数理モデル化と問題解決 13－4
（1 9 9 7． 5． 1 5）

# 創発仮説とその考察 (1)

稲垣 耕作
京都大学大学院工学研究科情報工学専攻

**あらまし** Kauffmanがランダムネットワークの解析で発見した平方根の法則性は，複雑適応系の分野で代表的な仮説の一つである．本論文ではそれを知能の分野に拡張し，漸化形の超指数法則とした創発仮説を提案する．パターン認識やニューラルネットワークなどにおいて，この仮説が成り立つ可能性を検討する．また，Kauffmanのランダムネットワークにおいて秩序が発生するためには，計算万能性が必要条件であることを証明する．カオスの縁における計算万能性の存在は有名な仮説であり，本論文はKauffmanモデルにおいてそれを証明したことになる．

# The Emergence Hypothesis and Its Study (1)

Kosaku INAGAKI
Department of Information Science, Kyoto University

This paper proposes the "emergence hypothesis" which is an extension of the square-root law proposed by S.A.Kauffman in the area of theoretical biology as a fundamental theory of the evolution of life. The emergence hypothesis asserts the superexponential law which unifies the evolution of both life and intelligence. This paper studies the rightness of this hypothesis by investigating some properties of pattern recognition and the behavior of neural networks. This paper also proves that computational universality is a necessary condition for the crystalization of order in Kauffman's random networks. This result is a solution to the famous conjecture that computational universality exists in the edge of chaos.

## 1 まえがき

複雑系(complex system)がさまざまな学問分野を横断して話題を呼んでいる．しかし研究対象としては非常に困難な分野であり，大きな成果として得られているものはまだ少ない．

一言で複雑系と言っても，決定性カオスを対象とする複雑力学系(complex dynamical system, CDS)，サンタフェ研究所を中心とする複雑適応系(complex adaptive system, CAS)，コンピュータ分野等で研究されてきた複雑計算系(complex computational system, CCS)に大別できて，それらが相互に関連し合っているものと思われる．本論文で扱うのは，主としてCASに該当するテーマである．

複雑系の分野では，発表後10年以上を経過した研究が発掘されることが多い．Lorenz[1]のカオスは気象学分野で1961年に発見されたが，1972年ごろから広く知られるようになった．上田[2]のJapanese attractorも1961年に電気工学分野で発見され，1978年に世界で認められた．Kauffman[3],[4]のランダムネットワークの解析は理論生物学に関する1965年の研究であり，20年以上を経過して注目を集めた．複雑系の研究はさまざまな分野を横断しており，現在もまだ発掘作業が続いているものと思われる．

本論文で提案する創発仮説(emergence hypothesis)も，著者が1980年に気づき，1984年に発表した超指数階層(superexponential hierarchy)の仮説[5]を拡張したものである．超指数階層はパターン認識分野で発見した法則性であるが，Kauffmanの仮説とも符合し，それを拡張したものになっている．

CASの分野においては，いわゆるカオスの縁(edge of chaos)における創発(emergence)が大きな研究テーマとなっている．代表的な仮説には，Kauffmanによるランダムネットワークにおける$\sqrt{N}$の法則性[3],[4]と，Langton[6]によるセルラーオートマトンにおける$\lambda$-パラメータがある．Langtonの研究はWolfram[7]によって触発されたものである．Wolframはセルラーオートマトンを4分類し，カオスの縁と呼ばれるようになったクラス4を発見した．このクラス4のように，ランダムさの中から思いがけない構造や秩序が高い確率で発生する現象を，CASの分野では創発と呼んでいる．

理論生物学や人工生命に関連したCAS分野の予想では，カオスの縁が生命の発生した領域であると考えられている．またWolframは，Conwayが創案したライフゲーム(LIFE game)[8]との類推で，ここは計算万能性(computational universality)の領域であると予想を立てた．しかしセルラーオートマトンにおける計算万能性の一般的判定法の発見はまだ困難と思われ，現在も予想にとどまっている．

本論文の内容は大きく2つに分かれる．第1はKauffmanの$\sqrt{N}$仮説と著者の超指数階層仮説をつないだ仮説の提唱であり，それを創発仮説と呼ぶ．この仮説は生命と知能の発生と進化を統一的に見る立場のものであり，いわばCASにおける統一仮説の一つと位置付けられる．本

