タイル・オートマトンと生命の起源

山本知幸
東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻 相関基礎科学系[1] E-mail:
yamamoto@complex.c.u-tokyo.ac.jp

1 イントロダクション

「生きている状態とは何か」、何故自分が生きているのか、不思議に思うことがよくある。分子生物学の発展が主役となった現在では、その仕組みは見えてきたものの、却って謎は増すばかりである。どうやって、多様な機構をコンパクトな形態にまとめ上げているのか。それは飛行機恐怖症者が口にする、「金属の塊が空を飛んでいる」ことよりも謎である。

生物を分解してゆくと、部品らしきものは見える。システムから切り取られた細かい部分は理解できるにせよ、そこからその全体の動作を上手く想像できるかというと難しい。今のところ細かい機能が明らかになればなるほど全体像を想像するのが困難になってしまっている。良くデザインされたメカニズムのように、全体がどう組み合わされているかを見通せた時の驚異を感じたいと願っているが、それは何も手を下さずに見ているだけでは無理なことだろう。

勿論、生命というものが、いわゆる機械的なものとして理解できるかどうかは疑問である。とはいえ、なかに神が宿ったりしている訳ではないので、何らかのメカニズムを仮定せざるを得ない。ということは、機械かどうかを問うよりも「どういう機械か」ということを考え直す所から始めたいと思う。新たな意味での、メカニズムの塊としての生命というものを見たいという欲望がこの研究の動機である。

2 モデル

Tile Automaton[1][2] の世界の中では、形をもったタイルが動きまわっている。面素であるセルが集まり、形をなすものをタイルと呼び、タイルは一体となって運動する。タイルの速度と座標は実数で表現されているが、反応や衝突判定は離散化された座標で行われる。

タイルが動きまわるということは、まず「形」と「運動」の2つの側面を持たせているということになる。他のタイルと衝突すると反応をおこして形を変えるが、その時に周囲の状況にかなり依存するようになっている。状況によってその形の持つ意味を変え、それによって後に影響を及ぼし状況自体を更に変化させるという仕掛けが、ここで作り込まれている。

反応のルールなどのデザインにおいては、複製などの自明な結末に落ちないように注意した。なるべく予想を不可能にするような、ロジックに書いて理解することが出来にくいようなものを選んでいくうちに現在の形に落ち着いたものであって、ユニバーサルな原理に基いて構築されたものではない。あくまでも経験的なものの集成である。

なお、モデルには2つのバージョンがあり、それぞれ「空間版」、「タンク版」と呼ばれている。前者は空間中をタイルが動きまわるというオリジナルのモデルであり、後者は運動の効果を評価するために、リストの中からランダムにペアを選んで反応させるものである。運動以外の部分 (反応など) のルールは共通である。タンク版については [3] を参照のこと。

2.1 反応ルール

反応のルールは、基本ルールといくつかの補助ルールからなる。

[1] 97年4月より北海道大学理学部

1. 基本ルール

(a) inversion rule: タイルが接触した面 (colliding side) の近傍 (reacting zone) の状態を反転し、セル (面素) が生成 / 消滅する (図 1)。複数の箇所で接触している場合や、複数のタイルが接触している場合は、それらの reacting zone の和をとって、同様に反転させる。

(b) joint rule: 反応に加わっていない近傍のタイルと、反転して生成されたセルが接触している場合があるが、その時は結合させる (図 2)。これにより、大きな領域が一つのタイルとして結合する場合もある。

