

外乱によって自己組織化するセルオートマトンの進化的探索

岩瀬 雄祐^{†1} 鈴木 麗璽^{†1} 有田 隆也^{†1}

セルオートマトンは、局所的な相互作用から生じる大域的な振る舞いを解析するための抽象モデルの1つとして知られ、その基本特性について理解されてきた。しかし、外界との相互作用を考慮したセルオートマトンの振る舞いについては、十分議論されていなかった。そこで、外界との相互作用によって自己組織的な挙動を示すセルオートマトンにおける特性の理解と応用の可能性を探るべく、外乱による局所的な状態の改変をきっかけに、セルの状態種別の分布で表される大域的な状態を切り替える問題を設定し、その遷移規則を遺伝的アルゴリズムによって探索した。その結果、外乱の蓄積が一定量を超えるとその影響が系全体に広まる自己組織的な性質によって、セルの状態数以上の大域的な安定状態を周期的に推移する系が得られた。

Evolutionary Search for Cellular Automata that Exhibit Self-Organizing Properties Induced by Disturbance

YUSUKE IWASE,^{†1} REIJI SUZUKI^{†1} and TAKAYA ARITA^{†1}

This paper aims at understanding emergent properties of Cellular automata (CAs) induced by external disturbances. We assumed a task in which a CA has to change its global state distinguished by the distribution ratio of cell states after every occurrence of disturbance period. Each cell state was modified by using an external rule with a small probability during the period. By conducting an evolutionary search for rules of CA that can solve this task, we got the rules for CA in which global state cyclically switched between different stable states, and interestingly, the number of stable states was more than that of distinct states of cells. Detailed analyses showed that such behavior was due to its self-organizing feature that a drastic change in its global state occurs every when the accumulation of the disturbed cells goes beyond a certain threshold.

1. はじめに

セルオートマトンは、空間を格子点で分割し、各点に有限オートマトンであるセルを置くことで構成される抽象系である。その動作は、セル同士の局所的な相互作用によって生じるため、局所的な相互作用から生じる大域的な振る舞いを理解するためのモデルの1つとして知られる。

セルオートマトンの基本的な性質に関する多くの研究は、規則的な配置のセル空間において、遷移規則のみに基づく同期したセルの更新といった強い制約の下で議論されている。Wolfram は、1次元2状態3近傍のセルオートマトンの挙動を詳細に解析し、4つのクラスに分けることを提案した。特に、複雑な振る舞いを示すクラスでは、計算万能性をもつ規則の存在が示されている¹⁾。

一方、より現実性を求め、これらの制約を緩めた系について、様々な視点から解析されている。Ingersonらは、セルオートマトンを実世界に存在する系のモデルと見なしたとき、セルの状態遷移における同期性が不自然であると考え、非同期なセルの更新手法を用いて前述のWolframと同様の解析を行い、非同期特有の規則的なパターンが発生することを報告している²⁾。

また、境界条件やノイズに代表される、外界からの影響についても研究されている。蜷川らは、境界条件が系へ与える影響に注目し、セル空間の境界において、ステップ毎にランダムなセルの状態を与える散逸境界条件を用いることで、周期境界条件によって生じていた、セル数の違いによって系の振る舞いが変わる性質が解消されることを示している³⁾。一方、Marrらは、セルの状態遷移において、近傍のセルの値を参照する際に生じるノイズと、セル同士の近傍関係を示すネットワークの張り替えがもたらす系への影響が、カオスを示すセルオートマトンにおいて、機能的に等価である事例を示している⁴⁾。

^{†1} 名古屋大学 大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nagoya University

その中でも、Roliらは、自律分散系における外界からの影響に注目し、非同期セルオートマトンを用いて、外乱の定常的な発生によって大域的なパターンがはじめて生じるセルオートマトンについて論じている⁵⁾。彼らは、非同期セルオートマトンを、局所的に相互作用する自律的な個体集団の抽象モデルと見なし、各セルにおいて確率的に生じる、遷移規則とは異なる状態遷移である外乱を、外界からの影響として導入した。この系は、散逸セルオートマトン (Dissipative Cellular Automata) と呼ばれ、いくつかの遷移規則において、小さな確率で生じる外乱による大域的な安定状態 (ストライプ等) の出現が示されている。さらに、彼らは、このような自律分散系が持つ外界からの影響による自己組織的な性質を、系の外界からの制御へ応用することについても論じている⁶⁾。例えば、系の一部のみを外界から制御可能な場合を想定し、一部のセルの状態を一定のパターンに設定すると、そのパターンが全体に及ぶことで、系全体の状態を切り替えられることを示している。ただし、彼らの議論では、いくつかの手設計の遷移規則によるセルオートマトンを例示したのみで、外界との相互作用と系の自己組織的な性質との関係について、さらなる議論の余地があるといえる。

しかし、多くの場合、セルオートマトンは、単純なセルの挙動に対して、複雑な系の振る舞いを予測することが困難であるため、直接、遷移規則から設計することが難しい。そこで、遺伝的アルゴリズムを用いた遷移規則の探索に基づく、セルオートマトンの解析的な研究がなされている⁷⁾。Rochaは、密度分類問題において、系が問題を解く際の情報処理に注目して解析し、進化で得られたセルオートマトンが示す局所的な情報の記憶や操作の過程について論じている⁸⁾。また、近年、Ninagawaは、セルオートマトンにおいて、系の状態をスペクトル解析することで判明する $1/f$ ゆらぎと計算万能性との関係を明らかにするため、ライフゲームが計算万能性を持つと同時に $1/f$ ゆらぎを示すことを念頭において、 $1/f$ ゆらぎを示すセルオートマトンを探索し、ライフゲームに類似したグライダーが存在する系を得た。この系が計算万能性を持つならば、先の関係を支持する証拠に成り得ると述べられている⁹⁾。以上から、外界との相互作用によって自己組織化するセルオートマトンにおいても、進化的手法を用いた解の探索と解析は、系の持つ特性の理解に有用であると考えられる。