論文では，ニューラルネットワークにおいても，Kauffmanのネットワークにおけると同様の秩序の発生をみいだした．

本論文では第2に，Kauffmanのランダムネットワークのモデルにおいて，彼がいう秩序の結晶化という創発現象が起こるためには，計算万能性が必要条件であることを証明する．計算万能の必要性の証明には，論理関数系の万能性理論を用いる．これはPost[9]によって最初に研究され，わが国では伊吹ら[10]〜[11]の研究などがある．ランダムネットワークに適用できる理論としては，著者によるもの[12],[13]，野崎らによるもの[14],[15]がある．Kauffmanのモデルはランダムネットワークであるので，確率的な問題を勘案すると，生命や知能の発生や進化という創発現象が起こるためには，計算万能性は必要条件ではあるが，十分条件ではないことになる．

Kauffmanモデルにおいて計算万能性が証明できたので，生命の発生と進化が知能の発生と進化とつながっているという創発仮説を部分的に補強できたと考えている．またこの証明はWolframやLangtonなどによるCASの分野における最も有名な予想の一つを肯定的に解決した成果であると考えられる．

なお本論文の内容は，情報科学分野だけでなく，生物学分野，物理学分野，社会科学分野など複雑系の研究にかかわる多分野に密接に関連している．そのため，記述は厳密さを失わない範囲で努めて平易になるように心がけ，直観的にわかりやすい表現を行うようにした．

## 2 超指数法則とKauffmanモデル

Kauffmanは生物の細胞が遺伝子数の平方根程度の種類にしか分化しないことに注目した．JacobとMomod[16]による分子生物学の知見をもとに，彼は論理素子のランダムネットワークとして遺伝子の働きをモデル化した．

$N$個の素子からなる単位遅延の論理素子をランダムに結合した場合，その状態推移は通常$2^N$の大きさの状態空間をたどると考えられる．しかしKauffmanは各論理素子の入力線数を$K$に制限したところ，$K=2$の場合には，状態推移のサイクル長の期待値は，$2^N$のオーダではなく$\sqrt{N}$程度になるという一つの創発現象を発見した．$K$の値が大きくなるとともに，状態推移はカオス的となる．$K=2$の場合だけが特別であることは，DerridaとPomeau[17]も近似モデルで検討している．

$\sqrt{N}$という値は$2^N$に比べて劇的に小さなものである．Kauffmanはこの事実を細胞分化が遺伝子数の平方根程度の種類に押さえられる事実と類比した．彼のネットワークモデルは，彼が言うところの無秩序から秩序が結晶化する実例となっている．

著者はパターン認識分野において，Kauffmanと独立に超指数階層の仮説を提唱した．複雑な構造をもつ文書を画像として認識する際に，階層的な認識法が有効であり，各階層のデータ量の間には，

$$a_{n+1} = a_n^c \tag{1}$$

という漸化式が近似的に成り立つという仮説である．ここで定数$c$の典型的な値は2であり，そのときこの関係式を$a_n = \sqrt{a_{n+1}}$と見ることにより，Kauffmanの仮説と一致し，しかもその漸化形の拡張となっているものである．

$c=2$とした式で$a_0=2$とおいてみると，

$$a_n = 2^{2^n} \tag{2}$$

の関係が成り立つので，本論文では式(1)を超指数法則(superexponential law)と呼ぶことにする．

表1　新聞画像における超指数階層

| レベル | 新聞画像の処理対象数 | 理論値 | 実験値 |
|---|---|---|---|
| 1 | 記事数 | 6.8 | 6.1 |
| 2 | ブロック数 | $4.7\times10^1$ | $5.3\times10^1$ |
| 3 | symbolic mapの要素数 | $2.2\times10^3$ | $1.3\times10^3$ |
| | cell数 | | $5.1\times10^3$ |
| 4 | 画素数 | $5\times10^6$ | $5.2\times10^6$ |

この仮説がパターン認識実験において近似的に成り立っていることを，文献[5]の実験データを表1に引用することによって示す．対象としたのは，日本語の新聞紙面という複雑な構造をもった文書のパターン解析という応用である．紙面は白黒500万画素程度からなっており，A3判に相当するものである．ここで解像度は紙面の文章を判読できる程度の値として選んだので，表のレベル4の実験値はそれなりの妥当性をもっている．

