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な探索

岩瀬雄祐　鈴木麗璽　有田隆也
名古屋大学 大学院情報科学研究科

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．

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

Yusuke Iwase, Reiji Suzuki and Takaya Arita
Graduate School of Information Science, Nagoya University

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, which is distinguished by the distribution ratio of states of cells, after every occurrence of disturbance period, in which the state of each cell can be modified by using an external rule with a small probability. By conducting an evolutionary search for rules of CA that can solve this task, we got the rule of CA of which global state cyclically switched between different stable states, and interestingly, the number of stable states was more than that of distinct state of cells. Detailed analyses showed that such behavior was due to its self-organizing feature that drastic changes in its global state occur 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]．

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ンに設定すると，そのパタ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ことが期待される．

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 (ムーア近傍，$neighborhood_{i,j}$) とする．時刻 t における各セル (i, j) は，現在の状態として $q^t_{i,j}$ を持ち，確率 P_a $(\in [0, 1])$ により，近傍の状態 $(S^t_{i,j})$ 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．

$$q^{t+1}_{i,j} = \begin{cases} \delta(S^t_{i,j}) & (P_a) \\ q^t_{i,j} & (1 - P_a) \end{cases} \tag{1}$$

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．

$$\epsilon \quad : \quad q^{t+1}_{i,j} \; := \; \left(q^{t+1}_{i,j} + 1\right) \bmod M \tag{2}$$

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．

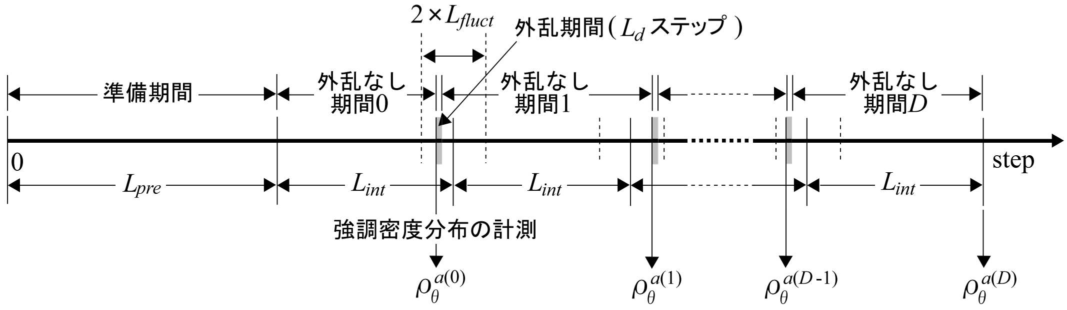

図 1: セルオートマトンの遷移と外乱との関係

2.2 評価

セルオートマトンの遷移過程において，$D(\geq 0)$ 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．

様相上において，特定のセルの状態 (s) の数に注目すると，全セル数に対する割合として，時刻 t における密度 ($\rho^t(s)$) が求められる．そこで，密度を全状態 ($s = 0, 1, \ldots, M-1$) について列挙したものを，時刻 t における様相の密度分布 ($\boldsymbol{\rho}^t$) と定義する (式 3)．

$$
\begin{aligned}
\rho^t(s) &= \frac{1}{N \times N} \sum_{(i,j) \in N \times N} \begin{cases} 1 & \text{if } q^t_{i,j} = s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} , \\
\boldsymbol{\rho}^t &= \{\rho^t(0), \rho^t(1), \ldots, \rho^t(M-1)\} \ . \qquad (3)
\end{aligned}
$$

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 ($\boldsymbol{\rho}^t_\theta$) を定義する (式 (4))．

$$
\begin{aligned}
SF_\theta(x) &= \frac{1}{1 + e^{-(x-\theta) \times 100}} , \\
\rho^t_\theta(s) &= SF_\theta(\rho^t(s)) , \\
\boldsymbol{\rho}^t_\theta &= \{\rho^t_\theta(0), \rho^t_\theta(1), \ldots, \rho^t_\theta(M-1)\} \ . \qquad (4)
\end{aligned}
$$