上記を踏まえて、本研究では、外界との相互作用によって自己組織化するセルオートマトンの特性を理解し、応用の可能性を探ることを目的とする。本稿では、

その最初の段階として、間隔をあけて生じる外乱による局所的な状態の改変をきっかけに、セルの状態種別の分布で表される大域的な状態を切り替える問題を設定し、遺伝的アルゴリズムによる探索によって得られた、セルの状態数以上の大域的な安定状態を周期的に推移するセルオートマトンについて、その自己組織的な性質を検証する。

2. 問題設定

本研究では、外乱によって自己組織的な振る舞いを示すセルオートマトンを遺伝的アルゴリズムで探索する際の問題として、以下に概要を述べるタスクを採用する。

2次元3状態9近傍の非同期セルオートマトンを用いる。系は、初期状態から評価の対象となる遷移規則に従い確率的に状態遷移する。その間、通常の状態遷移とは異なる状態遷移である外乱が、時間間隔を置いて複数回発生する。このとき、各外乱が発生した後、一定の遷移を経て系が到達した大域的な状態 (各セルの状態の密度) を計測し、それらの差異が大きいものを高く評価する。すなわち、この問題は、外乱の発生をトリガとして、系全体の状態をより異なる状態に切り替える遷移規則を求める問題と見なせる。

大域的な状態の計測回数がセルの取り得る状態数以下の場合には、“計測時にはすべてのセルが同一の状態に収束した状態になるが、各計測時では収束する状態の種類が異なる”という単純な挙動を示す遷移規則が最適解の一つである事は自明である。しかし、前者が後者より大きい場合は、計測時のいずれかにおいて、複数種類のセルの状態から成る中間的な密度の組み合わせを安定してとることが必要であると言える。複雑な密度の組み合わせをもたらす構造が外乱をきっかけに安定して出現と消滅を繰り返すことが必要となることから、セルオートマトンの自己組織的な性質をうまく利用した複雑な遷移規則が創発するかどうか、そして創発する場合には、それがいかなるものかが研究の焦点である。

以下、状態遷移の方法と外乱の加え方、評価方法について、それぞれ詳細に述べる。

2.1 セルオートマトンと外乱

2次元 M 状態9近傍非同期セルオートマトンを考える。向かい合う境界を連絡する周期境界条件を適用した $N \times N$ 正方格子状のセル空間を用い、セル (i, j) を中心とした 3×3 の正方形の範囲を、セルの近傍 (μ -近傍, $neighborhood_{i,j}$) とする。時刻 t における各セル (i, j) は、現在の状態として $q_{i,j}^t$ を持ち、

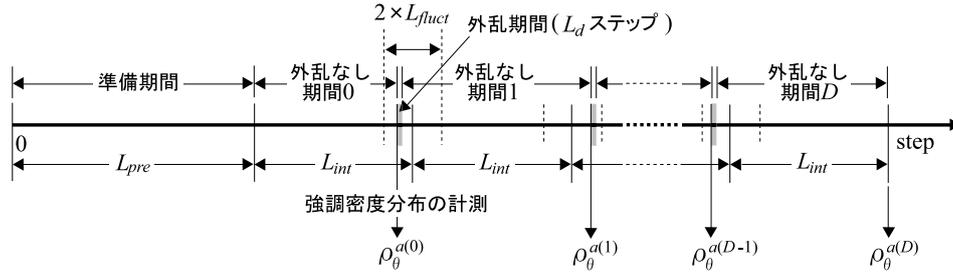


図 1 セルオートマトンの遷移と外乱

Fig. 1 Transition of cellular automata and disturbance

確率 P_a ($\in [0, 1]$) により、近傍の状態 ($S_{i,j}^t$) を参照し、遷移規則 (δ) に基づいて、状態遷移する (式 (1)). セル空間を構成する全セルの状態集合を様相と呼ぶ.

$$q_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} \delta(S_{i,j}^t) & (P_a) \\ q_{i,j}^t & (1 - P_a) \end{cases} \quad (1)$$

本研究では、セルオートマトンに、外乱として、遷移規則 (δ) とは異なる別の状態遷移 (ϵ) を導入する. 外乱 (ϵ) は、式 (2) により、自身の状態のみに依存し、正順 (値を 1 増やす) 方向へ遷移するものとして定義し、各セルへ、確率 P_e ($\in [0, 1]$) で加えられる.

$$\epsilon : q_{i,j}^{t+1} := (q_{i,j}^t + 1) \bmod M \quad (2)$$

以上のような、状態遷移、及びそれに引き続く外乱の付加を 1 ステップとする.

2.2 評価

セルオートマトンの遷移過程において D (≥ 0) 回の外乱を加える. 図 1 は、時間経過に伴って外乱が生じる過程を模式的に示したものである. 同図が示すように、初期状態から準備期間を経て、ほぼ一定の間隔を置いて D 回の外乱期間が生じる状況を設定する. 遷移を開始して、しばらくは準備期間 (L_{pre} ステップ) とし、評価に用いない. 準備期間の後、ほぼ L_{int} ステップの間隔を置いて外乱を加え始めるまでの期間を外乱なし期間とする. その後、 L_d ステップに渡って外乱が発生する期間を外乱期間とする. 準備期間と外乱なし期間では外乱を加えず ($P_e = 0$), 外乱期間のみ外乱を加える ($P_e = \beta$). 以降、外乱なし期間と外乱期間を交互に $D - 1$ 回繰り返し、外乱なし期間で遷移を終える. 個々の外乱期間は、一定の間隔 (L_{int} ステップ) を基準として、特定の範囲 ($\pm L_{fluct}$ ステップ) 内においてランダムな時間に開始するため、発生周期が乱れる.