表において，レベル1は記事の個数，レベル2はブロックと呼ぶ単位の個数である．1つの見出し，写真などが1ブロックであり，本文に関しては同一段で連続した並びを1ブロックとしている．レベル1とレベル2の個数は，新聞紙面から視認で確認できるものであり，処理の手法には依存しない．

レベル3のみはその値を決めかねている．認識の途中経過としてsymbolic mapやcellという表現を用いているが，パターン認識における有効度の高い手法は現在も確立されているものではないため，レベル3のみは試行錯誤的な処理の結果を示さざるをえない．しかし概略として理論値と一致しているものとみなせる．処理の手法が変わると，レベル3で検出される要素の個数は増減するはずであるが，おおむね超指数法則の仮説が成り立つものと考えられる．

知能という複雑で科学的に未知の部分が多い能力を，その進化と関連させて考えるには，生得的に近い知的能力に注目する必要があるはずである．したがってヒトのパターン認識能力という生得的な側面の強い問題を対象としたので，データとしては適当であったと考えている．

Kauffmanの仮説と著者の仮説は独立に提唱されたものである．しかしこの2つの仮説が共通性をもっているという事実には，CASの分野において両仮説を強化する効果があるとみなせるであろう．あるいは両仮説を統合するという試みに道を開くとも考えられるであろう．もちろんこれらの仮説の一方あるいは両方が妥当でないこともあるわけだが，CASの分野において検討に値する問題であると思われる．

## 3 創発仮説

Kauffmanの仮説と超指数階層の仮説を統合することにより，一つの新しい仮説を提唱する．それをここでは創発仮説と呼ぶことにする．後述する結果と合わせて，この仮説では計算万能性にも言及する．

**[創発仮説]**(Emergence Hypothesis)

1. 生命と知能の発生と進化には，共通の法則に基づく創発現象が伴う．
2. 生命と知能の発生と進化には，超指数法則という階層性が存在する．
3. 生命と知能の発生と進化には，計算万能性が必要条件であるが，十分条件ではない．

これは非常に根源的な問題に関する仮説であり，このような仮説の全体が成り立つことを実証するのは現在の科学ではまだ困難である．部分的に演繹的な方法を適用しながらも，帰納的に成立の可能性を高めていくしかない．ただ仮説の提出が科学の重要な方法の一つであることもまた明らかであり，わが国からも積極的に提案してみるべきであると信じている．以後では分子生物学，知能，計算万能性の分野から，この仮説を強化するいくつかの証拠を指摘する．

まず分子生物学におけるデータの片鱗を述べる．Kauffmanは遺伝子数と細胞分化の関係から，平方根の法則性を指摘した．しかし分子生物学のレベルにおいて，単に1段階の平方根法則が成り立つのではなく，漸化形の超指数法則が成り立っている可能性がある．

図1に示すのは，文献[18]における哺乳類までのゲノムサイズと遺伝子数の関係を両対数のグラフに示したものである．遺伝子数は現在はまだ厳密に数えられているわけでなく，値は推測値であるが，図においてこれらの関係を傾き1/2の直線で近似できるなら，ゲノムサイズと遺伝子数の間にも平方根の法則が近似的に成り立っていることになる．最小2乗法で計算すると，図の直線の傾きは約0.44であり，この仮説を支持するものと思われる．

ゲノムサイズと遺伝子数の関係には，分子生物学の分野ではC値パラドックスという有名な問題点がある．イモリのゲノムサイズがヒトよりも大きいといった問題点である．しかしながら広範囲の生物を見たときには，図に示す傾向が支配的である．

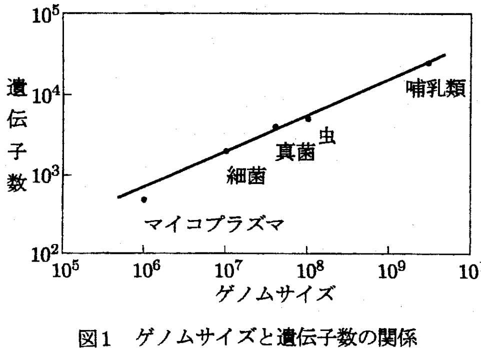



図1 ゲノムサイズと遺伝子数の関係

Kauffmanの指摘した遺伝子数と細胞分化の関係を，図1のデータと合わせると，ゲノムサイズ，遺伝子数，細胞分化の間には，超指数法則が現れている．すなわち超指数法則はパターン認識能力においてだけでなく，生命の発生と進化にも介在している可能性を示唆している．