式 (4) は，様相におけるセルの状態別の有無を強調する．密度が閾値 (θ) より大きいならば，$\boldsymbol{\rho}^t_\theta$ は 1 に近づき，さもなくば，$\boldsymbol{\rho}^t_\theta$ 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 $a(0), a(1), \ldots, a(D)$ 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 ($\boldsymbol{\rho}^{a(0)}_\theta, \boldsymbol{\rho}^{a(1)}_\theta, \ldots, \boldsymbol{\rho}^{a(D)}_\theta$) 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．

$$
\begin{aligned}
\left|\boldsymbol{\rho}^i_\theta - \boldsymbol{\rho}^j_\theta\right| &= \left|\rho^i_\theta(0) - \rho^j_\theta(0)\right| + \\
&\quad \left|\rho^i_\theta(1) - \rho^j_\theta(1)\right| + \ldots + \\
&\quad \left|\rho^i_\theta(M-1) - \rho^j_\theta(M-1)\right| \qquad (5) \\
f &= \sum_{i \neq j \in \{a(0), a(1), \ldots, a(D)\}} \left|\boldsymbol{\rho}^i_\theta - \boldsymbol{\rho}^j_\theta\right| \qquad (6)
\end{aligned}
$$

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，等方則で，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，近傍の状態 ($S^t_{i,j}$) を，式 (7) のように，時刻 t におけるセル (i,j) 自身の状態 ($q^t_{i,j}$) と，その周囲のセルの状態 ($q_{k,l}$, $(k,l) \in neighborhood_{i,j} - \{(i,j)\}$) における種類別の存在数 (種類 s について，$n^t_{i,j}(s)$) が列挙されたものを要素とするベクトルで表し，それに対応して，遷移規則 (δ) が定められる (図 2 - A)．

$$
\begin{aligned}
n^t_{i,j}(s) &= \sum_{(k,l) \in neighborhood_{i,j} - \{(i,j)\}} \begin{cases} 1 \text{ if } q^t_{k,l} = s \\ 0 \text{ otherwise} \end{cases} , \\
S^t_{i,j} &= \left\{q^t_{i,j}, n^t_{i,j}(0), n^t_{i,j}(1), \ldots, n^t_{i,j}(M-1)\right\} . \qquad (7)
\end{aligned}
$$

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 → 状態 1 → ... → 状態 $M-1$ → 状態 0) を定義し，これを用いて可能な遷移規則に制約を

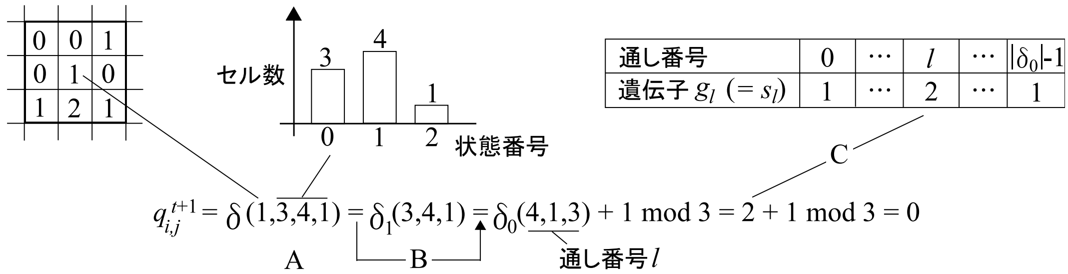

図 2: 遷移規則の概念

加えることで，遺伝的アルゴリズムにおける探索空間を圧縮する．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，...，$M-1$ 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)．以上から，遷移規則 (δ) は，δ_0 のみから求められ，実質的な規則数は，δ の $1/M$ となる．

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

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) によって表されるセルオートマトンとし，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，状態 0 で初期化する．

2. 評価 (適応度の計算)
   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，$G-E$ 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，それらを子個体とする．

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. **2.** に戻る
   エリート個体と，交叉，突然変移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ー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 $\theta = 0.1$ 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，外乱の振れ幅 $L_{fluct} = 128$ 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，個体数 $I = 32$ 個体，世代数 $G = 256$，エリート個体 $E = 8$ 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，12 試行，実験を行った．

全試行は，適応度の推移を解析したところ，a) 各世代の最大適応度が最終的に 25 付近まで増加し，収束する試行と，b) 最大適応度が最終的に 17 付近までしか到達

