

人工生命とセルオートマトン

日本原子力研究所

エネルギーシステム研究部

将来型炉研究グループ

鈴木 知明

Email: suzudo@clsu3a0.tokai.jaeri.go.jp

なぜセルオートマトンか？

生命体を細かく見ていくとそこには精密機械のような無生物的なダイナミクスが見い出される。そこには感情も意志もなく、あるのは物理や化学の法則のみである。しかしそれらの精密機械は、何らかの仕方によって統合されると、全体として生命体を形成する。すなわち生死の属性を持つ系となる。どのような条件が満たされる時、無生物的なダイナミクスの組み合わせが生命体となるのだろうか。生命体とそれ以外のものをわけるものは何か。現在の科学水準はこれらの疑問に答えることができない。

このような疑問を解決するためにはどのような研究を行うべきだろうか。分子生物学は、無論、その研究の重要な位置を占めている。しかしながら、分子生物学は地球上に生息しているまたはかつて生息した生命のみを研究対象にしているが、生命の定義に範疇に入るものはそれだけではない。地球上の生命群は、ある特殊な条件のもので、様々な偶然の積み重ねによって形成された生命群のたった一例に過ぎない。もし地球の環境がほんの少しだけ違っていたなら、別のインスタンスが得られていたはずである。現実問題として、たった一つしかない地球型生命がこの研究に大きな示唆を与えることは間違いないが、その外側の集合にも意識を持つことにより生命の一般的性質、すなわち生命の本質が議論できる。

それでは生命の本質と思われるものにはどのようなものがあるだろうか。これを論じることも容易ではないが、例えば以下のようなものが挙げられる。

- a. 自己複製能力がある。
- b. 遺伝子を持つ。
- c. 進化する。
- d. 環境に適応する。
- e. 生き残ろうとする。
- f. 代謝機能がある。

a から f までの項目は十分でもないし、冗長な部分もあるだろう。またこれらの中には、生命の本質ではなく地球型生命だけが偶然に共有しているものもあるかもしれ

ない。これらの項目は広い意味で知能¹とすることができる。そしてこれらの「知能」は与えられたものではなく自然に形成されたものである。すなわち生命の本質は**自発的知能**であると私は考えている。そして「知能」の形成は微視的には化学反応によってもたらされる。ただし、分子生物学的にこのような微視的過程を探すのかなり困難である。というのはそこではすでに出来上がった生命を観察するのみで、細菌の進化等の研究を除けば、生命の動的側面を見ることはできない。それでは計算機を用いて生命現象を模擬すればいいかというと、まだ生命に関する情報が少なすぎて真っ当なモデルはできないし、例えできたとしても現存の計算機の実行は無理である。そこで化学反応を正確に模擬するのではなく、それらと本質を共有する人工反応を創りそこから自発的知能の形成を試みるという方法になる。

セルオートマトンは格子状に離散化された空間上のダイナミクスで、各格子すなわちセルは整数状態を持つ。各セルはそのセルの状態と近傍の状態によって自分自身の状態を特定のルールに従って更新する。一般的なセルオートマトンではすべてのセルが同時に更新され、ルールも空間全体に同じルールを適用する。セルオートマトンの最も重要な特徴は近傍の状態を用いてダイナミクスが定義されていることであり、このため人工的な化学反応系を実現するのに適している。以上がこの研究にセルオートマトンを使う理由である。

セルオートマトンの歴史

セルオートマトンはもともと1940年代末に生物の自己複製機能を模擬するために、数学者のウラムとフォン・ノイマンによって提案された[1]。すなわちセルオートマトンは人工生命を研究するために生まれたわけである。1960年頃にはフレドキンがフォン・ノイマンが考案したものよりも非常に簡便なルールで自己複製するセルオートマトンを発見した[2]。また1970年頃、イギリスケンブリッジ大学の数学者コーンウェイは最初非常に単純なパターンが大規模で複雑なパターンに成長していき、なおかつどのパターンが成長するのかが決してわからないようなセルオートマトンのルールを試行錯誤しながら探し当てた[2,3]。これは生命体のような予測不可能性を有していたため、Game of Lifeと名付けられた。1980年代にはウルフラムが1次元セルオートマトンを4つのクラスに分類することを提案し、秩序状態とカオス状態の中間に相転移が存在し、そこでは予測不可能な状態が得られることを主張した[4]。この主張はラングトンが各セルオートマトンにおいて一意的に決定できるパラメータの研究によって裏付けられた[5]。パラメータとは次の更新後に任意のセルが空状態(0状態)にならない確率を表したものである。この値が小さければ、空間内の空状態は時間とともに増加し、最後は空間全体が空状態になるか、局所的に少

