

3 K-7 植物の形態進化に対するセルオートマトンを用いたアプローチ

月岡 健人 國井 利泰

東京大学理学部

1 はじめに

今日の植物の形態は、特に熱帯地方にみられるように極めて多様である。これらの形態は各植物の遺伝子が生成したパターンと見ることができ、ではこのようなパターン形成の能力を、植物遺伝子はどのようにして獲得していったのだろうか。

生物の進化について遺伝子重複説という考えがある。[1]これは、遺伝子に重複が起こり、これまでの機能を失うことなく、もう一方のコピーの突然変異により新たな機能を獲得することで進化が起こったというものである。この説に従えば、遺伝子の新たなパターン形成の能力も、これまでのパターン形成に必要な情報に、突然変異による新たな要素が付け加わった結果だと考えることができる。そこで、この研究では、非常に単純な体制の植物から高等植物にいたる遺伝子のパターン形成の進化が、そのような付加的な形で表現できるかどうかを現存の植物の形態や化石植物の記録から考察し、セルオートマトンを使ってのパターン形成の進化のシミュレーション法を提案する。

2 植物形態の進化傾向

遺伝子のパターン形成の進化を扱うためには、実際の植物の形態の進化をまず考察する必要がある。植物の体制には単細胞性のプランクトンから巨木にいたるまで様々なものがあり、進化系統について議論が紛糾している部分もあるが、形態の進化にはある程度の規則性が認められる。

例えば、体制の非常に単純な緑藻などでは、大まかではあるが、単細胞性の植物プランクトンから、細胞が一次元方向につながった糸状体制、糸状体制が所々で分岐する分岐糸状上体制、糸状体制が幅を持った葉状体制、さらに葉状体制が二層になった柔組織体制への進化傾向がみられる。これは、定性的には、細胞分裂の方向の自由度が増したことで説明できる。さらに高等な褐藻では分岐した糸状組織が多数融合しあって多層の藻体を形成するが、この場合は、さらに分岐の頻度や個々の分岐の長さのコントロールが精密になっていることがわかる。一方、陸上植物でも、化石の記録を利用することで体制の進化を追うことが出来る。大部分が葡伏し直立茎

は一回二又分岐するだけといった簡単な植物から、分岐回数が増え、さらに分岐の枝に優劣が生じて主軸が形成され、近隣の枝が融合して小葉が出来、小葉を多数持った羽状複葉が縮小して大葉が生じた、といった進化傾向は、形態進化のテロム説[5]と呼ばれている。この場合も、平等な分岐を繰り返す状態に、各枝の伸びと分岐間隔に対して新たにコントロールが加えられていったと考えられる。

このように、植物の形態の進化傾向は、新たな情報の付加という形で説明できる部分がかかなりある。例えば、糸状体制の藻類が、これまでの方向に分裂するという性質に加えてそれとは異なる方向にも分裂するという性質を持った結果、分岐糸状体制が生じた。しかし、これは非常に定性的な説明であり、このような情報を整理し、様々な進化段階の植物の形態を組織的に記述していく必要がある。

3 植物形態の記述モデル

植物の形態を組織的に記述する方法として、これまでいくつかのモデルが提案されている。最も応用範囲が広いのは、植物が基本的には分岐を繰り返す規則的な体制であることを利用して、分岐を文法で記述するL-system[3]である。その他、分岐の幾何的情報や樹木の各枝の成長の違いを重視したものなどがある。さらに、枝などのマクロな構成単位のレベルの振舞いではなく、細胞の規則的な分裂によって発生初期の形を表現したもの(Map L-systemと呼ばれる)[2]などがある。

