

テープとマシンの共進化

池上高志

1 はじめに

分子の形態の進化と、それが生命現象を担うかどうか、の間の差は分子が自分を記述するかどうかという点にあると思われる。しかし安定な記述が完成し、進化しないのであれば、それは結合の形態が複雑で自由度が大きな力学系として扱ってしまう。したがって問題は、

1. いかにして自己を記述するコードが進化しえたか。
2. 自己記述コードはどのように進化するか。
3. 記述の不安定性は、どのような形で噴出するか。

をいかに扱えるかである。

特に本研究では、外来性のランダムネスによってもたらされる突然変異と、決定論的な突然変異の内的な機構がどう関わっているか、を明らかにすることがねらいである。

自己複製の機能を持つRNA分子がどのようにして生まれたか、は多くの研究者によって扱われてきた問題である。中でも Eigen と Shuster らによって提唱された自己触媒の化学反応のネットワーク(ハイパーサイクル)が良く知られている[1]。ハイパーサイクルはお互いに化学反応を触媒しあう自己完結した反応のループである。いったんこのループが生成されると、それを核に複製反応が永続される。このような自己完結ループを実際のRNA分子の集団の中に見いだそうという実験が行なわれている。しかしハイパーサイクルのモデルは以下の点で不満が多い。

第1は生命現象の反応を扱っているにも関わらず情報コードの生成と伝達という観点を明示的に取り入れたモデルがあまり見当たらないこと。

第2にできあがったハイパーサイクルの動的安定性の議論はあるが、それが進化的にいかにか獲得されてきたかの議論が少ないこと。(ハイパーサイクルは、前もって与えられた有限自由度の方程式で記述され、複製機能は方程式の中に暗に含められている)

第3としてRNAで反応を閉じさせ、リボソームなどのタンパク分子の進化とそれらとの相互作用さらに共進化はほとんど考慮されていないこと。

最近、P.W.Anderson のスピングラス[3]を基礎としたモデルやD.Farmer らによる自己触媒をするランダムネットワーク[2]、W.Fontana[4]によるリスプによるプログラム反応モデルが第1と2の問題に言及しはじめている。本研究ではこれらの点を考慮し、特に第3点を含んだ新しい「遺伝」情報の進化のモデルを提唱する。

2 モデル

RNA やDNA に相当するテープと、タンパクに相当するマシンを考える。テープはマシンと相互作用することで、新しいマシンとテープが作られる。ここでテープは円環状のビット列で表さ

れる。どのテープと相互作用できるかはマシンが持っている「ヘッド」と「テール」を表すビットパターンがテープ上に見出されるか、で決っている。それが満たされると、マシンは「ヘッド」パターンが見つかったビットから「テール」パターンが見つかったビットまで、ある「遷移表」にしたがって書き換えて行く。書き換えるルールはマシンの内部状態と今読んでるビットの値によって決められる。

この「ヘッド」・「テール」・「遷移表」を表すのにここでは16ビット用いる。この情報がテープのパターンとして書かれている。テープのパターンがどのように「ヘッド」・「テール」・「遷移表」に翻訳されるかは、与えられているとする。

問題は与えられたテープを複製し、翻訳しようとする際にマシンが寄与することによってなんらかの「跡」が複製されたテープ上に残ってしまい、したがって翻訳もマシンを介した翻訳ということになるのである。

このようなマシンとテープの集団を扱って、反応させていく。1単位世代で反応は十分に起こるとし、新しくできたもので置き換えられていく。

ここで最初に述べた問題意識によってふたつの変異率が導入される。ひとつは外部ノイズによって、マシンが遷移表にない書き換えをしてしまうこと。もうひとつはマシンが遷移表にある書き換えをした結果、もとのテープとは異なるテープをつくってしまうことである。前者は確率的に行ない、後者は決定論的に行なわれる。前者の変異がないとき、後者の遷移表にしたがった書き換え率がゼロであるとき、テープはエラーなしで自己複製されることになる。

3 結果

外部ノイズの高さによって、どのような反応のネットワークが進化するかが決ってくる。10個位のマシンと2-3のテープをランダムに生成し初期状態として用意し、そこからの発展をみる。