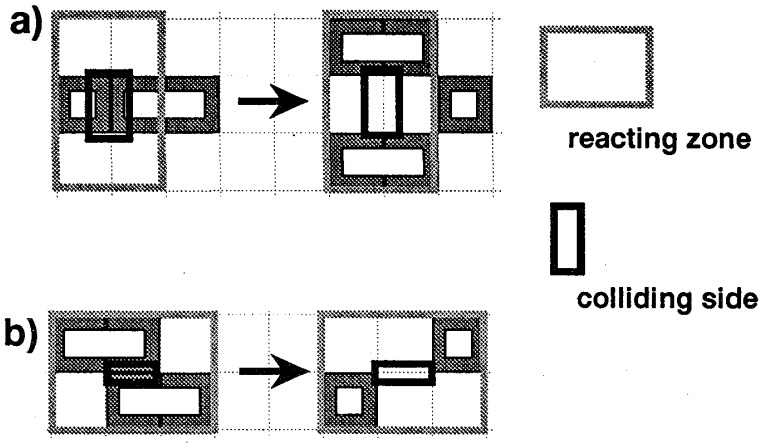

図 1: 基本ルール 1。セルの占める面積は保存しないことに注意

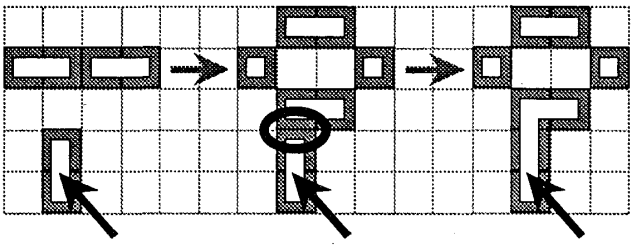

図 2: 基本ルール 2。矢印で示したタイルは反応には参加していないが、反応でできたタイルと結合している。運動量は平均される

2. 割合ルール

基本ルールを適用する前に、このルールにより反応するか否かを決定する。反応しない場合は、解離する (詳細は後述)。ここでは、その名の通り reacting zone 内にあるセルの割合で反応を許可する。パラメータは反応が起きる上限と下限を決め、それぞれ r_H、r_L とする。$(r_H,r_L)=(0.5 \sim 0.6\ ,\ 0.0 \sim 0.2)$ 程度とするのが標準的であるが、とくに断わりがない場合は $(r_H,r_L)=(0.55, 0.0)$ である。下限はあまり影響しない。(図 3参照)。

セルの状態が反応によって反転することから、reacting zone 内のセルの割合が 0.5 を境にして増減する事が分かる。r_H が 0.5 である場合は、セルは減少しないことは自明である。また、増殖のコントロールの他にこのルールにより複雑な構造を獲得することができる。あまり多くの

セルを消してしまうと構造が消えてしまうという事もあるが、より重要なのはタイル同士の接触が許されるという事である。接触できることで、反応する時の位置関係の可能な組合せが爆発的に増える。これは、基本ルール2と併せてエントロピーの底(最大量)を掘り下げることになる。また、多数のタイルからなるクラスターでは、ある部分での接触が他の部分の反応をコントロールするので、メカニカルな動作やメモリーを作る事が出来る。そのために実際の機構的複雑さも増大しているといえる。

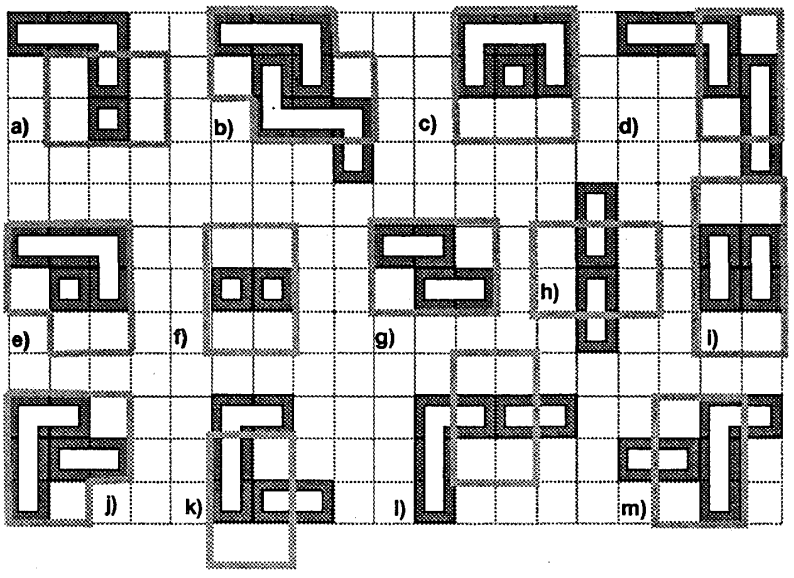

図 3: タイルの接触の例。同じタイルでも位置によって reacting zone に占める面積が違うのに注意。それぞれのセルが reacting zone に占める割合は、 a: 2/6, b:8/10, c:6/9, d:4/6, e:5/8, f:2/6, g:4/6, h:2/6, i:4/8, j:6/8, k:3/6,l:2/6, m:4/6 である。

2.2 運動のルール

空間版では、タイルの動ける世界の境界条件はオープンになっており、世界の縁に触れたタイルは消滅する。つまりこの世界では、タイルが継続して生産されていないと、「死んで」しまって世界は空になる。

進行方向が他のタイルにより邪魔されていないかぎり、タイルは全て並列に運動する。各タイルの持っている速度と座標は実数の値を持っているが、衝突の判定や反応はすべて離散化した座標によって行なう。反応ではセルの数が増減するが、消されたセルの持つ運動量を生成されたセルに等分配して運動量を保存させている。また、運動の時点でタイルが交差しないように、時間刻幅を調節して最も速いタイルが各時刻に一コマ以上動かないようにしている。