ヒトの知能において，超指数法則が成り立つことを調べるには，ヒトの知能がもっている生得的な能力を調べるべきであると指摘した．後天的に獲得した計算アルゴリズムなどは，かならずしも自然界における知能の進化を明確に反映するものでない可能性が高い．

また生物の脳を調べたり，ニューラルネットワークでのシミュレーションを行うのが仮説の検証に有効であると考える．ここでは創発仮説を強化する次の証拠として，ニューラルネットワークの初期的な実験について述べる．

Kauffmanのランダムネットワークでは，2入力素子の場合にのみ秩序が現れ，入力線数が増加するとともにネットワークの動作はカオス的となった．彼の言う秩序とは，状態サイクルの長さの期待値や状態サイクル数などが$\sqrt{N}$程度になり，ネットワークの初期値を少しだけ変化させたときにも，収束する状態サイクルが不変であることが多いという意味である．

ニューラルネットワークの場合には，ニューロンは多入力のしきい値素子でモデル化されるので，通常はKauffmanのモデルと同様の秩序は発生しないと予想されよう．しかし実際にはKauffmanのモデルと似た現象が発生する．

$x_1, x_2, \cdots, x_n$という$n$個の入力をもつニューロンの出力を，$\sum_{i=1}^{n} w_i x_i > \theta$のとき1，それ以外のとき0とする．ニューロンの入出力の値は0か1をとるとする．各入力の重み$w_i$の値は$-1$から1までの一様分布をするものとする．

$N$個のニューロンをランダムに接続したネットワークを考える．各ニューロンの入力線数を$\sqrt{N}$とする．このようなネットワークの各ニューロンに，0と1の初期値を等確率でランダムに与えたとき，ネットワークの状態推移の様子は各ニューロンのしきい値$\theta$をどのように与えるかによって変化する．

1. すべてのニューロンのしきい値$\theta$を0に設定すると，ネットワークの状態推移はカオス的になる．
2. しきい値$\theta$を$-\sqrt{N}$から$\sqrt{N}$までの一様分布として各ニューロンにランダムに割り当てると，ネットワークの状態推移はすみやかに終了して，ネットワーク全体が静止的になる．
3. しきい値$\theta$の分布をその中間に設定すると，Kauffmanのネットワークと同様にサイクル長$\sqrt{N}$程度の状態推移を起こす分布がある．400素子以下の実験では，しきい値を$-\sqrt{N}/C$から$\sqrt{N}/C$までの一様分布として割り当てたとき，$C$ =4〜8程度でこのような状態サイクルが発生する．

Kauffmanのネットワークと同様の状態推移を起こすのは，どのようなしきい値の分布のときかは，実験的にも理論的にもさらに詳細な検討に値する．注目すべきは，ニューラルネットワークは非常にカオス的になりにくい傾向にあることである．たとえ各素子の入力線数が$N$であったとしても，秩序が発生する$\theta$が存在して，状態サイクル長の様子はKauffmanのネットワークのものによく似ている．

ヒトの脳細胞は$10^{10}$〜$10^{11}$個程度あるといわれるが，ヒトが記憶できる項目数に注目したとき，それが$10^5$項目程度に限定されていて，辞書などの項目数もこの程度に押さえられている事実は興味深い．脳細胞数の平方根程度になっているのである．記憶能力はヒトの知能として生得的であるので，このような記憶容量も創発仮説との関連を予感させるものである．

## 4 Kauffmanネットワークにおける計算万能性

もしも計算万能性が生命の発生と進化に関係しているならば，それも生命の発生と進化を知能の発生と進化に結びつける創発仮説の有力な証拠の一つになろう．知能には計算万能性という性質がふさわしいからである．生命が発生するカオスの縁に計算万能性が存在することは，WolframやLangtonなどCASの分野で予想する研究者が多かった．しかし彼らが扱ったセルラーオートマトンでは，計算万能性の一般的証明はかなり困難であろうと推測される．そこでここではKauffmanのランダムネットワークのモデルで，計算万能性の議論を行う．