初期に登場するのは、マシン M がテープ T を読んで、同じテープを複製し自分と同じマシン M を複製する最少限の自己複製ループである。いったんこれができると、これをコアに反応のネットワークはだんだんに複雑化していく。しかし外部ノイズが低いと、最少限の自己複製ループに側鎖がついたようなネットワークしか残らない。

次に外部ノイズを大きくしてみる。この時反応は先に進んで、複雑なループが出現する。しかし必要なマシンをつくるのに必要なテープがなかなか自給自足されないため、外部ノイズを切ると、もとの最少限の自己複製ループにもどってしまう。注目すべきことは、高い外部ノイズの下でネットワークを育てると、ノイズを切っても最少限の自己複製ループに戻らない、複雑なネットワークが安定に維持できる状態に時間的に移行することである。このノイズを切ったあとの、ネットワークは自給自足できるループがいくつも絡み合った状態であることがわかる。

自己複製の度合いを考えると、外部ノイズが低い時には、多様なマシンはでてこないが、局所的な自己複製を。しかし外部ノイズが高い時には、局所的な複製を諦めて、ネットワーク全体で複製を達成するため、内的な突然変異率は高くなる。

4 考察

この実験から次のことが考察できる。

1. 複雑なネットワークの作られ方には順序があるということ。これは Bootstrap 型の進化とよべるものである。まず自給自足を行なう最少限のループができてから、それに寄生する

