

多段階創発システムの試み – フラクタルネットワークを例として

Attempt for Multi-Level Emergence – Fractal Network Version

中島 秀之*1 由良 文孝*1 篠田 孝祐*2
 Hideyuki Nakashima Fumitaka Yura Kosuke Shinoda

*1公立はこだて未来大学 *2理化学研究所
 Future University Hakodate Riken

To reach intelligence through emergence, we need to implement multi-level emergence. Here, we do not mean emergence of property, but emergence of some physical entity that can be used as building blocks for the next-level emergence. For a system to be multi-level emergence, the first-level emerged entity must be auto-identified and fixed by the system.

In this paper, we outline our research scenario for the second-level emergence. We first try to mimic emergence of cell-like structure in our cellular automaton that become elements of the next-level emergence. Once a second order emergence is achieved, it can be repeated to multi-level emergence in principle.

1. 何がしたいのか

多段階創発システムの実装を目指している [Nak09]. 創発とは設計・実装した層の上に想定しなかった現象が新たに発生することである。以前より（特に人工生命やセルオートマトン分野で）単純な規則から面白い現象が創発する事例が研究されている。しかしながらこれらは全て一段階の創発を人間（研究者）が観察によって拾い上げているものである。我々の目標は、生命が分子構造から細胞を、さらに多細胞生物を創発させたように、これを多段階にすることにある。このためには人間の観察者の介入を無くす必要がある。一層目に創発した現象が自ら固定化し（自己組織化）、次にはその層が基本となり、更に上の創発を起こすというシステムを構築したい。つまり、単なる現象の創発ではなく、実体を伴ったシステムの創発が必須である。生物は我々が知る限り最も複雑な多層システムである。少なくとも分子層、細胞層、体組織層、個体層が各々独自の機構を持っており、各層は下位の層に還元して理解することはできない。

以前の論文 [Nak06, Nak08] に述べたように、創発をデザインする基本手法としては進化的方法論しかないと考えている。これは単純化して言えば突然変異と選択の繰り返しである。ただし、従来の研究は一層の創発に限定されており、この方式で多層の創発をデザインするための手法は今のところ存在しない。また、この一層の創発を選別しているのは人間である。例えば単純な2状態セルオートマトンであるライフゲームにおいて、グライダーや、グライダーを打ち出し続けるグライダーガンという興味深いパターンは共に人間が発見したものである。このままでは、以下に述べる多層システムの創発には使うことができない。多層創発はグライダーやグライダーガンが創発したら、それを要素として計算回路が創発するようなもので、実現はほぼ不可能に見える。しかしながら、生物進化はそれを成し遂げ、人間を創り上げた。我々はそのような大それた計画は持っていないが、非常に単純なシステムで良いから多層の創発を見たい。本稿ではその目的となる単純な、しかし多層のシステム（2.節）を想定し、そこへの道を探る。

生物のような複雑さをもった多層システムの創発は当面手

に負えないので、実験ドメインとしては従来の研究と同じセルオートマトンを使う。ただし、セルの変換規則自体をセルに持たせ、これが突然変異により規則が変わりつつパターン変化を起こす自己言及型セルオートマトン（4.節）を使う。自己言及型セルオートマトンの上で、新しい構造の創発を待ち、それを人間の観察を経ず自動的に固定できる仕組みを開発する。これが開発できれば、後は同じことを各階層に適用して行けば、原理的にはいくらでも複雑なものが構築できることになる（計算資源は有限であるため、実際に行うことは無理と考えているが）。

2. 完全フラクタルネットワーク

多段階創発システムのターゲットの一つとしてすべての層が同じ構造をもった多層システム（フラクタルな構造）を考えるのが楽である。一つの層が創発すれば、それと類似の手法で次の層を創発させることができる。従って我々の当面の関心は様々な異なる層を創発させるのではなく、複数の層で同じ構造を自動的に創発させることにある。

K -完全フラクタルネットワーク (K -CFN) とは K 個のクラスター（固まり）が相互に完全結合したネットワークであると定義する。ただし各クラスターは同様に K -CFN である。