しないまま収束する試行の 2 つに分けられることが判明した．12 試行中，a) は 8 試行，b) は 3 試行であった．

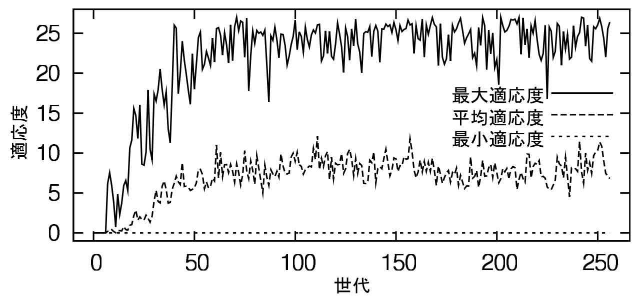

図 3: 適応度の推移 - a) における典型例

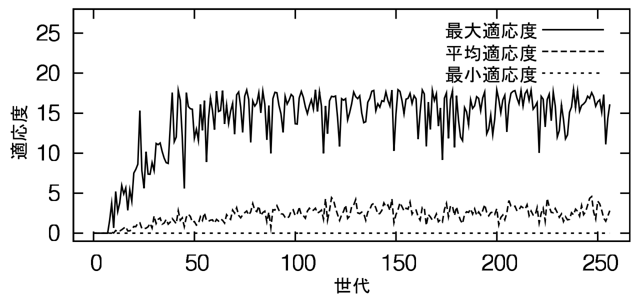

図 4: 適応度の推移 - b) における典型例

図 3，4 は，a)，b) それぞれに分類される典型的な試行について，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，どちらの場合も，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，15 程度まで増加した．a) の場合，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．一方，b) の場合，最大適応度は，それ以上増加しなかった．なお，どちらの場合においても，平均適応度は，最大適応度の 1/5 程度の値を推移する傾向があり，最小適応度は，ほとんどの場合，ほぼ 0 のままであった．

図 5，6 は，それぞれ，図 3，4 と同じ試行において，エントロピー (**H**) [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．同図から，どちらの場合も，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，1.0 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，a) の場合は，エントロピーが 1.0 より低い値へ推移したのに対して，b) の場合では，エントロピーが高く，最大で 1.2 付近に達する傾向がみられた．従って，a) 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，図 3，4 の両試行において，適応度が得られた経緯を詳しく把握する

[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: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 (**H**) を得る．