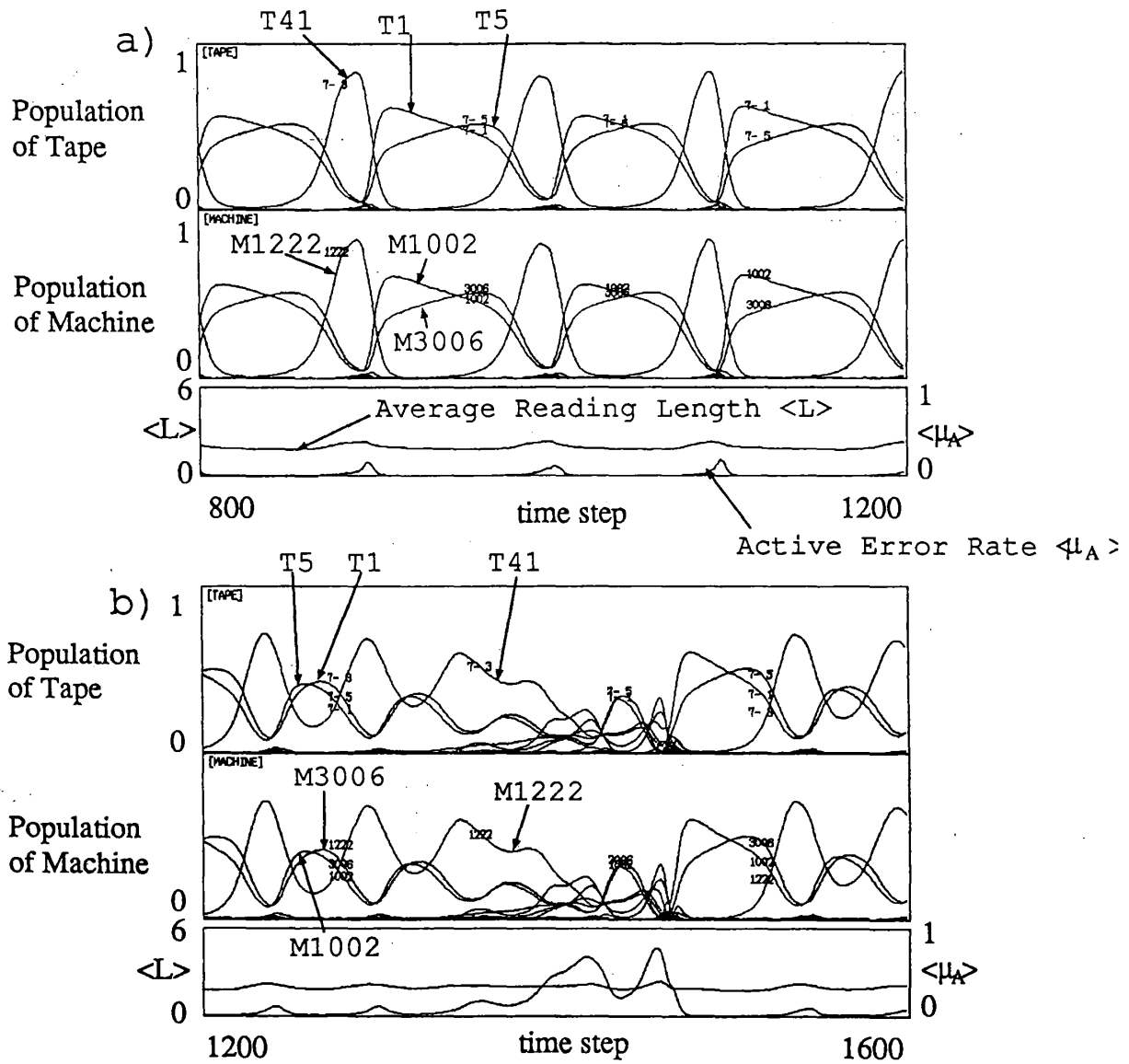


図1: マシンとテープの各個体数の時間発展 (1番上がマシンで次がテープ)。1番下のグラフは決定論的突然変異の割合と平均で読まれるテープ上のビット長である。a) 外部ノイズが低い (ビットあたり0.04) の時。b) 外部ノイズを上げた時 (0.055)。

