論文の内容の要旨

論文題目　“Evolution of Code and Communication in Dynamical Networks”
(動的ネットワークにおけるコードとコミュニケーションの進化)

氏名　橋本 敬

1　イントロダクション

この論文では、記号の使用方やその解釈の体系を「コード」と呼ぶ。自発的に発生するコードは動的に変化しうるが、その運動には、統語レベルと意味レベルの混合 (syntax and semantics mixture) と全体として閉じたコードをつくる事の困難 (openness of code) が影響を与えるであろう。この論文では、言語におけるコードと遺伝コードのついてモデル化し、その創発、進化を論じる。

2　形式文法システムの進化

言語のコードを事前に書き下す事はできないが、事後的に言葉の使用について記述する事は可能である。しかし、この記述は常に変化しうる。言語コードはコミュニケーション自体による変化をまぬがれ得ない。

言語コードの進化を研究するために、会話を行う個体のネットワークを考える。各個体 (エージェント) は形式文法を持つシステムとして定義される。エージェントがそれぞれの文法に基づいて語を発し、全エージェントが発話された語の理解を試みる (会話ネットワーク)。このネットワークで、語の発話・受理に応じた得点が与えられるある種のゲームを行う。文法の変異過程により一部のエージェントが得点に応じて新しいエージェントに置き換えられるという、進化ダイナミクスを導入する。

あるエージェントの計算能力は、受理可能な語の集合の大きさで測られる。また、あるエージェントの処理する情報量は発した語の長さと理解した語の長さの積と定義し、ネットワーク内を流れる情報量は、その平均で測る。語の多様性は発話された語の種類とする。

得点は、より多くの語を発話・理解できると上がり、他のエージェントに理解されると少し下がるという設定にする。初期状態としてランダムに作った計算能力の低い文法 (チョムスキー階層では正規文法に属する) を持つエージェントを 10 個体つくる。計算能力、ネットワーク内を流れる情報量、語の多様性は時間的に増大する傾向にあるが、あまり変化しない部分と急激な発展が交互に現れるという断続平衡的な様相を呈する。

平衡するところでは、共語集団 (ensemble with common set of words, 以下 ECW) が形成されている。ECW とは同じ語を発話・理解しあうエージェントの集団である。すなわち、ある特定の語の使用が選ばれており、コードが自律的に形成されたと見ることができる。異なる 2 つの ECW が存在する時、高い能力のエージェントにより構成される ECW が淘汰される場合がある。より多く話される共語を発話・理解できないエージェントは、たとえ高い計算能力を持っていても淘汰される。ECW の共存 (mixture of code) により高い計算能力への進化は抑制されるのである。

ほかのエージェントより多くの語を発話・理解するエージェントが有利な場合には、ECW がつぎつぎに現れるというコードの進化が起きる。理解しあう事が非常に有利である場合は、一つのコードができるが、コードの進化は起きず、語の多様性とネットワーク内の情報は低いレベルに留まる。逆の状況では、語の多様性は上がるが、情報の流れは低い。これはコードが成立せず、相互理解なしに多くの語が発せられている状態である。

計算能力の急激な発展は 2 種類の機構によりもたらされる。一つはモジュール型進化である。これは、一つの新しいルールをモジュール的に使う事で、多くの新しい文を発話・理解できるようになる発展過程である。自然言語との関連で考えるならば、接辞による語形成に対応するであろう。もう一方はループ構造の出現である。文法内にループを持つことで再帰的な書き換えが可能になり、原理的には無限個の語を発することができる。これは文法の構造的な変化であり、アルゴリズム的進化と呼ぶ。これは、複文を作る事により一つの文で長く豊富な記述ができることに対応する。ループを含む文法はチョムスキー階層において文脈自由のクラスに属し、初期の正規文法より一つ上のクラスである。すなわち、チョムスキー階層をのぼる形の進化が起きている。