1. 反射
   割合ルールにより反応が抑制された場合は弾性衝突させる。これは、タイルがクラスターをなしていた場合でも崩れたりデッドロックして動けなくなったりするのを防いでいる。また、ここでタイルの形が運動の境界条件として使われており、形態と運動とのインターフェイスになっている。

2. タイル間の相互作用
反射によりタイルが反応を起こす前に離れてしまう可能性がある。また、境界が開いているために、何らかの熱源を仮定しないとこぼれ落ちるタイルのために世界の運動量が減少し、ついにはタイルが停止してしまう。

それらを解決するために、タイルの間に線形バネによる相互作用を設定した。バネは第三近傍まで働き、自然長を 2.0 としてある。第二近傍までは斥力で、第三近傍のみ引力となっている。また、バネ定数 k の標準値は 0.1 とした。(なお、文献 [1][2] ではこの部分の記述が「反発力」のみとなっているが、これは誤りであり訂正します)。

反応によってバネの数は増減する。このために反応の前後でエネルギーは保存されない。これは吸熱・発熱反応が起きていることに相当する。このことは非自明な形ではあるが、熱源の役を果たし得る。

3. 抵抗
基準速度 v_{ref} を越えたタイルはその超過分に対し速度に比例する抵抗をうける。ここでは $v_{ref} = 1.0$、比例定数 $\nu = 0.5$ を標準値とした。

3 結果

境界条件がオープンであるために、タイルの生産が止まると世界は空になってしまうので、結果は明確な差異として見ることができる。ここではタイルが継続的な生産を行なって、無限に増殖し続ける構造が出現した。セルの数が増えることは許容されているが、継続的な生産は非自明な結果である。図 4にその時間発展を示した。

時間発展の経過を簡単に記すと、以下のようになる

1. 初期条件として、単純なタイルが少数ある状態から始める (時刻 0)

2. 小さなクラスターが出来る (時刻 100)

3. クラスターは成長したり、世界から流れ落ちたりする。クラスター内での位置関係によっては、ほとんどのタイルが一つにつながってしまうことがある。この場合は、周りにタイルがないので、流れ落ちるのみになる (時刻 100 から 300)

4. 成長したクラスターがいくつか交わって、継続的な生産をする構造が形成される。このプロセスを “factory” と呼ぶことにする。時刻 600 で、図には他の大きなタイルも見えるが、それらは孤立しているのでもはや生産する事はない。

5. ただし factory は長く生産を続けているうちに、内部が詰まってしまって生産に寄与しなくなる。生産は周辺部のみで起きている

factory とはプロセスに付けられた名前であり、ある特定の構造を示すわけではない。初期条件により、現れる factory はそれぞれ異なる。ただし、factory を形成する初期条件には、大した制約はない。充分な原料 (つまりセル) が用意されていれば、比較的短い時間に factory が形成されるのをみてとることができる。基本ルールにより、タイルの形は激しく変えられるので、必要な形態はすぐに作られてしまうものと考えられる。

増殖が起きる様子をみてしまうと当り前のように思えるが、これが非自明なものであることを示すために、少し系に摂動を与えてみよう。図 5に示した時間発展は、先の例と同じ初期条件にから矢