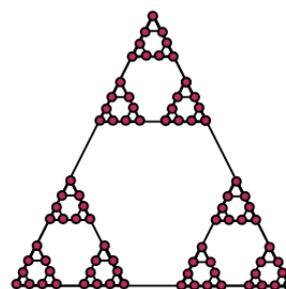


図 1: 3-CFN₃

図 1 は 3-CFN, 図 2 は 4-CFN の例である。それぞれの図では 3 層だけ展開してあるが、このネットワークはフラクタル構造を持つため上下に無制限に展開可能である。この展開した層

の数を明示したい場合はサブスクリプト n を付けて K -FCN $_n$ のように表すことにする。いくら展開しても各ノードからのリンクが K を超えないのが K -CFN の特徴である*1。 K -CFN において K リンクを持つノードを飽和ノード、 K 未満のリンクしか持たないノードを非飽和ノードと呼ぶ。

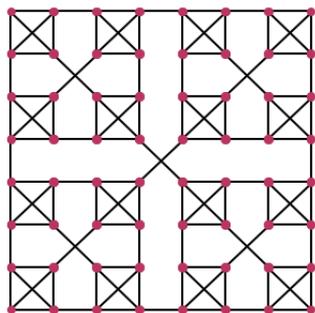


図 2: 4-CFN₃

K -CFN $_{n+1}$ は K 個の K -CFN $_n$ から以下の方法で構成される:

元の K -CFN $_n$ は K 個のクラスターの完全結合になっているから、各々のクラスターから $K-1$ 本のリンクが内部の完全結合用に出ている。つまり各クラスターは非飽和の状態で 1 本のリンクの余裕がある。つまり K CFN $_n$ 全体で K 本のリンクの余裕がある。 K 個の K -CFN $_n$ を完全結合して K -CFN $_{n+1}$ を作るにはこの K 本のうち $K-1$ 本づつ使えば良い。従って K -CFN $_{n+1}$ は同様に K 個の非飽和ノードを持つことになる。

n がいくら大きくなっても常に K 個の非飽和ノードが存在するという性質は変化しない。

K -CFN $_{\infty}$ がフラクタルとなる。ちなみに 3-CFN $_{\infty}$ はシェルピンスキーのガスケット (Sierpiński gasket/triangle. 図 3) と呼ばれているものに酷似しているが、少し違う。シェルピンスキーのガスケットでは内側の 3 つの三角形が角をシェアしている。そしてこの違いは $K > 3$ の K -CFN 以上に相当する Sierpiński 構造が作れない理由となっている。

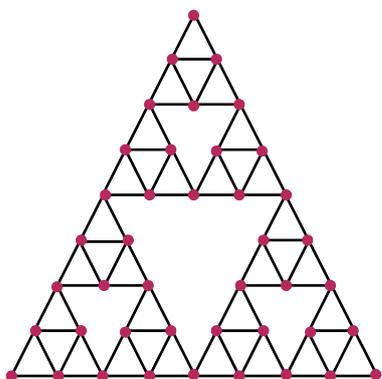


図 3: Sierpiński triangle

余談であるが、 K -CFN の外に 1 個のノードを作り、このノードと K 個の非飽和ノードをリンクすると、すべてのノ

*1 CFN はフラクタルではあるが、スケールフリーではない。

ドが飽和した状態にできる。この「閉じた」 K -CFN' はこれ以上大きくできないが、各ノードを 1 層下のクラスターに置き換えることにより下方には拡張できる。

別の拡張として K 角形の各辺に外接する形で同じ図形を重ねて行く方法 [DGM02] がある。しかしこれはノードのディグリーが有界ではなくなる。

3. セルオートマトンへのマッピング

続いて、4-CFN をセルオートマトン上にマップすることを考える。この理由は (a) (自己言及型) 状態遷移の概念が進化アルゴリズムに馴染むことと、 (b) 近傍という距離概念の導入による探索空間の縮小である。

(a) まだ予備実験すらしていない状態での予測であるが、全空間で同じ遷移規則を持つ進化計算では初期値の振れだけに依存した探索を行わなければならない。それに対し、部分と時間によって異なる遷移規則を導入すれば、単一の初期値から始めてもあらゆる可能性が探索できる。

(b) ネットワークには距離の概念が無いので、探索空間は常に全ノードとなってしまう。これに対しセルオートマトンは近傍だけを対象とすれば良いので探索空間が小さくなる。