ここで、時刻 t におけるセルの各状態 (s) の全セル数に対する割合をベクトルで表したものを様相の密度分布 (ρ^t) と定義する (式 (3)).

$$\rho^t(s) = \frac{1}{N \times N} \sum_{(i,j) \in N \times N} \begin{cases} 1 & \text{if } q_{i,j}^t = s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases},$$

$$\rho^t = \{\rho^t(0), \rho^t(1), \dots, \rho^t(M-1)\}. \quad (3)$$

さらに、各状態の微小な量の存在を強調するため、小さな閾値 (θ) による、シグモイド関数 (SF_θ) を適用し、それらを要素とする強調密度分布 (ρ_θ^t) を定義する (式 (4)).

$$SF_\theta(x) = \frac{1}{1 + e^{-(x-\theta) \times \varphi}},$$

$$\rho_\theta^t(s) = SF_\theta(\rho^t(s)),$$

$$\rho_\theta^t = \{\rho_\theta^t(0), \rho_\theta^t(1), \dots, \rho_\theta^t(M-1)\}. \quad (4)$$

ただし、 φ は密度を強調する度合を表すパラメタである. 式 (4) において、密度が閾値 (θ) より大きいならば、 ρ_θ^t は 1 に近づき、さもなければ、 ρ_θ^t は 0 に近づく.

外乱の前後、各 $D + 1$ 個の外乱なし期間における最終ステップ (それぞれ時刻 $a(0), a(1), \dots, a(D)$ とする) の様相は、その期間の到達値であり、各期間について、その強調密度分布 ($\rho_\theta^{a(0)}, \rho_\theta^{a(1)}, \dots, \rho_\theta^{a(D)}$) が得られる. そこで、これらの強調密度分布を指標として、複数の異なる大域的な状態の出現を評価する. 具体的には、強調密度分布間の差を、式 (5) が表すように、各要素の差の絶対値の総和と定義し、式 (6) のように強調密度分布のすべての組み合わせにおける差の総和を求め、適応度 f とする.

$$|\rho_\theta^i - \rho_\theta^j| = |\rho_\theta^i(0) - \rho_\theta^j(0)| + |\rho_\theta^i(1) - \rho_\theta^j(1)| + \dots + |\rho_\theta^i(M-1) - \rho_\theta^j(M-1)| \quad (5)$$

$$f = \sum_{i \neq j \in \{a(0), a(1), \dots, a(D)\}} |\rho_\theta^i - \rho_\theta^j| \quad (6)$$

3. 遺伝的アルゴリズムによる探索

3.1 遷移規則

本研究では、より興味深い遷移規則の発生と探索空間の圧縮を狙い、前節の問題を解くセルオートマトン

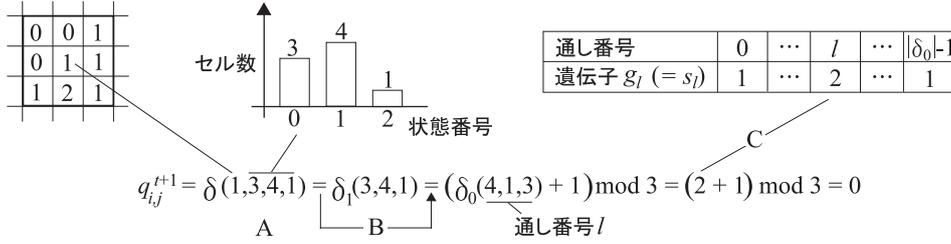


図 2 遷移規則の概念

Fig. 2 The concept of transition rule

の遷移規則を次のように記述し、遺伝的アルゴリズムで探索する。遷移規則 (δ) は、近傍における各状態の頻度に基づくもので、さらにセルの状態に関する対称性を加えたものとする。図 2 は、 $M = 3$ の例を用いて遷移規則の概念を示したものである。具体的には、時刻 t におけるセル (i, j) 自身の状態 ($q_{i,j}^t$)、及び、近傍セルにおける各状態にあるセル数 (各状態 s について $n_{i,j}^t$) を要素とするベクトルで近傍の状態 ($S_{i,j}^t$) を表し (式 (7))、それに対応して遷移後のセルの状態が決められる遷移規則 δ を定める (図 2 - A)。

$$n_{i,j}^t(s) = \sum_{(k,l) \in \text{neighborhood}_{i,j} - \{(i,j)\}} \begin{cases} 1 & \text{if } q_{k,l}^t = s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases},$$

$$S_{i,j}^t = \{q_{i,j}^t, n_{i,j}^t(0), n_{i,j}^t(1), \dots, n_{i,j}^t(M-1)\}.$$

(7)

さらに、式 (8) より、セルの状態構成について、正順方向の推移則 (状態 $0 \rightarrow$ 状態 $1 \rightarrow \dots \rightarrow$ 状態 $M-1 \rightarrow$ 状態 0) を定義し、これを用いて可能な遷移規則に制約を加えることで、セルの状態に対する対称性を導入する。例えば、自身の状態が状態 0 である場合に用いる遷移規則 (δ_0) の表が与えられた場合、表を構成するすべての状態値について、 0 を 1 、 1 を 2 、 \dots 、 $M-1$ を 0 といったように、巡回シフトすることにより、自身の状態が状態 1 である場合の遷移規則 (δ_1) が得られる (図 2 - B)。式 (8) の推移性から、遷移先の状態には M 種類の状態がそれぞれ同じ割合で常に存在するため、 λ パラメタ¹⁰⁾ はすべての遷移規則について同じ値 $1.0 - 1/M$ となる^{*1}。以上から、遷移規則 (δ) は δ_0 のみから求められる。

$$\begin{aligned} \delta_q(n(0), n(1), \dots, n(M-1)) \\ &= \delta(q, n(0), n(1), \dots, n(M-1)), \\ \delta_q(n(0), n(1), \dots, n(M-1)) \\ &= (\delta_0(n(cs(q, 0)), n(cs(q, 1)), \dots \\ &\quad , n(cs(q, M-1))) + q) \bmod M \\ &= (cs(q, x) = (q + x) \bmod M). \end{aligned} \quad (8)$$