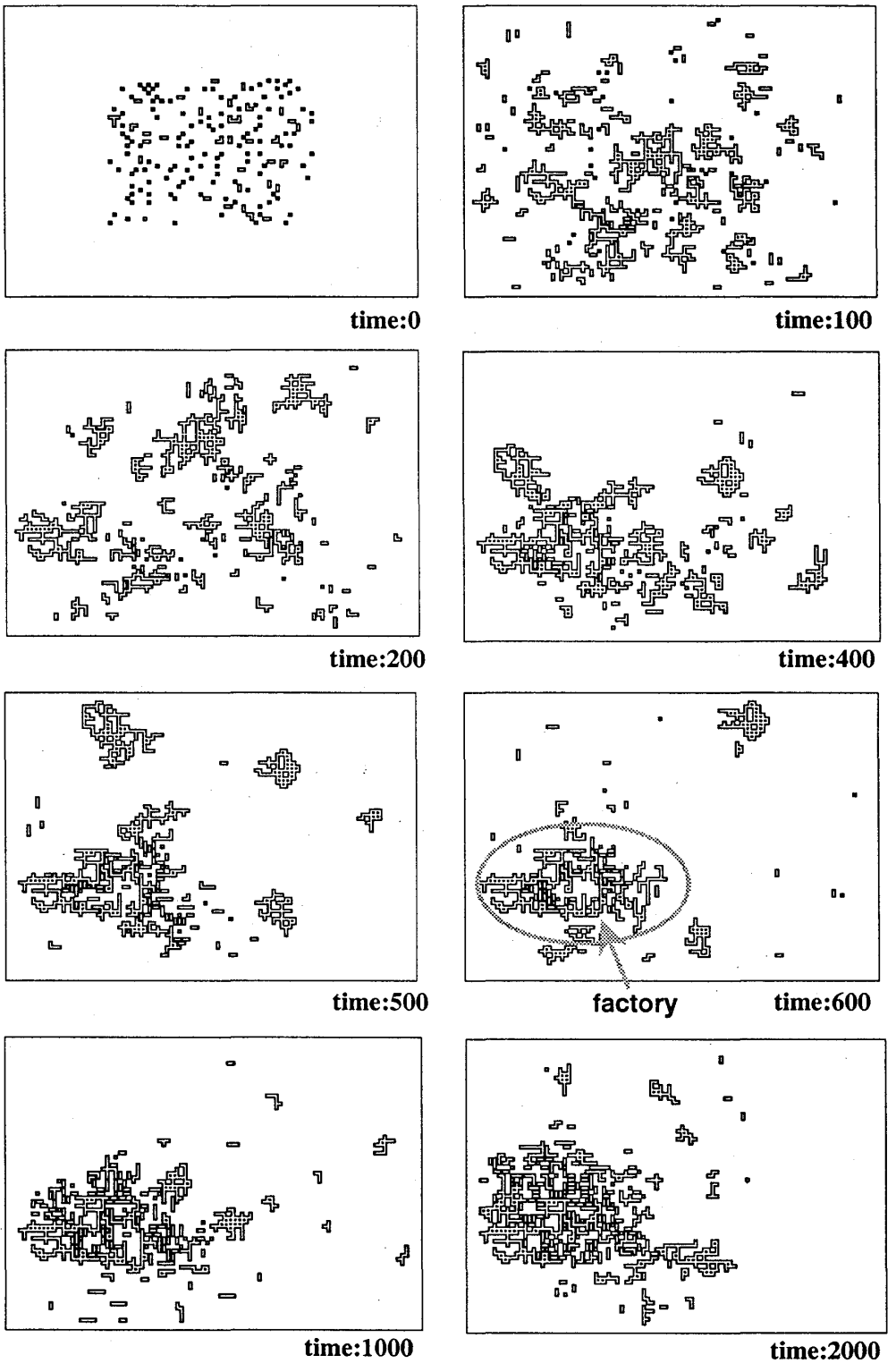

図 4: タイルの継続的な生産。時刻 600 の囲みは factory を示す。

印で示された1つのタイルの速度を少しだけ変えたものである。時刻100までは充分発達したクラスターがみられるが、時刻300以降衰退を始め、時刻500ではもう「死ぬ」寸前である。

このことから、このモデルにも、カオスのような初期条件に対する強い依存性があることが示された。この初期条件はfactory生成の下限付近であるため、とくに影響が大きくなっている。速度を変えるだけではなく、タイルを一つ足すとかしても、factoryが出来なくなる例が見出されている。この場合は単に材料が増えたというわけではなく、重要なプロセスを阻害してしまったのだと思われる。