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

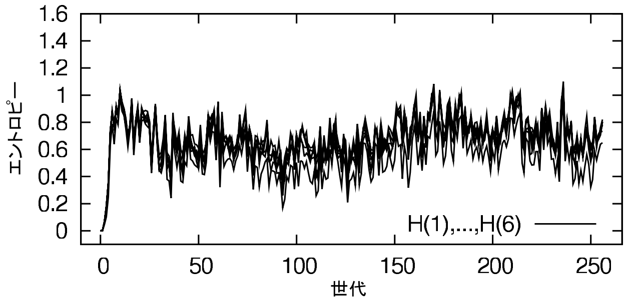

図 5: エントロピーの推移 - a) における典型例

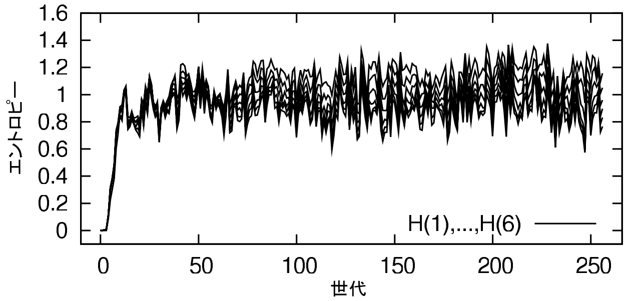

図 6: エントロピーの推移 - b) における典型例

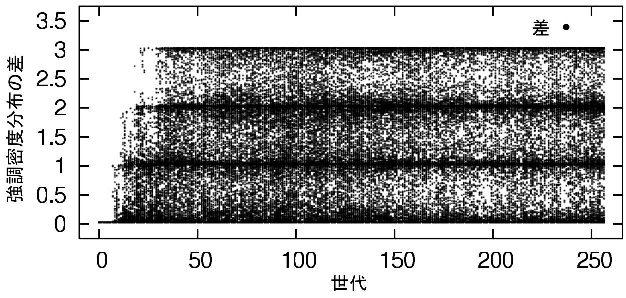

図 7: 強調密度分布の差 - a) における典型例

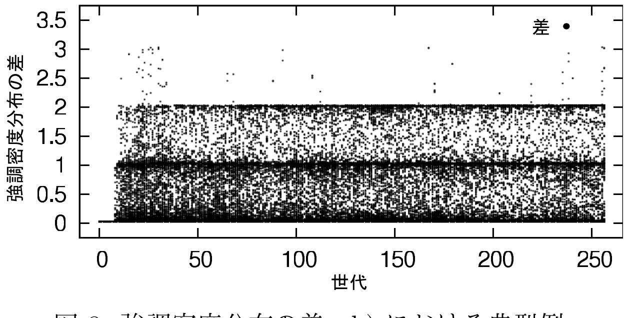

図 8: 強調密度分布の差 - b) における典型例

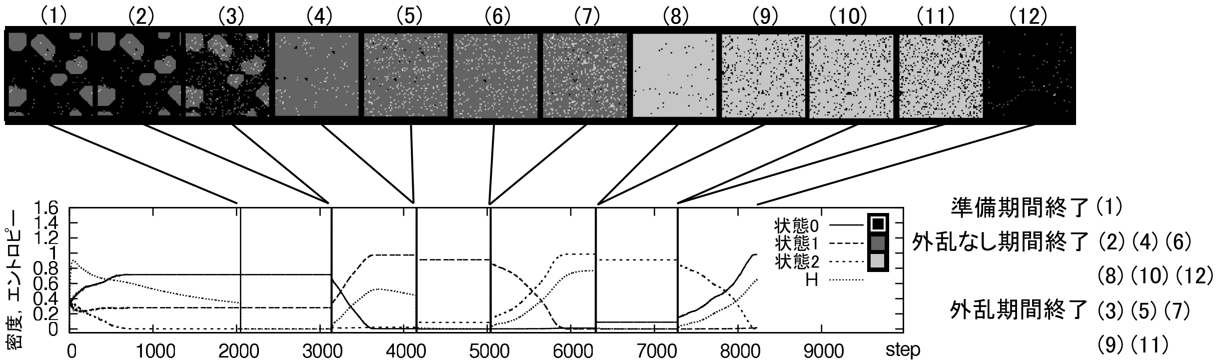

図 9: セルオートマトンの振る舞い - a) における典型例

ために，各世代で，すべての個体の評価で得られた強調密度分布の差 (0 以上 3 以下) について，すべての値をプロットしたものが，図 7，8 である．同図が示すように，a) の場合は，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一方で，b) の場合では，2 より大きな差を，ほとんど生じなかった．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，a) の場合における高い適応度は，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取ることにより，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，先の試行で得られた，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．

a) の典型的な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 9 に示す．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．この様相は，大半を状態 0 が占めるが，一部に状態 1 が存在する．正順方向の状態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 9 - (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 9 - (4))．2 回目の外乱は，状態 2 の密度を上昇させるが (図 9 - (4)，(5))，系は，大きな変化を示さない (図 9 - (6))．しかし，3 回目の外乱を加えると，さらに状態 2 の密度が増え (図 9 - (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 9 - (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 9 - (12))．密度分布について，各状態の密度を軸にとることで，図 10 に示す密度分布のアトラクタが描ける．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．

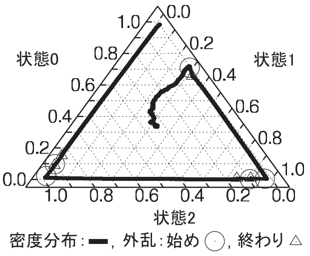

図 10: 密度分布のアトラクタ - a) における典型例

一方，b) で現れた個体は，図 11 に示す，1 つの状態が占める様相へ収束する個体等，ほとんど外乱の効果が見られない．図 12 に示す密度分布のアトラクタからも明らかなように，こういった系は，外乱に起因するサイクルを示さない．