以上の遷移規則を用いることで、遺伝的アルゴリズムにおける探索空間を大幅に圧縮し、探索効率を高めることができる。具体的には、9 近傍における各セルの状態の組み合わせに対して個別に遷移先を決める規則の場合、遷移規則の大きさは M^9 で、可能な規則が M^{M^9} 通り存在する。一方、今回の近傍における状態の頻度に基づく遷移規則を用いた場合、遷移規則の大きさが $M \times_{s+(M-1)} C_{M-1}$ で、さらに、対称性を加えることで、実質的には $1/M$ の $_{s+(M-1)} C_{M-1}$ となることから、最終的には、可能な規則数は $M^{s+(M-1)} C_{M-1}$ 通りとなる^{*2}。

3.2 遺伝子の記述と進化操作

遺伝的アルゴリズムを用いて、セルオートマトンの遷移規則 (δ_0) を探索する。セルオートマトンの遷移規則は、近傍のとり得る各状態 (各状態に対して付けた通し番号を l とする) に対する遷移後のセルの状態 s_l ($0 \leq s_l < M$) と遺伝的アルゴリズムにおける遺伝子 (g_l) を 1 対 1 対応させることにより、遷移規則 (δ) は遺伝子列 $\gamma(g_l \in \gamma)$ として表現される。具体的には、前節で示した遷移規則 δ_0 のみを遺伝子列 (γ) で表し、探索する (図 2 - C)。

個体 (i) を遺伝子列 (γ_i) によって表される遷移規則とし、複数の個体によって構成される集団 (個体数 I , $0 \leq i < I$) を、以下の手続きに従い、 G 世代まで進化させる。

(1) 初期集団の設定

各個体 (i) の遺伝子列 (γ_i) を構成するすべての遺伝子の値を 0 とする^{*3}。このとき、各個体は状態が全く変化しない遷移規則となる。これは、

*1 今回の進化実験で採用する $M = 3$ の場合、 $\lambda = 1.0 - 1/3 = 2/3 (\approx 0.667)$ となる。

*2 今回進化実験で採用する $M = 3$ の場合、可能な規則数は $M^{M^9} = 3^{3^9} \approx 1.505 \times 10^{9391}$ 通りから $M^{s+(M-1)} C_{M-1} = 3^{10} C_2 \approx 2.954 \times 10^{21}$ 通りとなる。

*3 なお、初期集団の遺伝子をランダムな値で初期化した場合でも、初期集団からの過渡的な進化の過程を除いて、同様の結果を得ている。

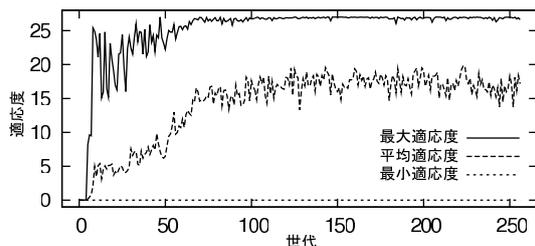


図3 適応度の推移

Fig. 3 Fitness of the population

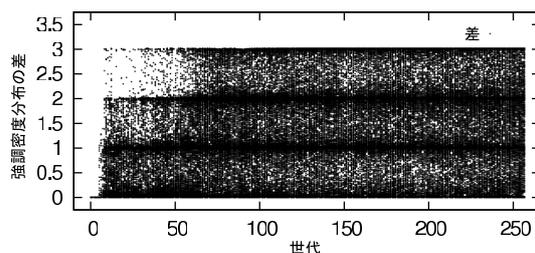


図5 強調密度分布の差

Fig. 5 Differences among scaled density distributions

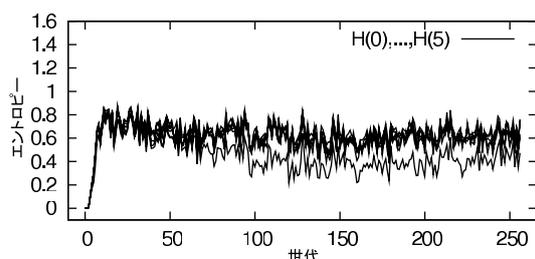


図4 エントロピーの推移

Fig. 4 Entropy of the cellular automata

最も静的な系から外乱を利用する系がどのように生じるかに注目するためである。

(2) 適応度の評価

各個体 (i) について、遺伝子列 (γ_i) から遷移規則 (δ_i) を定め、セルオートマトンを遷移させ、式 (6) により、適応度 (f_i) を得る。

(3) 選択

集団から、適応度の高い順に、 E 個の個体をエリート個体として選択する (エリート保存)。また、集団から、適応度に比例した確率に従い、重複を許して、 $I - E$ 個の個体を非エリート個体として選択する。

(4) 交叉

非エリート個体について、2つの個体を1組の親とし、交叉率 ($P_{crossover}$) に従い、2点交叉させ、それらの子個体とする。

(5) 突然変異

さらに、非エリート個体の全遺伝子について、突然変異率 ($P_{mutation}$) に従い、現在とは異なるランダムな値 ($0 \leq g_l < M$) へ切り替える。

(6) 終端処理

エリート個体と、交叉、突然変異を終えた非エリート個体を、次世代の集団とする。最終世代に至るまで手順 (2) へ戻る。

4. 実験結果と解析

4.1 進化の過程

実験に用いるパラメタとして次の値を用いた。セルオートマトンは、状態数 $M = 3$ 、 $N \times N = 64 \times 64$ の2次元のセル空間を用い、セルの更新確率 $P_a = 0.2$ 、外乱期間において、外乱を加える確率 $\beta = 0.01$ とした。各世代における個体の評価は、初期様相をランダムに初期化し、密度分布に適用する閾値 $\theta = 0.1$ 、密度を強調する度合い $\varphi = 100$ とし、準備期間 $L_{pre} = 2048$ ステップ、外乱を加える間隔 (初期値) $L_{int} = 1024$ ステップ、外乱の振幅 $L_{fluct} = 128$ ステップ、外乱期間 $L_d = 8$ ステップ、そして、 $D = 5$ 回の外乱を加えた。また、遺伝的アルゴリズムにおいて、遺伝子列の大きさは45となり^{*1}、個体数 $I = 32$ 個体、世代数 $G = 256$ 世代、エリート個体数 $E = 8$ 個体、交叉率 $P_{crossover} = 0.75$ 、突然変異率 $P_{mutation} = 0.05$ とした。以上の設定で、54 試行、実験を行った。

