきである。アナログ系では、カオスの縁は存在するが、測度 0 となると解釈すべきである。

連続関数を対象としたときには、本証明での議論を連続関数近似で置き直して適用することもできるが、更に研究してみるのがよいだろう。なお CML[13] は空間を格子点に離散化しているの、純粋な連続系ではなく、カオスの縁と類似した現象が見られる。また Castets 他 [14] 等の研究も興味深いと思われる。

カオスの縁は生命現象との関係が推測されることが多い。著者の創発仮説は生命と知能に関与する問題意識をもって提案している。ただ地球上の生命体には物質代謝が必須であり、また生命現象は非常に複雑であるため、この種の仮説が科学的真実と認められるにはまだ時日を要するであろう。しかし仮説の提案も科学

の方法として重要であり、情報現象の観点で自然を分析する情報物理学の手法を、著者は今後有望ではと期待している。

カオスの縁が生命現象に付随する性質であるとの仮説の下では、ここで与えた証明は、生命現象の根源にはデジタル性が関与していることの理論的根拠となる可能性をもつ。即ち「生命はデジタルである」という仮説である。

またここでの証明からいえるのは、カオスの縁という一見有機的な形状は、CA の規則にその基本形が予め組込まれていることである。類推として表現すると、「生命はプログラムされている」ということである。ただしこれは浅い観察だという側面がある。理論として更に踏込むには、例えば脳の構造が遺伝子に予めプログラムされていても、いかにして多様な思考が行われるか等を説明すべきである。もしそれができれば、カオスの縁という概念の重要性は更に高まるだろう。

また別の視点としては、カオスの縁が発散的でないとの観察から、生命に関して「生長を停止し、死に、絶滅する」という類推が浮び上がる。生命の顕著な特性は自己増殖性とされることが多いが、細胞死や個体死や種の滅亡等が、生命を説明するために重要な特性なのだろうか。東洋哲学はこの立場を堅持しているし、指摘されてみれば当然の特性だが、その役割は今後の研究課題である。

付け加えると、カオスの縁と生命現象とのかわり等に関して、次の簡略な試算は、多少の見直しを与えるかもしれない。原始以来の地球上の有機物の可能な種類を見限り、それを情報という観点に結び付けてみるのである。

地球上の有機物の総量を人類全体の重量の  $10^6$  倍程度として、約  $3 \times 10^{14}$  g と仮定しよう (地球表面を 60cm ほど覆う量になる)。原始地球上の有機物の分子量を  $10^2$  ほどだとすると、この重量は約  $1.8 \times 10^{42}$  個の物質に相当する。また地球の年齢である約 46 億年は約  $10^{18}$  秒である。

この時間の間に、この全物質が反応し続け、すべて異なる有機物質に変化し続けたとしよう。毎秒 1 回ずつ変化したとして、 $1.8 \times 10^{42} \times 10^{18} = 1.8 \times 10^{60} \approx 2^{200}$  種類の有機物質が生成される。非常に粗い概算であるが、反応測度が更に速かったとしても数桁の違いにすぎない。

このように生成された有機物質の一つ以上が、生命体としての特質を備えていたことになるというのが、物質という見方での計算である。ヒトもそのような物質の一つだとすると、 $2^{200}$  種類ほどの物質のうちどれかである。

しかし、Shannon 流の情報量という視点から見たときには、大きな困難が生じる。これらの物質は、その

どれをとっても約 200 ビットという情報量だけで指定されてしまう。自然界のランダムな有機反応の中から、ほんの 200 ビット程度の情報を選別する過程によってできたのが、生命なるものに付随する基本プログラムなのである。それは知的生命体まで可能にした。情報の観点ではヒトの 30 億文字の DNA でさえ少ないように思えるのに、自然のランダムな過程はもっと少ない情報しか生成していないのである。

これを「生命の情報パラドックス」と呼んでおきたい。このようなパラドックスが生じるのは、恐らく情報に関する科学がまだ甚だ不完全であって、Shannon の見方とは異なる情報の定式化を必要としているからではないかと思われる。

Wolfram によれば、(2,2)-CA では  $2^{-4}$  の割合でカオスの縁となる。たった 4 ビットの情報量である、ごく少量のコード情報で起るカオスの縁という現象が、生命の起源に関与すると考えたり、情報の別の定式化を与える手掛りになりうるかもしれない。ただカオスの縁という概念はまだ原始的であって、生命現象を情報の視点から解明し、唯物的物理学と並ぶほどの科学とするには、更に深い研究を要すると思われる。

## 7 あとがき

Wolfram のセルラーオートマトンのモデルに基づき、いわゆるカオスの縁という概念に付随するデジタル性の証明を試みた。状態数と近傍サイズのいずれについても、それらが増加するとともに、カオスの縁の出現割合は漸近的に 0 に近づくことを証明した。

創発仮説では、計算万能性というデジタル概念を用いるので、この証明はその妥当性を高めえたことになろう。自然界の生命と知能に、カオスの縁という創発現象が関与することの妥当性は、更に研究を重ねなければならないが、カオスの縁に「生長を停止し、死に、絶滅する」という特性が潜んでいることは、哲学的にも興味深い。

なお創発仮説では、超指数法則という階層法則も重視している。生命の情報パラドックスや、無秩序からの秩序の生成等を今後も研究していきたい。また物質代謝を切り離せない生命現象よりも、純粋に情報現象によって考察できる知能を対象とする方が、科学としての妥当性を示しやすいかとも考えている。

謝辞 懇切にご指導頂く上田院亮京都大学教授、研究にご協力頂く嶋正利氏に深甚の謝意を表す。

## 参考文献

- [1] Wolfram, S.: Statistical mechanics of cellular automata, *Reviews of Modern Physics*, Vol. 55, pp. 601-644 (1983).
- [2] Wolfram, S.: Universality and complexity in cellular automata, *Physica D*, Vol. 10, pp. 1-35 (1984).
- [3] Packard, N. H.: Adaptation toward the edge of chaos, *Complexity in Biological Modelling* (Kelso, S. and Shlesinger, M. (eds.)) (1988).
- [4] Kauffman, S. A.: *The Origins of Order*, Oxford University Press, New York (1993).
- [5] Langton, C. G.: Artificial life, *Artificial Life* (Langton, C. G. (ed.)), Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, pp. 1-47 (1989).
- [6] 稲垣耕作: 創発仮説とその考察 (1), 情処学研報, MPS-13-4 (1997).
- [7] 稲垣耕作: 創発仮説とその考察 (2), 情処学研報, MPS-15-7 (1997).
- [8] 稲垣耕作: 情報学と物理学: カオスの縁の計算万能性, 情処学人工生命とその応用シンポジウム, pp. 15-22 (1997).
- [9] Inagaki, K.: Elemental universality of sets of logic devices, *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, Vol. E81-D, No. 8, pp. 767-772 (1998).
- [10] 稲垣耕作: 創発仮説とカオスの縁の計算万能性, 信学論 (A), Vol. J81-A, No. 9 (1998, 印刷中).
- [11] Wolfram, S.: Twenty problems in the theory of cellular automata, *Physica Scripta*, Vol. T9, pp. 170-183 (1985).
- [12] Cayley, A.: A theorem on trees, *Quart. J. Math.*, Vol. 23, pp. 376-378 (1889).
- [13] Kaneko, K.: *Collapse of Tori and Genesis of Chaos in Dissipative Systems*, World Scientific, 1986.
- [14] Castets, V., Dulos, E., Boissonade, J., and De Kepper, P.: Experimental evidence of a sustained standing Turing-type nonequilibrium chemical pattern, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 64, pp. 2953-2956 (1990).