計算万能性を示すには，これまでは万能チューリング機械を作るという方針をとることが多かった．一方ここでは論理関数系の万能性(universality)あるいは完全性(completeness)と呼ばれる性質に注目して，Kauffmanネットワークで平方根の法則が成り立つためには計算万能性が必要であることを示す．

論理関数系の万能性とは，論理素子の集合が与えられたときに，それらによって任意の論理関数を実現できるかを考える問題である．たとえば{AND, OR, NOT}という論理素子の集合は万能であって，これらの素子を重複利用することによって任意の論理関数を実現できる．またたとえば{AND, NOT}という集合や{NAND}という集合も万能である．

一方，{AND}という集合は万能ではない．AND素子のみを用いてランダムネットワークを構成したとき，典型的な結果としては$(0,0,\cdots,0)$という静止状態に収束する．また{XOR}(排他的論理和) も万能ではなく，ランダムネットワークの典型的なふるまいはカオス的である．

論理関数系の万能性を議論するには，以下の関数集合が必要になる．ここで$M_3$〜$M_6$は通常の論理関数理論分野で定義されている概念どおりである．

$M_1 = \{f | f(1,1,\cdots,1) = 1\}$
$M_2 = \{f | f(0,0,\cdots,0) = 0\}$
$M_3$ =自己双対関数全体の集合
$M_4$ =線形関数全体の集合
$M_5$ =単調非減少関数全体の集合
$M_6$ =単調非増加関数全体の集合
$M_7 = \{f | f(1,\cdots,1) = 0, f(0,\cdots,0) = 1\}$

論理関数系の万能性理論はPost[9]によって作られ，伊吹ら[10]が独立に再発見した．彼らの基本定理は次のように表現される．これは素子の遅延時間を考慮しない条件である．

**[定理1]**(論理関数系の万能性)

論理関数の集合$F$が万能であるためには，$F$が$M_1$〜$M_5$の5つの関数集合のどれにも含まれないことが必要十分である．

この定理の下では，{NAND}という集合は万能である．しかしながらランダムネットワークにおいて，すべての素子を単位遅延のある2入力NANDとしてみると，ネットワークの典型的な状態推移は$(1,1,\cdots,1)$と$(0,0,\cdots,0)$を交互に繰り返すものとなり，サイクル長が2になる．

文献[11]では論理素子が単位遅延をもつ場合に拡張した万能性の条件が示されている．この条件を$t_7$-万能性と呼ぶことにする．この万能性を直観的にいうと，入力の変化に対して出力が同一遅延時間の後に得られる回路を構成できるという意味での万能性である．

**[定理2]**($t_7$-万能性)

論理関数の集合$F$が$t_7$-万能であるためには，$F$が$M_1$〜$M_7$の7つの関数集合のどれにも含まれないことが必要十分である．

定理2の下では，単位遅延をもつ{NAND}は万能でないことになる．$t_7$-万能性は最も厳しい万能性条件である．ランダムネットワークでの実験では，一般にはこの条件を満たす論理素子集合から等確率でランダムに素子を選べば，回路はKauffmanの意味で秩序を発生する．

$t_7$-万能でない場合には，回路が静止したりカオス的になったりするが，それでも時にはKauffmanのいうような秩序を発生することがある．計算万能性との関連は，論理関数系の万能性の理論をさらに詳しく見る必要がある．

論理関数系の万能性に関しては，種々の拡張が行われてきた．著者[12],[13]は論理素子が単位遅延をもつ場合に，フィードバックループを含む回路の万能性へと初めて拡張した．その結果，{NAND}は$t_7$-万能でないが，出力変化の時刻に1単位時間のゆらぎを許すという仮定の下では万能であり，任意の論理関数を実現する順序回路を構成できることを証明した(弱$t$-万能性)．この構成法は特殊であり，ランダムネットワークがその構成法どおりになる確率はごく低く，したがってランダムネットワークではKauffmanのモデルのような秩序がほとんど発生しない．

遅延のある論理素子を用い，フィードバックループを含む回路を構成する理論は，野崎ら[14],[15]によっても拡張

されてきた．文献[15]におけるGS-完全性をもとにして，単位遅延をもつ素子の最も基本的な万能性を考えることができる．これを基本万能性(elemental universality)と呼ぶ．基本万能性の概念を直観的に述べると，フィードバックループを含む回路で，単位遅延をもつ各素子の初期値を適当に設定して，出力変化の時刻に1単位時間のゆらぎを許して，任意の順序回路を構成できるという最も緩い万能性の条件である．