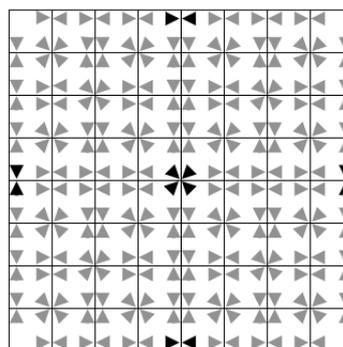


図 4: 4-CFN₃ のセルオートマトン版 (4-CA₃)

さて、図 2 に示す 4-CFN は図 4 のような 2 次元セルオートマトンにマップできる。これは 4-CFN が長いリンクを持たず、2 次元セルオートマトンの 8 近傍へのリンクのみにマップ可能であるという性質が大きい。近傍へのリンクは内部状態として表現する。8 近傍へのリンクの有無を 8 ビットの 2 進数で表すことが可能であるから、 2^8 状態を考えれば良い。 2^8 状態セルの遷移表は 8 近傍と中心セル自体を含め (2^8)⁹ 状態から中心セルの新 (2^8) 状態へのマップとなる。図 5 からわかるように、最終的な形態では各セルからのリンクは 8 方向すべてにランダムに出るわけではなく、限定された 4 方向へのリンクしか存在しないから、うまいメカニズムを考えれば*2 リンクを表すセルの状態は $2^4=16$ まで落とし込むことが可能なのである。

図では隣接セルへのリンクに相当する内部状態を示す為に、その方向への矢印の頭 (三角形) を用いている。たとえば図 5 は 4 セル間の完全結合を表している。図 6 は図 5 のようなクラスターが 4 つ完全結合したものである。クラスター間の結合は濃い矢印で図示している。

*2 ここで余りに恣意的なメカニズムを導入すれば、最早創発ではなく作り込みになってしまう。しかしながら、そのまま野放しに全空間を探索するのは現実的な時間で創発は期待できない。両者のバランスを取ったメカニズムを考えるというのも最初は必要と考えている。一旦多段階創発に成功した後に枠を外して行けば良い。

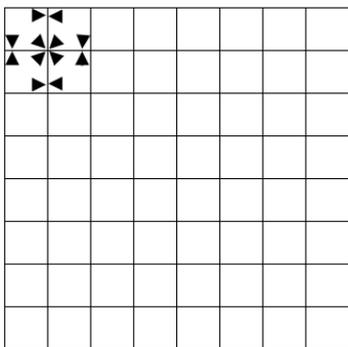


図 5: 4-CFN₁ のセルオートマトン版 (4-CA₁)

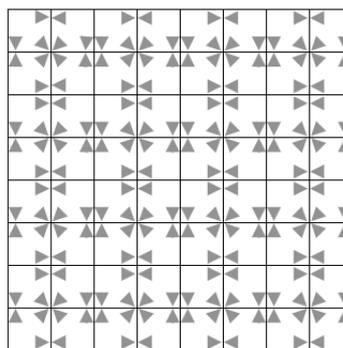


図 7: 互いに結合していな 4-CA₁ が全体を覆っている状態

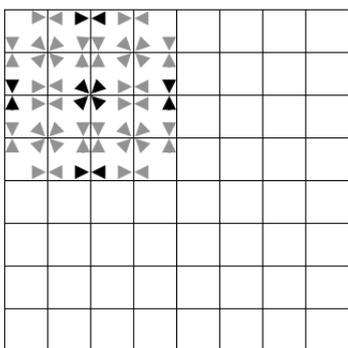


図 6: 4-CFN₂ のセルオートマトン版 (4-CA₂)

必要がある。構造の自己複製ではなく、生成規則の自己複製を試みるわけである。その結果として図 7 のように 4-CA₁ が全体を覆い尽くすのが望ましい。

1 段目の創発に成功したら、2 段目の創発に入る。この部分は自動的かつ連続的に起こることが望ましい。また、1 段目と 2 段目の間に区切りがある必要はない。1 段目の創発が完成するのを待たず（待つという同期はそもそも取れない）に、部品が揃った時点で自動的に上位の創発が起こることが望まれる。たとえば図 8 は第一層に未完成の結合が見られる中、第二層目のクラスター (4-CA₂) が 2 個出現した状態を示すものである。