適応度の推移を解析したところ、全54 試行中50 試行において、各世代の最大適応度が最終的に27 付近まで増加、収束し、平均適応度が15 程度を推移するようになった。残りの4 試行では、適応度が低く、エントロピーが高い値を推移し、得られた個体について、後述の安定したサイクル状の推移はみられなかった。

図3 は典型的な試行における各世代の最大適応度、平均適応度、最小適応度の推移を示したものである。同図から、初期集団の適応度はほぼ0 であったが、約50 世代までに、その最大適応度は、25 程度まで増加した。最大適応度は以降も増加を続け、約80 世代前後で約27 付近に達し、そのまま高い値を維持し続けた。平均適応度は、同80 世代付近までに、15 程度の値を推移するようになり、最小適応度は、ほとんどの場合、ほぼ0 のままであった。

*1 $M = 3$ から、遺伝子列の大きさは $8 + (M-1)C_{M-1} = 10 C_2 = 45$ と定まる。

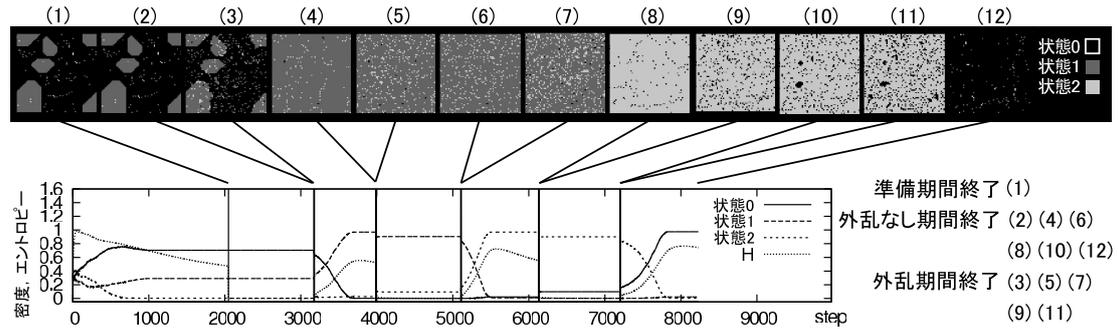


図 6 セルオートマトンの振る舞い
Fig. 6 Behaviour of cellular automata

図 4 は図 3 と同じ試行において、エントロピー^{*1} の推移を、適応度評価における外乱なし期間毎の平均で示したものである。エントロピーは、初期世代から約 20 世代にかけて、急激に増加し、0.8 付近にまで達している。これは、初期集団が、状態 0 への遷移規則しか存在せず、その適応度をほぼ 0 にする一方で、外乱の影響に関係なく、乱雑な振る舞いを示す個体が、強調密度分布の差を示し、集団中に広まったためと考えられる。しかし、それ以降、エントロピーは 0.4 から 0.8 付近を推移するようになり、減少傾向がみられた。従って、この場合における適応度の上昇は、評価全体を通した個体の秩序的な振る舞いによって得られたものであると考えられる。

個体の評価に用いた適応度 (式 (6)) は、計測した 6 つの強調密度分布について、そのすべての組み合わせにおける差の総和で計算されている。そこで、適応度が得られた経緯を詳しく把握するために、各世代において、全個体の評価で得られた強調密度分布の差 (0 以上 3 以下) の値をすべてプロットしたものが図 5 である。同図が示すように、適応度が最大となった 80

世代頃には、3 付近の差が多数存在する。最大値 3 をとる強調密度分布の差は、例を挙げると、状態 0 が多数を占める様相と、その一方がシグモイド関数によって強調されることによって状態 1 と状態 2 の両方が多数を占める様相といったように、正反対の分布の組み合わせによって生じる。従って、高い適応度は、外乱をきっかけにして、強調密度分布の差における正反対の分布を安定してとることによって得られたと考えられる。

4.2 外乱で生じる状態遷移サイクルの創発

適応度、エントロピー、そして、強調密度分布の差の推移から、進化の過程を経て、外乱をきっかけに強調密度分布の差が大きな複数の安定状態を示す個体が発生した事が判明した。そこで、図 3 の試行で得られた、最終世代の個体の振る舞いを詳しく解析し、適応的な系の持つ一般的な特徴について論ずる。

図 3 の試行において現れた個体の評価における様相の推移の例を図 6 に示す。この個体の遺伝子列は "00012112200202210022112121212102111000000000" となる^{*2}。図中、横軸はステップ、縦軸は各状態の密度とエントロピー、上の図は各期間終了時の様相を示している。ランダムな初期様相から遷移が始まり、最初の外乱までに、エントロピーの降下に特徴づけられる安定した様相へ推移する。

準備期間が終了した時、様相の大半は状態 0 が占めるが、一部に状態 1 が存在する (図 6 - (1))。正順方向の遷移を加える外乱は様相へ均等に影響し、様相の大半を占める状態 0 を状態 1 へ遷移させ、状態 1 の密度を上昇させる。外乱による直接的な変化は少量であるが (図 6 - (2), (3))、系は大きな変化を生じ、状態 1 が占める安定した様相へ推移する (図 6 - (4))。2 回目の外乱は状態 2 の密度を上昇させるが (図 6 - (4), (5))、系は大きな変化を示さない (図 6 - (6))。しかし、3 回目の外乱を加えると、さらに状態 2 の密度が