**[定理3]**(基本万能性)

論理関数の集合$F$が基本万能性をもつためには，$F$が$M_4, M_5$という2つの関数集合のどれにも含まれないことが必要十分である．

Kauffmanのネットワークの場合には，フィードバックループを許し，かつ初期値を適当に設定し，また各素子は単位遅延としている．したがってこの基本万能性の条件の下で計算万能性を検討することができる．すなわち基本万能性が必要条件であることになれば，彼のいう秩序の発生に計算万能性が必要だと示せたことになる．

Kauffmanのネットワークでは，秩序が生まれるのは入力数$K$が2の場合であるので，表2に2変数の論理関数のすべてを与える．このうちで$M_4$と$M_5$に含まれるものなどをマークで示した．真に2変数関数でないものはすべてこれらに含まれる．基本万能性をもたない場合のシミュレーションを行うと以下のようになる．真に1変数以下の関数を用いた場合は，ネットワークが意味のある動作をしないので，ここでは真に2変数の関数のみを対象にして述べる．1変数関数の場合には，たとえば単位遅延素子をランダムに接続した場合，状態サイクルは現れるが，状態サイクルへの収束状況や状態サイクルの数に関して創発的な現象は生じない．

1. $M_4$に含まれる関数のみを実現する論理素子の集合を用いると，回路の典型的な状態推移はカオス的になる．線形関数の合成はまた線形関数であり，どの入力が変化してもかならず出力を反転させるからである．
2. $M_5$に含まれる関数のみを実現する論理素子の集合を用いると，回路の典型的な状態推移は静止状態に収束する．関数が0と1を発生する確率によって，0が非常に多ければ$(0, 0, \cdots, 0)$に収束するなどになる．0と1が等確率に近づくと，状態推移サイクルに入る確率があるが，サイクル長の期待値は$\sqrt{N}$よりずっと短く，創発と呼べるような現象は起こらない．

表2において，これら以外の関数はすべて基本万能性をもつ．基本万能性という条件によって任意の順序回路を構成できるという証明の骨子の部分だけを述べる．双対性と変数の順序交換を考慮すると，表2において代表的な論理関数系は{NAND}と$\{x\bar{y}\}$の2種となる．このうち{NAND}で可能なことはすでに証明されているので，$\{x\bar{y}\}$だけを考える．図2の構成により，素子の初期値を適当に設定しておけば，1単位時間の遅延素子と2単位時間の遅延のNORを作れる．したがって回路中に遅延素子を適当に挿入することにより，入力変化から出力確定まで同一の遅延時間となるようにして任意の順序回路を構成することができる．

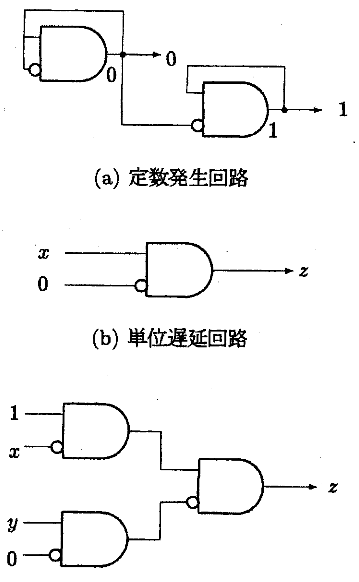
これによって次のことがわかる．基本万能性の条件を満たさなければ，$K = 2$のランダムネットワークにはけっして$\sqrt{N}$の秩序は現れない．したがって計算万能性は秩序の発生にとって必要条件である．一方，基本万能性の条件を満たせば，単位遅延をもつ論理素子の集合は工学的には任意の順序回路(万能チューリング機械を含む)を構成できる．しかし基本万能性をもつ論理素子集合には，回路構成法に制限の強いものが存在するので，確率的な秩序の発生には回路構成を行いやすい論理素子集合が格段に有利である．

実際，たとえば{NAND, NOR}という論理素子集合を使った場合には，{NAND}の場合ほど極端な状態サイクルにはならない．周期2の場合が多いが，静止する場合や，時には$\sqrt{N}$に近い状態サイクルになる場合も存在する．