サイクル状の推移を見せたセルオートマトン (図 9) 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 9 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 10 中左下角の ○) と状態 0 と状態 1 から成る系 (図 10 中右上の ○) における強調密度分布の差は 3 となり，強調密度分布の差が最大になる．そのため，この 6 つの大域的な安定状態の出現が，高い適応度の値を保ったとみられる．

また，図 10 から分かるように，系は，1 種類の状態で

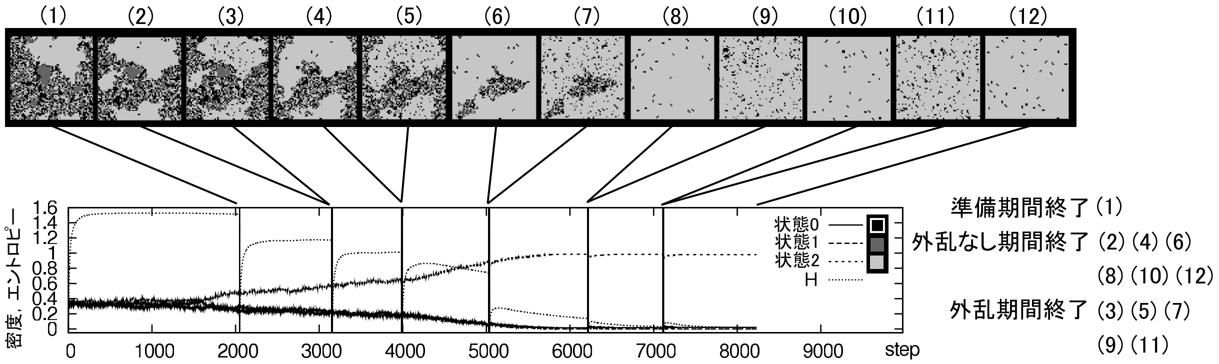

図 11: セルオートマトンの振る舞い - b) における典型例

占められた密度分布（三角形の各頂点）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．

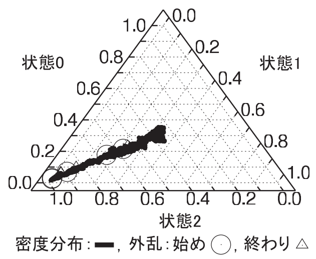

図 12: 密度分布のアトラクタ - b) における典型例

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，a)，b) の典型的な試行において，系の振る舞いを解析した個体について，外乱を $(D =)17$ 回に増やし，各個体 100 回ずつ，進化実験における適応度評価と同様の試行を行った．

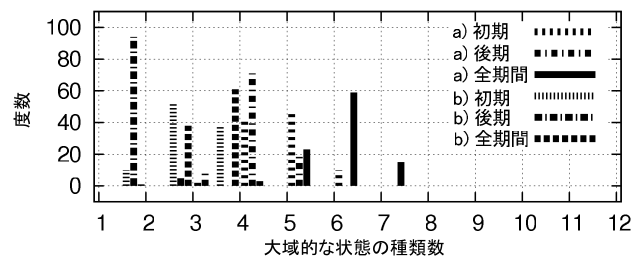

図 13: 発生した大域的な状態の種類数 (度数分布)

図 13 は，強調密度分布の各要素について，0.5 未満を 0，それ以上を 1 と見なして，強調密度分布を 8 種類 $(= 2^3)$ に分類したとき，発生した強調密度分布の種類数を，すべての外乱なし期間のうちの，初期の 6 期間 (適応度評価に用いた期間)，最終の 6 期間，さらに，全 18 期間について，示したものである．a) に属する個体について，発生した種類数が一番多かったのは，初期の 6 期間では 5 種類 (46 試行)，最終の 6 期間では 4 種類 (71 試行)，そして，全 18 期間においては 6 種類 (59 試行) であった．一方，b) に属する個体について，発生した種類数が一番多かったのは，初期の 6 期間では 2 種類 (52 試行)，最終の 6 期間では 1 種類 (94 試行)，そして，全 18 期間においては 3 種類 (61 試行) であった．なお，種類数が 7 である試行がいくつか存在したのは，サイクルを作る 6 状態に加えて，確率的な影響ですべての強調密度が 1 になった状態がわずかに生じたためである．