*1 各セル (i, j) について、指定された期間における種類別の状態発生確率 $(P_{i,j}(s), s: \text{種類})$ から、個々のセルにおけるエントロピー $(H_{i,j})$ を求める。

$$H_{i,j} = - \sum_{s=0}^{M-1} P_{i,j}(s) \log_2 P_{i,j}(s)$$

全セルについて、個々のエントロピーを求めた後、その平均から、1 セル当たりの平均エントロピー (\mathbf{H}) を得る。

$$\mathbf{H} = \frac{1}{N \times N} \sum_{(i,j) \in N \times N} H_{i,j}$$

*2 遺伝子列の各値は、以下のように、 δ_0 の各値に対応する。

$$\begin{aligned} & \text{"}\delta_0(0, 0, 8) \delta_0(0, 1, 7) \cdots \delta_0(1, 0, 7) \delta_0(1, 1, 6) \\ & \cdots \delta_0(7, 0, 1) \delta_0(7, 1, 0) \delta_0(8, 0, 0)\text{"} \end{aligned}$$

表 1 様相の遷移確率

Table 1 Transition probability between configurations

	{0}	{0, 1}	{1}	{1, 2}	{2}	{2, 0}	{0, 1, 2}
{0}	0.004	0.996	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
{0, 1}	0.000	0.119	0.865	0.017	0.000	0.000	0.000
{1}	0.000	0.000	0.000	0.976	0.024	0.000	0.000
{1, 2}	0.000	0.000	0.000	0.111	0.870	0.020	0.000
{2}	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.981	0.000
{2, 0}	0.829	0.016	0.000	0.000	0.000	0.155	0.000
{0, 1, 2}	0.000	0.167	0.083	0.333	0.000	0.333	0.083

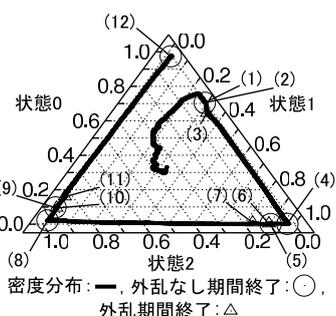


図 7 密度分布の推移

Fig. 7 Trajectory of density distribution

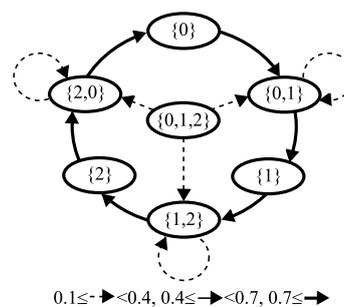


図 8 様相の遷移

Fig. 8 Transition diagram for the configuration of the cellular automata

増え (図 6 - (6), (7)), 系は最初の外乱と同様にして大きな変化を生じ, 状態 2 が占める安定した様相へ推移する (図 6 - (8)). 以降, 同様な状況が繰り返され, 5 回目の外乱により, 状態 0 が占める様相へ推移して遷移が終わる (図 6 - (12)). 密度分布について, 各状態の密度を軸にとることで, 図 7 に示す密度分布の推移が描ける^{*1}. 同図から, 系は初期状態から上記の遷移を経て, この空間上で三角形のサイクル状の軌跡を描くことが分かる.

サイクル状の推移を見せたセルオートマトン (図 6) は, 外乱の発生に対して, 1 種類の状態が系のほぼすべてを占める密度分布と, 2 種類の状態からなる密度分布について, 状態の組み合わせを変えた, 合わせて 6 つの異なる密度分布間を推移している. また, 図 6 の状態密度の推移を見ると, 各外乱なし期間において状態密度の変化は収束し, 次の外乱発生まで変化しないため, これら 6 つの密度分布は系の大域的な安定状態となっている. さらに, その組み合わせは, 強調密度分布の差が最大となるものを 3 つ含む. 例えば, 状態 2 が占める系 (図 7-(8)) と状態 0 と状態 1 から成る系 (図 7-(2)) における強調密度分布の差はほぼ 3 倍で, 最大となる. そのため, この 6 つの大域的な安定状態の出現が高い適応度に至った要因とみられる.

*1 図中, (1) から (12) の記述は図 6 に準ずる.

また, 図 7 から分かるように, 系は, 1 種類の状態で占められた密度分布 (図 7-(4), (8), (12)) から, 次の頂点に向かう際, 1 回目の外乱では大きく変化せず, 2 回目の外乱で大きく変化している. セルオートマトンの持つこの非線形的な挙動が, 6 つの安定した状態の創発をもたらしていると言える.

なお, 高い適応度に達した試行では, 図 7 に示す例とは逆向きに遷移する遷移規則もいくつか観察された. この場合, 例えば, 様相上を状態 0 のセルが多数を占める状況において, 次に系全体を占めるべき状態 2 のクラスタがごくわずかに存在していた. クラスタの周囲においてセルの状態は 0 で, それが外乱によって 1 になり, さらに進化的に得られた遷移規則により状態 1 が状態 2 に変わった結果, クラスタが拡大し, 状態 2 の系に推移した. 同様の減少が繰り返し生じることにより, やや不安定ながらも逆向きのサイクルが生じていた.

4.3 サイクルの安定性

外乱をきっかけに, 大域的な状態のサイクル状の推移を生じる系が得られた. しかし, 進化実験の設定では, 初期条件の影響が大きく, また, 外乱 (期間) の回数が少ないため, 長期間の遷移において, サイクルが実際に生じ, それがどれほど維持できるかについては検討の余地があると言える. そこで, 系の振る舞いを詳しく解析した個体について, 外乱を ($D =$)17 回