またKauffmanは秩序が頻繁に発生するためには，素子の出力値0と1の確率が等しいことが重要だと考えた．しかしたとえば{NAND, AND}と{NAND, OR}はいずれも$t_7$-万能であって，一方は出力値の確率に偏りがなく，他方は1の側に偏っているものの，これらの集合のどちらでネットワークを構成しても，その状態サイクル長はよく似ている．すなわち出力値の確率の影響よりも，計算万能性の方がより大きな役割を果たしていると思われる．

表2　2変数論理関数における基本万能性

| $x$ | $y$ | $f_0$ | $f_1$ | $f_2$ | $f_3$ | $f_4$ | $f_5$ | $f_6$ | $f_7$ | $f_8$ | $f_9$ | $f_{10}$ | $f_{11}$ | $f_{12}$ | $f_{13}$ | $f_{14}$ | $f_{15}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $M_4$ | | √ | | | √ | | √ | √ | | | √ | √ | | √ | | | √ |
| $M_5$ | | √ | | | | | | | | √ | | √ | | √ | | √ | √ |
| 真に2変数 | | | √ | √ | | √ | | √ | √ | √ | √ | | √ | | √ | √ | |
| 基本万能性 | | | √ | √ | | √ | | | √ | | | | √ | | √ | | |




(a) 定数発生回路

(b) 単位遅延回路

(c) NOR回路

図2　$\{x\bar{y}\}$の基本万能性

**[定理4]**

素子数$N$，各素子の入力線数$K=2$である単位遅延のある論理素子からなるランダムネットワークにおいて，Kauffmanのいう秩序が高い確率で発生するためには，基本万能性という計算万能性が必要条件である．しかし十分条件ではない．

なお$t_7$-万能性が十分条件かという問題に関しては，本論文では証明を略すが，フィードバックのある論理回路には特殊な性質が存在する．$t_7$-万能であって，人工的にどんな順序回路でも構成できる素子の組でありながら，実は素子の選び方がランダムだが等確率でないときに相当するので，創発現象をほとんど起こしがたいものを示すことができる．$t_7$-万能であっても，計算万能性の十分性は主張できず，創発現象には確率的な発生のしやすさが必要になるのである．

Kauffmanのネットワークが生命の発生モデルと仮定するなら，任意の論理が実現できるという意味での計算万能である確率がより高い反応であるからこそ，生命の元となる物質は発生してきたと考えるべきことになる．工学的にいわゆる人工生命を創造する場合には，確率に頼る必要がなければ特殊な構成方法をとることができ，自然界にありえなかった生命(life-as-it-couldn't-be)まで創造できる可能性をもつことになる．

Kauffmanモデルの妥当性が肯定されるならば，生命の発生と進化には計算万能性が伴っていることが結論される．これはいわゆるカオスの縁における計算万能性の存在というWolframやLangtonなどによるCASの分野の重要な予想と一致する．また生命の発生と進化に計算万能性が伴うなら，その延長上で知能が発生する可能性が高いことになり，生命と知能の発生と進化を統合しようとする創発仮説の妥当性を示す証拠の一つと考えられる．

WolframやLangtonによるセルラーオートマトンのモデルとKauffmanのモデルは同一ではない．セルラーオートマトンのモデルは人工的で制限の強いものであり，Kauffmanのモデルの方が生命の発生に関して現実との対応が強いと思われる．したがって計算万能性の存在という予想に関しては，Kauffmanモデルでの証明の方が重要と思われる．

## 5　あとがき

本論文では，生命と知能の発生と進化が超指数法則に従うという創発仮説を提案した．これはKauffmanが1965年に発見した仮説と，著者が1980年に気づき，1984年に発表した仮説を結びつけたものであり，CAS分野の一つの統一仮説として提案を試みたものである．また著者は超指数法則がかなり広範囲の現象に適用できるものと予想しており，情報がかかわるさまざまな現象の新しい基礎理論の一つとして発展できるものと考えている．

創発仮説の証拠となるいくつかの検討を行った．分子生物学的なデータの片鱗やニューラルネットワークにおいてKauffmanのランダムネットワークと似たふるまいをすることを示した．また論理素子集合の基本万能性を考えることにより，Kauffmanのネットワークにおいて秩序が発生するためには，計算万能性が必要条件であることを示し，いわゆるカオスの縁におけるWolframやLangtonなどの予想に対して一つの解答を与えた．