ECW による進化の抑制と、これらの文法の進化が交互に起きることで、断続平衡的な進化が見られるのである。

3 テープとマシンの共進化

遺伝情報系におけるコドンとアミノ酸の対応がわかっても、ある遺伝子型がどのように表現型に発現するかは完全にはわからない。このレベルでは、情報の解釈側の役割が重要である。また、遺伝コードはシステムが自己複製可能なように組織化されなければならないが、自己複製には自己言及のパラドックスがある。つまり、自己複製のために自己を観測せねばならず、観測に対して安定でないものの複製は困難となる。ノイマンはマシンとその記述により自己複製オートマトンを構成した。

自己複製を可能にする遺伝コードがどのように進化するかを見るために、ここでは、テープとそれを読むマシンのネットワークを考える。テープは円形のビット列で、マシンの記述となっている。マシンはテープを解釈し、新しいテープとマシンをつくる。マシンによってテープが書き換えられる事を「能動的ミューテーション」という。また外部ノイズにより確率的にテープ上の記号が変化することは「受動的ミューテーション」と呼ばれる。

外部ノイズの上昇により、最小自己複製ネットワークから大きな複製ネットワークへの進化が見られる。外部ノイズが低い場合は、能動的ミューテーションなしで自己複製する、一対のテープとマシンによる最小のネットワークが安定に存在する。受動的ミューテーションによりパラサイト的ネットワークができ大きなネットワークへと進化していく。外部ノイズがある程度大きくなると、大きく複雑なネットワークへ

の転移が起きる。この転移後は外部ノイズなしでもネットワークは安定 にその構造を維持する。 この自己維持ネットワークを 「コアネット」と呼ぶ。これは個々のテープ ・マシンの自己複製から、大きなネットワークが全体として複製する状態への進化である。このネットワークでは、 能動的ミューテーション率 (μ_A) が高い値に保たれる。μ_Aの値はマシンがテープを書き換える率である。これを計算を行っている程度と見ると、おおきなネットワークの維持のために計算が行われているという見方が可能である。 コアネットにおけるμ_Aは固定点だけではなく、時間的に振動するものもある。

コアネットには幾つかの自己触媒的なネットワークが埋め込まれている。自己触媒ネットワークには、テープが個々に複製されているものと、そうでないものという2つの種類がある。前者は、アイゲンらのハイパーサイクルと同じものであり、$\mu_A = 0$ である。 後者はテープとマシンの両方が相互につくりあうループをなしており、$\mu_A > 0$ である。 このタイプでは、非等方的な結合をもつ大きな自己触媒ネットワークが安定に存在できる。

振動するコアネットでは、μ_Aやマシン、テープの数が振動するだけではなく、ネットワークのトポロジー自体が時間的に変動する。ある時は少数の小さな自己触媒ループでネットワークが構成されるが、その後大きなループが多数存在するようになり、また少数の小さなループに戻るという時間的な変動を順周期的に繰り返す。

マシンはテープを解釈し新たなマシンをつくる。この解釈の仕方の体系がこのシステムでの遺伝コードに対応するものである。固定点のコアネットではコードが組織化され安定に存在している。そのコードには多義性と同義性がある。振動コアの場合はコード自体が時間的に変動するのだが、これは 「閉じたコード」をつくれていないと見れる (openness of code)。すなわちあるコードに基づいた解釈をする事自体がネットワークを不安定化させている。

4 結論

言語的コードの進化の研究において、ある語を共通に使う集団が現れた。そこでは、語の使い方が選ばれるというコードが共有されている。また、チョムスキー階層をのぼるかたちの進化が起きるが、二つのコードの対立で高い計算能力への進化が抑制される。高い計算能力への進化とコードの成立によるその抑制によって、ネットワーク内の情報量は断続平衡的な発展をする。

遺伝的コードの進化の研究においては、多くのテープとマシンが相互につくりあう事により、大きなネットワークが全体として自己複製する 「コアネット」が進化した。そこでは、マシンによるテープの解釈という、遺伝コードに対応するものが組織化されている。また。ネットワークのトポロジーが時間的に変動する振動コアネットができるが、これは閉じたコードがつくれない事によって生み出される振動とみることができる。