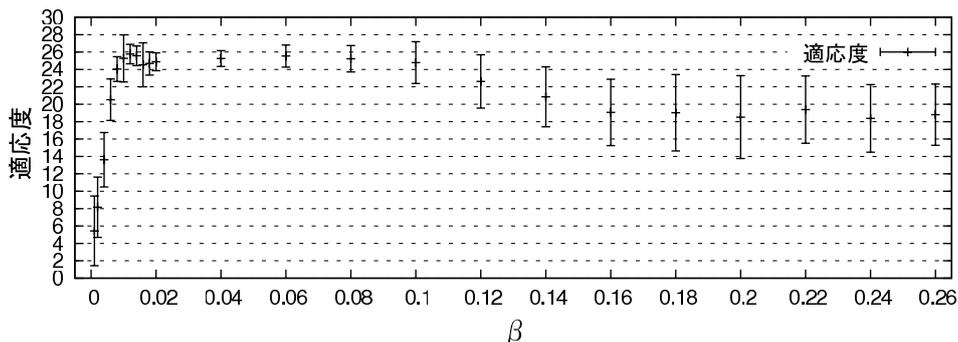


図9 外乱と適応度

Fig. 9 Disturbance and fitness

に増やし、進化実験における適応度評価と同様の試行を100回行った。

様相の遷移の傾向を把握するために、セルの取り得る3種類の各状態について、それらの強調密度が実際の密度以上の場合には密度を1、それ以外の場合は0とみなして離散化した上で、その組み合わせで様相を $2^3 = 8$ 種類に分類し、試行中での様相間の遷移確率を計算した^{*1}。例えば、様相上に状態0のセルが80%、状態1のセルが15%、そして、状態2のセルが5%存在する場合、密度分布は $\{0.80, 0.15, 0.05\}$ 、強調密度分布は $\{1.00, 0.99, 0.01\}$ であり、離散化による密度分布は $\{1, 1, 0\}$ となる。

表1は、100試行において、評価に用いた様相間での遷移確率を示したものである。表中の集合は各様相で密度が1とみなされた状態の組を表し、各値は対応する行に分類される様相において、次の様相が対応する列に分類された確率を示している。なお、定義上、すべての状態が強調されない状況は生じない。同図から、先に示したサイクルに対応する遷移 $\{0\} \rightarrow \{0, 1\} \rightarrow \{1\} \rightarrow \{1, 2\} \rightarrow \{2\} \rightarrow \{2, 0\} \rightarrow \dots$ の発生確率がすべて0.8以上であり、極めて高くなっている(表中、対角要素の上の値)。表1をもとに外乱間で生じる様相の遷移を模式的に示したものが図8である。この図は、0.1以上の様相の遷移確率について、0.1以上0.4未満、0.4以上0.7未満、そして0.7以上の合計3種類に分類し、確率の増加にともなって、破線、実線、さらに太線でその遷移が示されている。先に示したサイクルは図中の円周に位置し、ランダムな初期様相を含む $\{0, 1, 2\}$ からサイクルに引き込まれると、外乱間で、1状態が占める様相と2状態が占める様相がそ

の組み合わせを変え交互に出現する特性が示されている。以上から、長期間の遷移において、6種類の様相によって構成されるサイクルは比較的安定して発生していると考えられる。

4.4 外乱の量とサイクルの関係

進化の過程を通じて、多くの安定状態を示して高い適応度を得るために、前節で挙動を解析した遷移規則は実験設定で生じる外乱の量に適切に対応することが重要であったと推測される。本節では、これを確認するために外乱の発生確率 β とこの遷移規則の適応性との関係に注目する。具体的には、前節で解析した個体の遷移規則について、外乱を加える確率 β を0.001, 0.002から0.020まで0.002刻み、0.040から0.260まで0.02刻みで変えて各100回ずつ、 β 以外は進化実験の評価と同様の設定で試行を行った。

図9は、横軸に外乱を加える確率をとり、縦軸にその確率における適応度の値を示したものである。 $\beta = 0.001$ 付近は適応度が低く、そこから $\beta = 0.010$ にかけて β に対する適応度の著しい上昇が見られる。 $\beta = 0.010$ 付近では適応度が約25まで達し、それ以降、適応度は緩やかに減少し、 $\beta = 0.026$ では約18まで適応度が落ち込んでいる。 β が小さすぎる場合、外乱の影響が弱すぎて、様相の遷移に多数の外乱期間を要し、また、その一方で β が大きき場合、外乱の影響が強すぎて、サイクルから複数状態からなる大域的な安定状態が消失する。以上から、進化実験において得られた遷移規則は、定められた外乱の設定条件をうまく利用することで、多数の安定状態を示して高い適応度を得ていることが明らかとなった。

4.5 外乱と自己組織的特性

4.3節までの結果から、解析を行った遷移規則は、2回の外乱期間の発生の後に系全体が大きく変化する状態遷移サイクルが生じることが判明し、4.4節の結果から、その適応性は外乱の発生確率に依存することが

*1 具体的には、シグモイド関数 $y = SF_{\theta=0.1}(x)$ と直線 $y = x$ が、シグモイド関数の閾値 θ 付近で交わる x の値(約0.075)を基準にして、密度がそれ以上の場合には1、その他の場合を0とする。

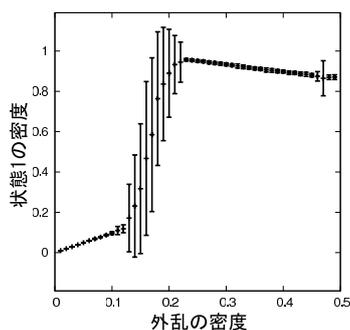


図 10 外乱の影響

Fig. 10 Effects of the density of disturbed cells

明らかになった。これから、状態遷移サイクルと外乱の発生には密接な関係があり、特に、外乱によって状態が変化したセルの量と系全体のその後の振る舞いには何らかの特徴的な関係があると考えられる。そこで、系の振る舞いを詳しく解析した個体について、状態0が占める初期様相 ($N \times N$) から特定の割合のセルをランダムに選んで外乱を加え、適応度の評価における外乱なし期間 (L_{int}) と同じステップ数の遷移させる。その後、最後のステップにおいて、状態0に外乱が生じた結果である状態1の密度を計測することで、外乱によって状態が変化したセルの量が系全体の変化に与える影響を調べた。なお、セルの選択割合を0.01から0.49まで0.01刻みで設定し、それぞれ100回ずつ実験を行った。