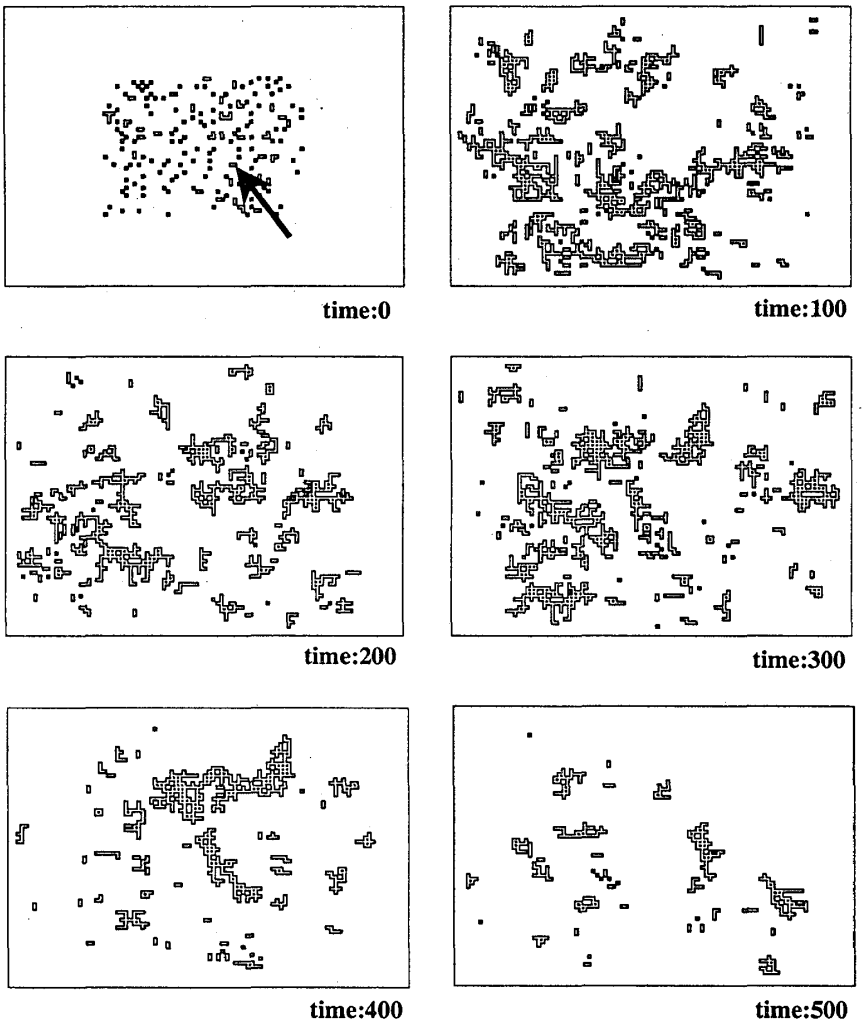

図 5: 初期条件における僅かな差が大きな変化を引き起こす。ここでは、矢印で示されたタイルの速度を少し変えている。その他は全て図4と同じである。

また逆に、factoryが出来てから壊してみるという実験も行なってみた。タイルを10ないし20%程度取り除いて壊してみても、元通りにはならないものの、再構成して生産性を回復する事ができた例は容易に見出す事は出来る。ただし、その抜き取り方にも依存するので、定量的に特徴付けられた結果ではない。形成に至るまでには不安定性はあるが、一度できてしまったらある種の復元可能性を持っていると考えられる。

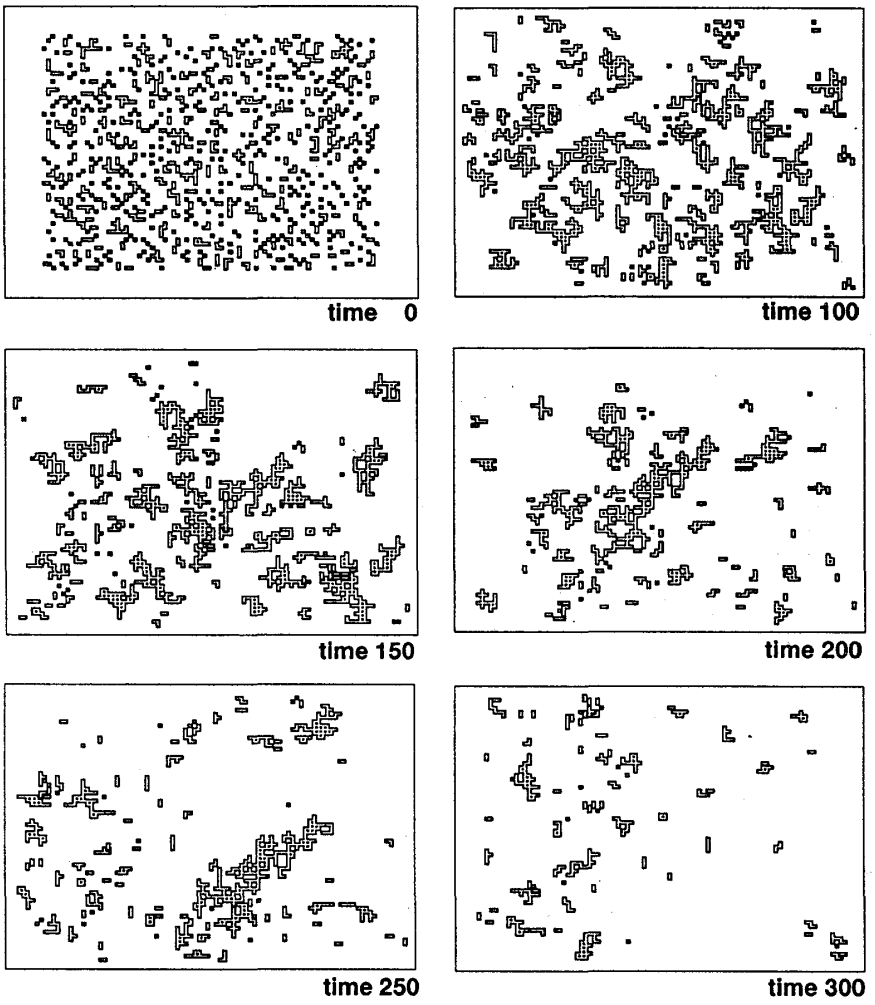

図 6: 速度を $\delta v = 0.2$ の解像度で量子化した。タイルの形は多様になるものの、継続した生産が出来ないので、容易に世界は空になってしまう。初期条件では、1000 セルおいているが、通常はすぐに factory が形成されるくらいの量である。