a) で現れた個体は，試行の初期，最終にかかわらず，セルの状態数 3 以上の大域的な状態を発生している．しかし，全期間では，試行の多くで 6 種類の状態が発生している一方で，初期と最終の 6 期間では，5 種類，ならびに，4 種類の状態の発生頻度が最大となっている．個々の試行における密度分布の推移をみると，1 種類の状態が多数を占める様相間の遷移過程 (図 10 中の三角形の角から角への遷移) において，密度分布の大きな変化が生じるのに，図 10 のような 2 回ではなく，3 回以上の外乱が必要な状況が多数見られた．問題の設定から，これらの 2 種類の状態から成る様相は区別されないため，初期や最終といった 6 期間に限定した計測では，大域的な状態数が減少したと考えられる．しかし，すべての期間においてはほとんどの試行で 6 種類の状態が生じたことから，サイクル自体は，比較的安定して発生していることが分かった．

4.4　外乱と自己組織的特性

前節までの解析から，適応的な系の持つ大域的な安定状態を増加させる 2 種類の状態から成る中間的な密度分布について，その出現，消滅の過程は，系がもつ，外乱の影響の蓄積量に応じてその影響を拡大する作用に，大きく依存していることが示唆された．そこで，全試行にお

ける最終世代のエリート個体について，100 回ずつ，進化実験と同じセル空間 $(N \times N)$ とセルの更新確率 (P_a) を用い，状態 0 が占める初期様相に対して，外乱を，セル空間の大きさに対して，0.01 から 0.49 まで，0.01 刻みの割合で加え，適応度評価の外乱なし期間 (L_{int}) と同じステップ数の遷移を行った．その後，状態 0 に外乱が生じた結果である状態 1 の密度を得た．

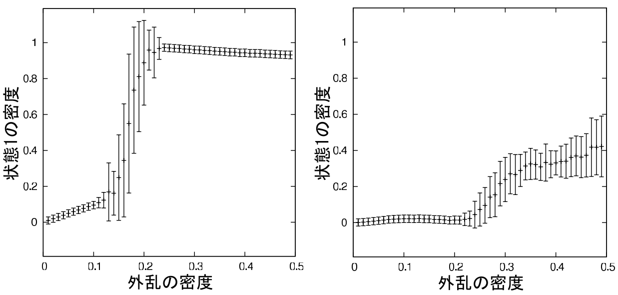

図 14: 外乱の影響 (左:a)，右:b))

図 14 は，前節まで例として見てきたセルオートマトンの特性を示したものである．図 14 左 のように，a) の試行によって得られた遷移規則では，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．一方，図 14 右 のように，b) の試行によって得られた遷移規則では，a) の試行とは異なり，穏やかなシグモイド関数状の特性を示し，その閾値は，a) の場合に比べて大きい，0.2 以上の領域に位置している．

以上から，a) の試行によって得られたセルオートマトンでは，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 $(P_e \times L_d = 0.01 \times 8 = 0.08)$ 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，a) で得られた系は，1 度の外乱ではその量が足らず，外乱の蓄積をもって，大域的な安定状態を示し，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．

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．

参考文献

[1] S. Wolfram, “A New Kind of Science”, Wolfram Media Inc, 2002.

[2] T. E. Ingerson, R. L. Buvel, “Structure in Asynchronous Cellular Automata”, Physica, Vol. D10, 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, M.-T. Hütt, “Similar Impact of Topological and Dynamic Noise on Complex Patterns”, Physics Letters, Vol. A349, pp. 302-305, 2006.

[5] A. Roli, F. Zambonelli, “Emergence of Macro Spatial Structures in Dissipative Cellular Automata”, LNCS 2493 (ACRI 2002), pp. 144-155, 2002.

[6] M. Mamei, A. Roli, 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, P. T. Hraber, “Evolving Cellular Automata to Perform Computations: Mechanisms and Impediments”, Physica, Vol. D75, pp. 361-391, 1994.

[8] L. M. Rocha, “Evolving Memory: Logical Tasks for Cellular Automata”, Ninth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems (ALIFE 9), pp. 256-261, 2004.

[9] S. Ninagawa, “Evolving Cellular Automata by 1/f Noise”, LNAI 3630 (ECAL 2005), pp. 453-460, 2005.