¹ 97年の本研究会で「能力」と呼んでいたのを今回は知能と呼ぶことにした。

数のセルからなる「島」ができる。逆に大きければ、空間全体に占有状態のセルが拡散する。そして中間の μ 値において予測不可能な、すなわち縮小か拡散かどちらとも言えないような臨界状態が存在することがわかった。彼はこの臨界状態を「カオスの縁」と呼び、生命はカオスの縁から生まれると主張した。以上のようにセルオートマトンによる人工生命研究は最初自己複製能力の研究であったが、しだいに生命の予測不可能さに関する研究となってきた。この予測不可能性は、例えば、進化や適応を行うために生命系が固定されたパターンに恒久的に引き込まれるのではなく常に何らかの意外な逃げ道を用意するために是非備わっていないからである。

セルオートマトンの結晶化 [6]

一方、生命体には必ず内と外の区別、すなわち外殻が存在する。これは外敵から身を守るためや代謝機能に必要とされる。よって生命には長期的には予測不可能性を持つとしても、短期的には定常的な構造が形成される必要があり、結晶化が必要である。また、DNA 等の生命に不可欠な高分子も規則的な結晶になっている。すなわち生命には予測不可能さと同時に、結晶を自己組織化する能力が必要である。Fig.1 は単純な結晶化を起こすセルオートマトンの例である。最初、乱雑な空間が徐々に秩序化されているのがわかる。このような結晶化を起こすセルオートマトンのルールに共通する性質を探したところ、パラメータではなく、別のパラメータ (μ と呼ぶことにする) が関連していることがわかった。 μ パラメータは任意のセルが次の更新後に変化する確率である。これが小さい場合には、時間とともに空間全体がすぐに静的状態になってしまう。ところが大きい場合には、いつまでたっても静的状態にはならず、カオス状態が続く。中間の μ 値では、Fig.1 のように局所的な静的状態が徐々に空間全体に広がる。これは静的状態になり得る局所パターン数が限られているからである。また、パターン数が限られていれば空間全体が規則的になる原因ともなる。すなわち、 μ 値を変化させるということは静的局所パターン数を変化させることに他ならない。このパターン数がある臨界値より少なければ、それらはセル状態を変化させようとする勢いに屈して、空間全体にカオス状態が広がることになる。よって μ 値は温度の役割をもっていることになる。

自然界の化学系で結晶化は巨視的には相転移によって引き起こされる。また微視的には、すでに固化した部分に一致したパターンのみが新たに固化されることによりマクロな範囲に渡って規則正しい結晶化が形成される。よってセルオートマトンの結晶化は巨視的にも微視的にも自然界のそれと酷似している。そして、量子力学的な厳密さなしでもセルオートマトンでは結晶化の本質的なメカニズムのみが浮き彫りにされていることに注意して欲しい。すなわち、結晶化セルオートマトンは「地球型」の化学現象だけではなくその外側の集合にも意識を持つことによりその化学

現象の一般的性質、すなわ本質が議論できる好例になっている。

これをもってすべての化学系がセルオートマトンに置き換えられることにはならないが、ルールを上手に選ぶことにより自然界と同じような化学現象を人工的に創出できる可能性は示せた。

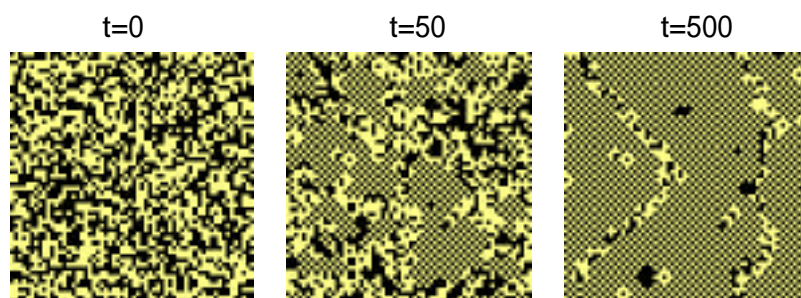


Fig. 1 結晶化セルオートマトンの時間変化

複雑な人工化学系をどう作るか？

これまで議論されてきた複雑系のセルオートマトンの典型例は Game of Life[2,3]であり、この場合セルは「空」または「占有」の2状態を持つ。また、Brian's Brainで代表される Generations タイプでも「空」と「占有」状態がある。「占有」状態には「出生」してからの「年齢」が定義され、それによっていくつかの状態にわけられ、「占有」状態はある年齢に達すると「空」になる。また、Cyclic セルオートマトン[7]では0から n までの状態が高低を表す段階を示し、音階のように周期的になっている。これは見方を変えれば Generations と同じと考えられる。また、Hodge Podge Machine[8]では、「健康」な状態と「病気」の状態、およびいくつかの「感染」状態と呼ばれる中間状態を持つ。視点を「病原菌」に移せば、これも「空」といくつかの「占有」状態である。以上すべてのセルオートマトンに共通して言えることは、「占有」状態を占有している実体は常に同じである。これに対して、生体系の化学現象には様々な種類の分子が関与している。よって、どのような分子に「占有」されているかが問題となる。すなわち、上記のようなセルオートマトンを追っているだけではなかなか生命現象のような人工化学系は作れない。