4 考察

このモデルの、強力な生産力の原因をまず考える。ライフゲームなどの CA との違いを確かめるためもあり、速度を離散化してみた。ここでは、速度の量子化幅を 0.2 にしたものを図 6に示した。有限とはいえ、各方向に 5 状態持っているので 25 状態位は持っていることになる。しかし、図をみると形は多様化しているものの factory を形成することが出来ずに世界は空になってしまっている。

例えば CA のような有限状態のモデルでは、一度周期状態に入ってしまうと、もはや抜け出すことが出来ない。そのために、タイルの場合では世界の縁から落ちるまでにすることの出来る反応が限られてしまう。たとえタイルの形は多様であっても、多様であるということから反応の経路を拡げるという方向へのフィードバックが働かないと、多様な形である「意味」がなくなってしまう。つまり、位置の違いから情報を引き出せなくなっているということではないかと考える。運動の複雑さが形の複雑さを生み、さらに運動を変え……というループが、断ち切られてしまっているようである。

4.1 "mixing of contexts"

そういった発展機構をどうやって評価すべきだろうか。ここで、mixing of contexts という概念を提案している。ここでいう「文脈」とは、ローカルなスナップショットから予測できるシークエンスや、個々のモジュールにおけるプロセスを指す。それらの文脈が相互作用によって互いに独立性を保ちつつ、変化する文脈を作り出しているということである。

文脈間で実時間的なフィードバックがある事により、各々の文脈での自明な安定解に捉われずに、広い空間を探索して非自明なプロセスを作る事が出来ているようである。そのプロセスが一つの新たな文脈となるくらい固定化されれば、継続的に発展する真に進化的なシステムが実現され得るが、それはまだ将来の話である。

では、タイルの場合にどうやって文脈の混合が起きるかもう一度まとめてみよう。まず第一に、タイルは「形」と「運動」の2つの異なる性質を持っている。タイルが動くことによって、タイルの位置関係が変わって反応が起きるなどする。反応によって形が変えられると、運動の境界条件も変わるのでその影響が位置関係に及ぶ。このようにして、形態と運動の間に反応というインターフェイスが介在する形になっている。

例えば、局所的にはタイルが何をしているか見てとれることがある。

- 分解
  割合ルールにより、複雑な形状をしたタイルは反応を起こし難いが、それでも先端などの弱い部分から攻撃されると分解されてしまう (図 7)。

- 生産
  基本ルールでセルの数が保存していないため、反応によってセルの数が増えることがある。タイルが結合して伸びることは少なく、多くの場合は小さなタイルがばらばらに現れる。これらの小さなタイルは込み合った中でも容易に移動できるので、factory の外にも抜け出ることが出来るので、スナップショットでは factory の生産性の現れとなる (図 4など)。

- 結合
  うまい位置関係や基本ルール b(joint rule) によって、タイルが結合して長く伸びることがある (図 8)。空間版では、クラスター内では密集しているので joint rule による結合が多く、逆にタンク版では反応によって重合できるような機能が出現している [3]。

- 絡まり
  結合で伸びたタイルは、複数のタイルを引っかけてつなぎ止められるようになる。これがクラスターの核となり、継続した反応を起こせるようになる (図 9)。ただし、あまり密集してしまうと、デッドロックして身動きがとれなくなってしまうことがある (図 10)。

幾つか注目するタイルを固定して時間に沿って見てゆくと、上で挙げたようなプロセスが切り替わりつつ進行してゆく。例えば、分解 → 生産 → 分解 → 結合 → 分解 → 絡まり → 結合 → $\cdots$ というシークエンスが見えることになる。しかし、別のタイルに注目するとそこには別のシークエンスが見出され、時にはそれらが交錯して干渉が起きたりするので、これらの文脈には独立性はない。このため、全体を幾つかの文脈の単純な和として捉えることは出来ない。

初期条件での材料が少なく factory の形成が難しい領域での形成過程をみると、一つのクラスターが単調に成長してゆくよりも、独立した小さなクラスターが複数合体したりすることが良く見られる。各々のクラスターで起きる反応ではセルは増えるものの、デッドロックを起こして身動きが取れなくなったり、逆にくっついてタイルの引っ掛かりがなくなるなどして解離を起こす。少数のタイルからだけでは容易には factory には成長できない。しかし、複数のクラスターが、あれば、吐き出された