今後は創発仮説の多面的な検証をさらに進める必要がある．生得的な知能としては美を感じる感性なども含まれると考えている．モデルによっては符号化のために$\log N$程度の修正が必要になるかもしれないが，創発仮説が成り立つ可能性が高いと考えている．またニューラルネットワークなどの解析をさらに進めて，現在のコンピュータを超える素子である「進化チップ」の研究につなげていきたい．

生命と知能の発生と進化を考える研究は，科学の倫理を無視して進められるものではない．複雑系の科学は21世紀に向けて新たな科学の領域を開拓しつつあると信じるが，倫理や哲学や文明や政策などを対象とする分野との連携した研究が必要になっているはずである．

なお著者の1984年の論文[5]では技術革新においても超指数法則が成り立つ可能性に言及しており，著者は創発仮説が社会や産業経済などにも反映されるという立場を取っている．これはサンタフェ研究所の立場とも近いものである．生命と知能を結ぶ仮説の延長上で，複雑系経済学などの研究が重要と考えている．

**謝辞**　お励ましいただいた故児玉信次郎氏，お世話になっている広中平祐氏，研究にご協力いただく嶋正利氏に深甚の謝意を表する．本研究には中山隼雄科学技術文化財団の助成を受けた．

## 参考文献


[1] E.D.Lorenz, "Deterministic Nonperiodic Flow," J. Atomospheric Sciences, vol.20, pp.130-141, March 1963.

[2] 林千博, 上田睆亮, 赤松則男, 板倉秀清, "周期的外力を加えた自励振動系の動作," 信学論(A), vol.53-A, no.3, pp.150-158, March 1970.

[3] S.A.Kauffman, "Cellular Homeostasis, Epigenesis and Replication in Randomly Aggregated Macromolecular Systems," J. Cybernetics, vol.1, no.1, pp.71-96, 1971.

[4] S.A.Kauffman, "The Origins of Order," Oxford University Press, 1993.

[5] K.Inagaki, et al., "MACSYM: A Hierarchical Parallel Image Processing System for Event-Driven Pattern Understanding of Documents," Pattern Recognition, vol.17, no.1, pp.85-108, 1984.

[6] C.G.Langton, "Life at the Edge of Chaos," in C.G.Langton, et al.(eds), "Artificial Life II," Addison-Wesley, 1992.

[7] S.Wolfram, "Universality and Complexity in Cellular Automata," Physica, vol.10D, pp.1-35, 1984.

[8] E.R.Berlekamp, J.H.Conway, and R.K.Guy, "Winning Ways for Your Mathematical Plays," Academic Press, 1982.

[9] E.L.Post, "The Two-Valued Iterative Systems of Mathematical Logic," Annals of Mathematics Studies, vol.5, Princeton University Press, 1941.

[10] 伊吹公夫, 苗村憲司, 野崎昭弘, "万能論理関数系の一般論," 信学誌, vol.46, no.7, pp.934-940, July 1963.

[11] 伊吹公夫, "万能性を有する論理回路の研究," 通研成果報告, no.3747, March 1968.

[12] 稲垣耕作, "遅延のある論理素子集合の万能性について," 信学会オートマトンと言語研究会資料, AL73-66, Jan. 1974.

[13] 稲垣耕作, "遅延のある論理素子集合の弱$t$-完全性," 信学論(D), vol.63-D, no.10, pp.835-842, Oct. 1980.

[14] 野崎昭弘, "論理素子集合の順序回路に基づく完全性," 信学論(D), vol.J65-D, no.2, pp.171-178, Feb. 1982.

[15] H.Sato, A.Nozaki, and G.Pogosyan, "Completeness of Logical Functions Realized by Asynchronous Sequential Circuits," J. Information Processing, vol.14, no.2, pp.164-171, 1991.

[16] F.Jacob and J.Monod, "21st Symp. Soc. Study of Development and Growth," Academic Press, 1963.

[17] B.Derrida and Y.Pomeau, "Random Networks of Automata: A Simple Annealed Approximation," Europhysics Letters, vol.1, no.2, pp.45-49, Jan. 1986.

[18] B.Lewin著, 菊池, 榊他訳, "遺伝子　第5版," 東京化学同人, 1996.