そこで筆者は全く別の種類の占有状態をもつセルオートマトンを考えることにした。ここで問題になるのが、生命の必要条件であると考えられるカオスの縁を見つけるにはどうしたらいいかということである。上記のような一種類の「占有」状態をもつセルオートマトンの場合には、前述したパラメータを調節して適度に占有状態が「出生」および「死亡」するようにすればよい。しかしながら、異なったいくつかの「占有」状態を持つ場合には、そう単純ではない。

筆者の一つの提案は集団生物学的なセルオートマトンをつくることである。動物

は通常集団を形成し、生き残りを指向し、適応性を身につけ、集団全体が進化していく。すなわち、生物集団はあたかも1個体の生物のようである。空間内に「空」状態と異なった動物によるいくつかの「占有」状態を定義し、それぞれの動物に役割を持たせる。このようにすれば、パラメータほどではないがある程度直感的なルール探索ができる。筆者は捕食-被捕食関係をセルオートマトンのルールにしてみた。そしてカオスの縁に到達するために、例えば、捕食者があまり増え過ぎないように、またあまり被捕食者を食べ過ぎないように調節した。その結果、Fig. 2に示された様に様々な興味深いパターンを示すいくつかのルールを得た。

まだ一般的な議論をすることは時期早尚ではあるが、集団生物学等の様々な階層の生命系のモデルを論じることは人工生命研究の一つの方法論かもしれない。よって社会や経済システムのモデルからもヒントが得られるかもしれない。

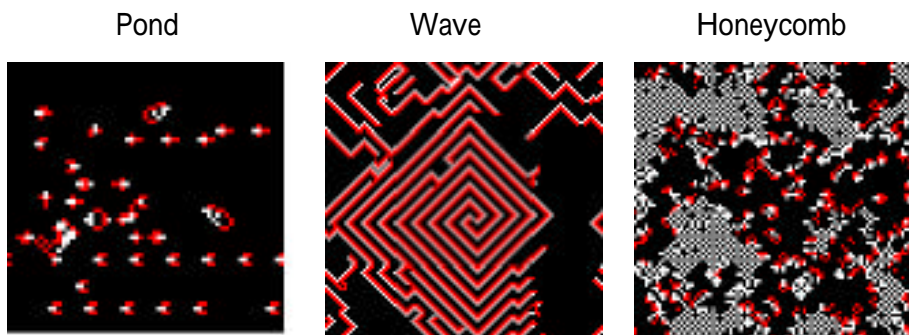


Fig. 2 捕食者-被捕食者セルオートマトンから得られる様々なパターン。黒セルは「空」、白セルは「被捕食者」、赤セルは「捕食者」。

まとめ

前述したように生命にはパラメータの相転移だけでなく同時に μ パラメータの相転移が必要である。それどころか生命には様々なパターンの結晶化が必要であり。それは骨や筋肉のように生命体中の位置によってパターンが異なったり（空間依存性）、一度結晶化されたものが流動化されまたべつの結晶を作ったり（時間依存性）等、様々な変化が必要である²。以上のようなことは λ の臨界と μ の臨界の共存だけでは説明できず、より高度なダイナミクスが必要とされる。筆者は現在、空間内で単独のルールだけでなく複数のルールを使うダイナミクスや、ルールが進化するダイナミクスなどを検討中である。

² 「時間依存性」は日本の複雑系研究者たちが命名したカオスの遍歴と同じ概念である。

参考文献

- [1]. von Neumann, J. "Theory of self-reproducing automata", edited and completed by A. Burks, University of Illinois Press, Champaign, IL (1966).
- [2]. Gardner, M. "Mathematical games", 1971 Sci. Am., 224 February, 112-117.
- [3]. Gardner, M. "Mathematical games", 1970 Sci. Am., 223 October, 120-123.
- [4]. Wolfram, S. "Universality and complexity in cellular automata" , 1984 Physica D, 10, 1-35.
- [5]. Langton, C. G. "Computation at the edge of chaos: phase transition and emergent computation", 1990 Physica D, 42, 12-37.
- [6]. Suzudo, T. "Crystallisation of two-dimensional cellular automata", Complexity International, Vol. 6 (1999).
- [7] Dewdney A. K. "Computer recreations", 1989 Sci. Am., 261 August, 102-105.
- [8] Dewdney A. K. "Computer recreations", 1988 Sci. Am., 259 August, 86-89.