り解離してきたタイルを通じて相互に刺激しあう事ができる。それによりデッドロックから復帰し生産を再開する事は容易で、factory が形成される過程で良く見られる。最終的に一つに混ざりあってしまうものの、これもクラスターという文脈 (になりかけの構造) の mixing of contexts 的な効果と見てとることができる。

一つのクラスターが自己複製などの完結した機能を持っているならば、クラスター間の相互干渉は、機能をインタラプトするためにそれを破壊してしまうことになる。しかし、それぞれの機能が不完全であることにより、システムとしての発展性を持っているように思える。自ら発展する為には、自分の動作の記述を持つことが出来ないので、まず動作を行ってしまうことが必要になる。機能は動作にあとから意味が付随して形成されるものと考えられるが、そのためにも意味を創ることに意義があるような多様な状況が現れる余地が無くてはならない。しかし、これは固定された機能をもったようなシステムには現れない (もしあるとすれば、外乱などによって機能が破壊された場合だろうと思われるが、結局強制的に「不完全」な状況にされている)。このように動作の多様性と機能の不完全性は表裏一体であり、それが発展のための原動力になっているのではないかと考えている。例としては、factory 形成過程のクラスター間の相互刺激による生産性の維持が見られる。しかし、それ以上に機能的な現象は見出されていない。

現状では、「何かがありそう」に多様な運動を作り出せていても、「それが何であるか」を見出していない。例えば 2 つのクラスターが衝突したとき、現状では融合するのみだが相手のプロセスを「制止」したり、何かを「伝達」したりするように見えるためには、まず境界がなくてはならない。factory が単調に肥大化せずに、ある程度の大きさに留まり、分裂して増えるなどのプロセスを起こすことが、その最初のステップとなるだろう。

4.2 生命の起源へ

生命が、最初からシステマティックな存在であったとは考えられない。ばらばらに起きている多分は低分子の反応の集合から、ようやくのこと機能を持った分子が現れて酵素や膜、果ては遺伝システムの様な機構を自ら創り上げていったと考える方が自然である。それらの構成要素が別に最適化されていたと考える必然性はない — 無論、ある程度そうなっていないと残ることはできないし、より「よい」ものができた時は置き換わるとみて差し支えない。また、何か目的論的な原理に基いていたと思われる可能性もない。

ここでは、分子の集団が機能的な反応をつづけることで、その構造を維持しつつ継続的な生産を行なうプロセスが出現したが、これは生命の起源の最も低いレベルのものと考えている。特定のものを作れという命令には応じられないものの、多様な形や大きさの分子 (タイル) の生産ができるようになった所で、生命の起源の問題に対する構成的な解明のスタートラインに達したと考えている。今後は、よりタイルの「機能」というものが明確になってくるようにモデルを発展させてゆくようにしたい。そのために考えているのは次のようなことである。

- タイルが交差できるようにする
  現在のモデルでは、タイルがクラスターになってデッドロックして動けなくなってしまっていることがある。このタイルの渋滞が factory が肥大化してしまうなど、自明なクラスタリングと生産活動の差がスナップショットからではわからないなど、結果を見えにくくしている。また、輸送という作業が出来なくなっているので、膜のような大きな構造が作られるのを抑制してしまっているようである。