この研究と同じく植物の形態進化を扱ったものとしては、日照や力学的な最適性の観点から分岐の幾何的パラメータを求めることで進化を扱おうとする方法がある。しかし、この研究では、前にも述べたように、ミクロなレベルでは主に各細胞の分裂方向や分裂回数(細胞列の長さのコントロールファクター)といったもの、マクロなレベルでは分岐のタイミングや回数のパターンに注目している。これまで述べたモデルのうち、この研究の目的に最も沿うものはL-systemあるいはMap L-systemであるが、いずれも分岐規則は文法に完全に埋め込まれており、環境との相互作用、あるいは他の構成要素との相互作用といったファクターは扱いにくいという欠点がある。そして、この相互作用の要素こそ、パターン形成で最も注目すべき要素だと考えられる。そこで、この研究では、セルオートマトンによる植物形態の記述を提案する。この場合、記述の対象となるのは、例えばどの位置で分岐が起こるかといったトポロジカルな情報について

The simulation of the evolution of plant morphology using cellular automata

Taketo Tsukioka and Toshiyasu L. Kuni

The University of Tokyo

のパターンであり、L-system などと同じ様に分岐の形状などは直接的には扱わない。ただ、セルオートマトンによる記述はL-system 的な文法による記述を含むことができ、明確には文法で表現できないパターンも扱える点で優れている [6]。

4 セルオートマトンを用いた植物の形態パターン進化の記述

この前章で述べたように、セルオートマトンを用いた記述法は文法を用いるものよりも強力であり、また各セルの単純なルールで複雑な現象を表現することができる。例えば二次元セルオートマトン上で細胞分裂を表現する場合は、各セルが細胞で占められているか、占められている場合は、その細胞がどちらに分裂するか、空いている場合は近傍のどの細胞がそのセルに向かって分裂しようとしているか、を考えれば自然に表現できる。特に植物細胞の場合は動き回ることがないので、表現するのは比較的容易である。その上で、各細胞の分裂方向が他の細胞とどう影響し合うかを様々なルールを与えてシミュレートすることができる。例えば、各細胞は分裂方向にすでに細胞があれば分裂せず、ない場合は分裂し、しかも全ての細胞について分裂方向が一定である、というルールを与えれば、頂端成長する糸状の形が形成できる。また、このような決定的なルールだけでなく、各細胞の分裂方向を確率的に与え、その確率が近傍との相互作用で遷移するといった拡張も可能である。

このようなセルオートマトンを用いた記述を藻類などの非常に簡単な体制にあてはめ、進化系統に沿って実際に観察されている分岐パターンと対比しつつ付加的に構成していくことで、植物遺伝子のパターン形成の進化を辿ることが可能になってくる。その際、ある植物に対するルールがその進化系統の上下の形態によって拘束されることが利用できるであろう。

5 今後の課題

現在のところ、実際の藻類の形状、例えば分岐パターンなどを、これまでの植物の形態モデルで明確に記述した観察はまだ稀であり(例えば [4] 参照)、パターン形成のシミュレーションに重要と思われるデータは十分得られていない。このようなデータを出来るだけ多く収集することが今後の課題の一つである。また、セルオートマトンを用いた表現方法は、藻類のような基本単位として細胞をとれるような体制では非常に自然だが、細胞レベルのルールからさらにマクロな器官レベルでのルール(例えば細胞列の伸びが枝の伸びに対応するといったような)につなげていくには困難が伴う。この点の克服も今後の課題である。

参考文献

[1] 大野 乾 「生命の誕生と進化」、東京大学出版会

[2] de Boer, Martin J. M., *Analysys and computer generation of division patterns in cell layers using developmental algorithms*. 1989.

[3] Herman G. T., and Rozenberg, G., *Developmental Systems and Languages*, North-Holland. 1975.

[4] Schneider, C. W., and Walde, R. E., *L-system computer simulations of branching divergence in some dorsiventral members of the tribe Polysiphoniae*, *Phycologia*, 31(6), 1992, pp. 581- 590.

[5] Stewart, W. N., *Paleobotany and the evolution of plants*, Cambridge University Press.

[6] Wolfram, S., *Theory and Applications of Cellular Automata*, World Scientific.