図10に示されるように、振る舞いを解析した遷移規則では、外乱の量が0.1程度までの場合、遷移後の変化量は、きわめて少ないが、それ以上になると、その変化量は、急激に増加し、ほぼ1になっていることが分かる。外乱に対して、このステップ関数的な応答から、この遷移規則では、様相の約10%以上が外乱によって改変されると、1種類の状態が多数を占める様相間での推移が発生するとみられる。遷移規則の影響を考えないと、進化実験での設定では、1回の外乱において、外乱を加える確率と外乱期間の積 ($\beta \times L_d = 0.01 \times 8 = 0.08$) から、様相の8%程度が改変される。従って、1種類の状態が多数を占める様相から見ると、得られた系は、1度の外乱ではその量がならず、系全体はそのまま安定化し、さらなる外乱により、外乱の蓄積が閾値を越え、大きな様相の変化を引き起こしたと考えられる。

5. おわりに

外界との相互作用によって自己組織化するセルオートマトンの特性の理解と応用を目指し、外乱によって

大域的な安定状態を切り替える系を、遺伝的アルゴリズムで探索した。その結果、外乱をきっかけにセルの状態の密度分布で表される大域的な安定状態を推移させる系が得られた。この系は、外乱の蓄積がある閾値を越えるとその影響が全域に及ぶ非線型な性質により、系は最大でセルの状態数の2倍に及ぶ安定状態を獲得した。

強調密度を用いて系全体の状態を評価することで、各状態の微小な量の増加が適応度に明確に反映されるようになった。その結果、微小な量の状態の存在を含む中間的な系全体の状態が安定して生じるようになった。

また、セルの近傍における状態のパターンに対応する規則を列挙した遷移規則ではなく、近傍で各状態をとるセル数の分布で近傍の状態を表現し、さらに、正順方向の推移性を導入した遷移規則を用いた。その結果、遷移規則と対応する遺伝子列を削減し、推移性を有効に利用した遷移規則を効率的に探索できた。

以上の知見は、確率的な外乱を想定した単純なタスクから得られたものであるが、もし、外乱を外から与えられる系の制御信号と見なした場合、自律分散系の制御に関しても有用であると考えている。例えば、群ロボットにおいて、得られた知見は、通信状態が悪く伝送路が少ないなどの理由で、部分的に短期間の信号の入力しか出来ない状況であっても、適切なロボット間の局所的な相互作用を設定することで、系全体の複数の動作モードの切り替えを安定して制御することができることを示していると言える。

得られた系は、外からの刺激に対して、複数の安定状態をもって反応を示すことができた。今後の展開として、こうした適応的な特性を生かして、外界へ能動的な振る舞いを示す系を考えていきたい。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省21世紀COE「計算科学フロンティア」の援助による。

参考文献

- 1) S. Wolfram: *A New Kind of Science*, Wolfram Media Inc. (2002).
- 2) T. E. Ingerson and R. L. Buvel: Structure in Asynchronous Cellular Automata, *Physica D*, Vol. 10, pp. 59–68 (1984).
- 3) 蜷川 繁, 米田正明, 広瀬貞樹: 散逸境界条件下のセルオートマトンについて, 情報処理学会論文誌, Vol. 38, No. 4, pp. 927–930 (1997).
- 4) C. Marr and M. T. Hütt: Similar Impact of Topological and Dynamic Noise on Complex Patterns, *Physics Letters A*, Vol. 349, pp. 302–305 (2006).
- 5) A. Roli and F. Zambonelli: Emergence of

Macro Spatial Structures in Dissipative Cellular Automata, *Proceedings of the 5th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry (ACRI2002)*, pp. 144–155 (2002).

- 6) M. Mamei, A. Roli and F. Zambonelli: Emergence and Control of Macro-Spatial Structures in Perturbed Cellular Automata, and Implications for Pervasive Computing Systems, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, Vol. 35, No. 3, pp. 337–348 (2005).
- 7) M. Mitchell, J. P. Crutchfield and P. T. Hraber: Evolving Cellular Automata to Perform Computations: Mechanisms and Impediments, *Physica D*, Vol. 75, pp. 361–391 (1994).
- 8) L. M. Rocha: Evolving Memory: Logical Tasks for Cellular Automata, *Proceedings of the 9th International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems (ALIFE9)*, pp. 256–261 (2004).
- 9) S. Ninagawa: Evolving Cellular Automata by 1/f Noise, *Proceedings of the 8th European Conference on Artificial Life (ECAL2005)*, pp. 453–460 (2005).
- 10) C. G. Langton: Computation at the Edge of Chaos: Phase Transitions and Emergent Computation, *Physica D*, Vol. 42, pp. 12–37 (1990).

(平成 18 年 12 月 15 日受付)

(平成 19 年 7 月 31 日再受付)

(平成 19 年 9 月 8 日採録)



岩瀬 雄祐 (学生会員)

1982 年生。2005 年富山大学工学部知能情報工学科卒業。2007 年名古屋大学大学院情報科学研究科博士課程 (前期課程) 修了。現在、同大学院博士課程 (後期課程) 在学中。電子情報通信学会会員。



鈴木 麗瑩 (正会員)

1998 年名古屋大学情報文化学部自然情報学科退学。2000 年同大学大学院人間情報学研究科博士前期課程修了。2003 年同研究科博士後期課程修了。博士 (学術)。現在、名古屋大学大学院情報科学研究科複雑系科学専攻助教。人工生命手法に基づくエージェントベースモデリングに関する研究に従事。進化と学習の相互作用、協調行動の進化、進化とニッチ構築などに興味を持つ。International Society of Artificial Life, 人工知能学会, 日本進化学会, 日本数理生物学会各会員。



有田 隆也 (正会員)

1983 年東京大学工学部計数工学科卒業。1988 年同大学大学院工学系研究科修了。工学博士。名古屋工業大学講師, カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員研究員を経て, 現在, 名古屋大学大学院情報科学研究科教授。人工生命や複雑系科学の研究に従事。言語の進化, 人間行動の進化, 進化的計算論などに興味を持つ。著書に“人工生命”(医学出版, 2002 年), “心はプログラムできるか”(ソフトバンククリエイティブ, 2007 年) など。人工知能学会, 電子情報通信学会, 日本認知科学会, 日本数理生物学会各会員。