- エネルギーのような、新たな意味論の評価軸を導入する
  エネルギーの「生産」を測っても今の所あまり意味はないと思われるが、反応において別の局

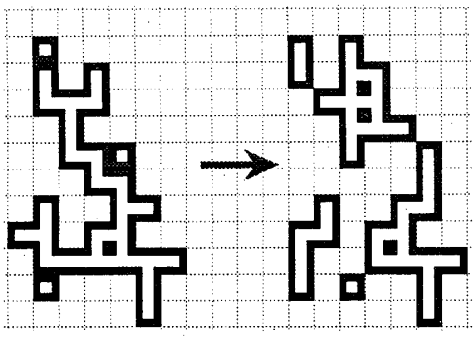

図 7: 大きいタイルは反応で分解される

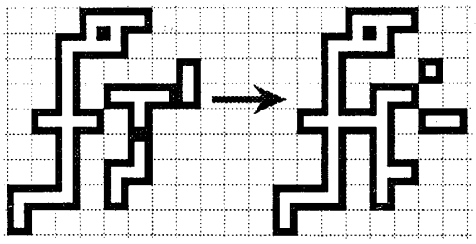

図 8: いくつかのタイルが結合して、大きく成長する

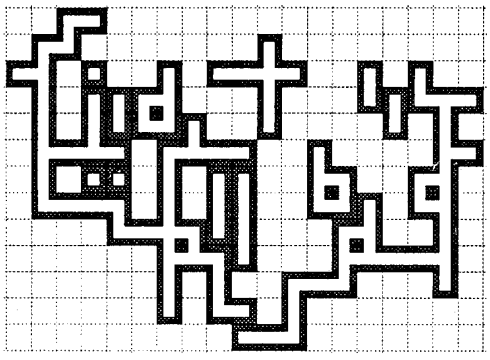

図 9: タイルが引っかけあって、クラスターとして存在できるようになる。タイルを生産し続けるようになると、factory を形成する

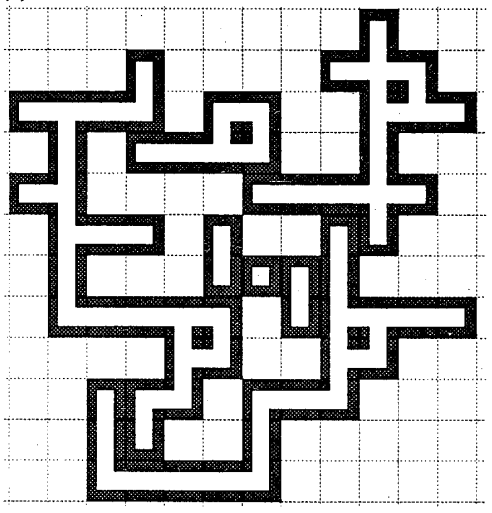

図 10: タイルの位置関係によっては、身動きがとれなくなることがある

面を作り出せるようにする事で、別の文脈を作り込める。

- 力の伝達
  衝突の仕方を工夫して、力の伝達が出来るようにする。より機械的な挙動が出来るようになる。

- 状況に応じた反応のルール
  今は反応を colliding side の近傍のみで決定しているが、上記のエネルギーを評価するなどして、周囲の状況に依存した反応を起こす。ただし、これはモデルをかなり複雑化してしまう。

5 おわりに

我々は、生物の進化のような発展的なプロセスを作ろうとして、上手くできないでいる。それは、まさしく一筋縄ではいかぬもののようである。ある明確な目的を持ったものはそれ以上の多様な側面を持つことができず、とはいえ抽象的な目的から直接に多様な意味を含むコードを書き下すという技術がある訳でもない。

また、自発的な発展を生む「記述」というものは、まだ模索中の段階である。つまり変化するものを記述するということであるが、それは論理や形式の世界ではなされたことがない。つかみどころの無いものをどうやって記述して行くべきかは別の記事で述べたが、タイル・オートマトンもその試みのうちの一つである。

ここでは、組合せ論的な複雑さから如何にして情報を取り出すかという「装置」を考えたことになる。発展的であるためには、境界条件や拘束条件として外から与えられたタスクを「達成する」という形であってはならなず、それらのタスクをガイド(ないし発展への鍵)として使うという形にしなくてはならない。モデルを具体的な形式で記述して実装するも、ただ単純な落し穴にはまらないよう操ってやるのみで、目的を与えないという甚だ不可解なことをやっているように映るだろう。そしてそのモデルはある明確な原理に基いている訳ではなく、むしろ「明確に定義できる事が出来ないような挙動をする」ために作られている。

勿論ある考えに沿ってモデルを構築せざるを得ないので、実装は必然的にいくつかの定義を混ぜ合わせて、競合させるという形式になるが、そういった混合から、なぜ発展的なプロセスが生まれてくるかということが、生命の研究にとって本質的な意味を持つと考えている。何故なら、生命は誰かがトップダウンに設計したというのではなく、アドホックな発展の積み重ねである筈であるから。あらゆるプロセスの副産物もシステムを破壊しないようにするためには、システムの作動原理を「ひねって」、その副作用をも新たな機能として包容するような発展性が必要であると考えているから。勿論、最終的にはきれいな形で再解釈して記述しなくてはならないが、それはまだ先の話である。

参考文献

[1] Tomoyuki Yamamoto and Kunihiko Kaneko. Tile automaton for evolution of metabolism. In F. Morán et. al., editor, *Advences in Artificial Life (proceedings of ECAL'95)*, page 188. Springer, 1995.

[2] Tomoyuki Yamamoto and Kunihiko Kaneko. Igniting the cycle of creation – an approach to create metabolism with Tile Automaton. *appear in the Proceedings of Artificial Life V*, 1996.

[3] 山本知幸. Tile automaton による代謝系生成への考察. 物性研究, 66(5):941–947, 1996.