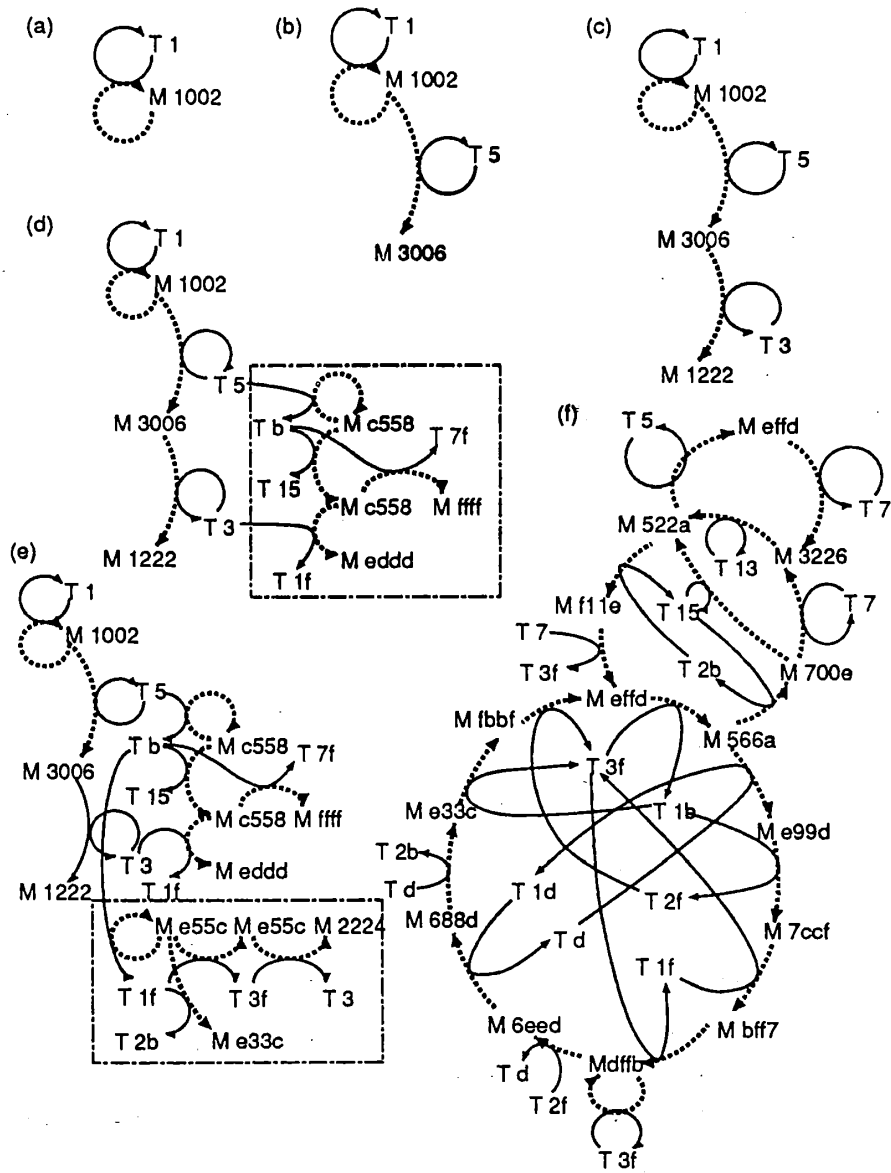


図 2: 最小限度の自己複製ループから複雑なネットワークへの進化。a) 外部ノイズが低い時に現れる 1 対のマシン M_{1002} とテープ T_1 。このネットワーク a) はつぎにマシン M_{3006} に搾取され、次に M_{1222} に搾取され (c) のネットワークとなる。次に出現するネットワーク (枠で囲った) はネットワーク c) に寄生するネットワークで T_5 と T_3 をネットワーク c) に頼って構造を維持している。さらにこの寄生ネットワークに寄生する超寄生ネットワークが e) に示してある。外部ノイズを切ったあとのネットワークに埋め込まれた自己触媒ループが図 f) に示してある。ここにふたつのループは Eigen-Shuster 型で残りのふたつはテープが局所的に複製されない 2 重ループ型であることがわかる。

ネット、さらにそれに寄生する超寄生ループができてきて、そののちに自給自足を全体で行なうネットワークが出現する。

2. 外来性の原因で生じる複製の不正確さが、安定な自己複製ネットワークを進化させる。特に個々のテープがどのように複製されるかをみてやると、違ったテープにつねに書き換えられつつ、他からつくられるので存在しつづける「転写系のテープ (RNA もどき)」と、同じテープが生産される「複製系のテープ (DNA もどき)」に分化することがわかる。

外部ノイズが低い時には、複製系のテープがほとんどだが、外部ノイズが高い時には転写系のテープが出現する。つまりRNAのような転写系の反応はパラサイトとして後から宿主であるDNAのような複製系にくっついたとみなすことができる。

Eigen と Shuster のハイパーサイクルが複製系のテープのうえでの反応を考えているのに対し、ここでは転写系の反応の進化も扱っていることになる。

3. 突然変異には多分、外来性のものと内因性のものがある、それは相互に関係しあっている。この研究でみるネットワークの進化は、外来性のノイズでつくられる反応の経路を決定論的なマシンによる経路におきかえることで「模倣」したから、外来性のノイズを切ったあとも安定に存在できたとみることもしできる。「模倣」できたあとは高い非自己複製性を保ちつつ、マシンの数の振動もゆるやかにする。つまり力学的な安定性を獲得している。これは、以前の研究で、高い突然変異を安定に保つ状態は、低い突然変異のもとでいる状態に比べて安定性を獲得するホメオカオス状態と対照してかんがえることができる。

Acknowledgement この研究は橋本敬さんとの共同研究です。

参考文献

- [1] M.Eigen and P.Schuster, *Hypercycle*(Springer-Verlag, 1979).
- [2] See e.g., D.J.Farmer, S.S. Kauffman, and N.H.Packard, "Autocatalytic Replication of Polymers" *Physica D* 22(1986)50.
- [3] P.W.Anderson, "Suggested Model for Prebiotic Evolution: The Use of Chaos", *Proc.Natl.Acad.Sci.*80(1983) 3386.
- [4] W.Fontana, "Algorithmic Chemistry" pp.159 in *Artificial Life 2*(eds. C.Langton et al. Addison Wisley 1990).