4. 進化型自己言及セルオートマトン

自己言及セルオートマトンとはセルの状態がセルの遷移規則を表すもののことである。通常のセルオートマトンは大局的かつ固定の遷移規則を持っている。この遷移規則や初期配置を変えながら面白いパターンの創発を待つのが従来の研究手法であった。

基本的には市川らの進化型オートマトン [市川 02] の考え方を導入する。これはセルの状態が整数値という無限状態を持つ（遺伝子情報をコードしたものと見なす）もので、周辺のセルとの相互作用により自己複製する。このようなセルオートマトンのランダムな進化の上で 4-CA₁ の発生を待つことになる。しかしながらこの手法ではパターンの発生を研究者が見守る必要がある。即ちシステムに内在したパターン判別とその固定の機構が存在しない。

そこで我々は自己言及型のセルオートマトンを使うことにした。これはセルの状態がセルの書換え規則をも含む*3 のものである。従って状態が変化すると書換え規則も変化するというメタな構造を持っている。この方式を用いて進化させれば、原理的にはすべての書換え規則を網羅することが可能である。

我々の基本的な戦略はセルの書き換え規則 ($(2^4)^9 \rightarrow 2^4$) をゲーデルコーディングにより自然数に対応させ、セルの内部状態とする。これを進化的アルゴリズムで変化させ、安定した構造のできるのを待つことである（これでも探索範囲が広過ぎる。更なる工夫が必要である）。

次の問題は 4-CA₁ が一旦生成されたらこれを固定することである。安定した構造ができたら（即ち、そのような構造を生成する遷移規則が固定できたら）この規則を周辺に広げて行く

*3 従って、本論文の他の部分では遷移規則と呼んでいる。

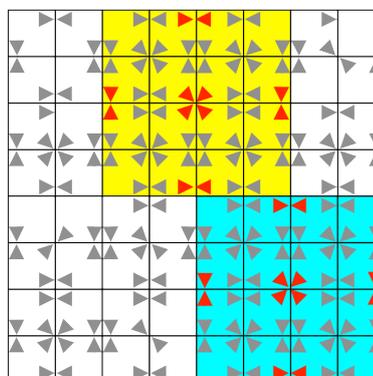


図 8: 一部の 4-CA₁ が出来た状態で 4-CA₂ が出現している様子

図 8 からわかるように、セルオートマトンでは位置のズレも問題になる（元のグラフ構造上では位置の概念が無いので問題にならなかった）。多数のユニットが横に移動して整列するメカニズムも必要となって来る。

5. まとめと今後の展開

本論文では多段階創発を実現するための構想を示した。多段階創発を起こす為の最も簡単な方法は再帰的な構造を用い、各段階で同じ種類の機構を用いることである。そのために完全フラクタルネットワーク (CFN) の概念を導入した。クラスターが 4 ノードからなる 4-CFN は 2 次元セルオートマトンとして実装可能である。距離の概念を持たないグラフに対し、近傍が定義できるセルオートマトンは、探索空間を大幅に小さくすることが可能である（それでも巨大で、もう一工夫必要である）。

2 次元の進化型自己言及セルオートマトン上で 4-CFN の創発を試みる。4-CFN₁ の創発と自動固定が最初のターゲットで

ある。これに成功すれば、次は 4-CFN₂ を狙う。しかしながら、これらに関する細部のメカニズムと実証は今後の課題である。

謝辞

中島と由良は科研費 23611027, 篠田は科研費 24300064 の支援を受けている。

参考文献

- [DGM02] S. N. Dorogovtsev, A. V. Goltsev, and J. F. F. Mendes. Pseudofractal scale-free web. *Phys. Rev. E*, Vol. 65, p. 066122, Jun 2002.
- [Nak06] 中島秀之. 構成的情報学と AI. 人工知能学会論文誌, Vol. 21, No. 6, pp. 502–513, 2006.
- [Nak08] 中島秀之, 諏訪正樹, 藤井晴行. 構成的情報学の方法論からみたイノベーション. 情報処理学会論文誌, Vol. 49, No. 4, pp. 1508–1514, 2008.
- [Nak09] Hideyuki Nakashima. On methodology of constructing multi-level emergent systems. In *Proc. of 3rd Int. Workshop on Emergent Intelligence on Networked Agents (WEIN'09)*, May 2009.
- [市川 02] 市川惇信. 複雑系の科学—セル・オートマタ体験 CD-ROM 付. オーム社, 2002.