

トウモロコシ根系パターンのモデリング 2

東京農工大学 農学部 澁澤 栄

キーワード：フラクタル， Lシステム， 複雑系， ひげ根， 土壌

4. Lシステムとは

Lシステムとは，その創始者Lindenmayerにちなんで，その頭文字をとって名づけた記号発生のアルゴリズムで¹⁵⁾，生物の発生や花序の形^{16)・17)}あるいは葉序の形¹⁸⁾を表現するために発達した生物形態形成モデルのひとつである．細胞の状態集合，記号の書換規則，初期記号，環境記号の4つの論理記号群から構成され¹⁵⁾，さらに基本単位（幾何学的には形のユニット）が細胞から葉の大きさまで拡張されており，書換規則の確率性も考慮されている．

例えば，図3のような成長しながら分枝を発生するパターンを考えてみる．記号AとBはユニットの状態であり，Aならば伸張（自己増殖）と分枝の発生，Bならば伸張のみとする．初期記号

をBとすると，まずユニット（長方形）の発生が行われる．続いて書換規則でBの状態ならばAに変化し，Aは常にAに変換されるというルールを定めると，図3の右端に沿ったパターンの発生が行われる．書換規則で，BからAにもBにもある確率で変化することを定めれば，図3のような様々なパターンが描けることになる．

従来のLシステムは，上記のように比較的規則的な形を対象にして研究されており，また最大の難点は，無制限にパターンが成長してしまうことである．

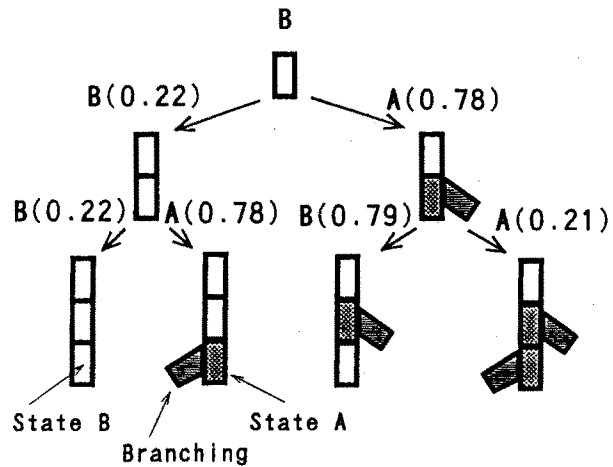


図3 確率Lシステムによる分枝規則

前編「トウモロコシ根系パターンのモデリング1」は本誌第3巻第3号77～81頁に掲載した。引用文献は前編の分も含む。前編の内容は、1. はじめに、 2. 根系サンプルの作成、 根系の観察と根分布解析。

本実験で得られた根系パターンは、全体的な大きさや形に制限があり、1本1本の根を見れば複雑に屈曲したり、分枝が不規則であったり、分枝根に長いものや短いものがあつたりと、極めて多彩な形を示していることが特徴であつた。

5. 階層的モデリング^{1, 2, 5)}

異方的なフラクタル構造をもつトウモロコシ根系の形を再現するためには、いくつかの階層に分けてその特徴を抽出し、最後にひとつの根系成長モデルとして再構成する必要があつた。ここで階層とは、単純に観測スケールが異なると抽出される特性も異なるサイズ(あるいは時間)と仮定している。3つの階層に分けてモデリングを実行した。

メタルール：根系全体を見渡せる観測スケールで抽出される根系の幾何学的特徴で、輪郭の曲線モデル、根のべき分布と根密度モデル、主軸根の発生角度や本数、主軸根からの1次分枝根の発生開始位置などである。

根系分枝ルール：確率Lシステムを利用して、1次と2次の分枝根発生の規則性を定めた。発生間隔及び発生角度に確率性をもたせたアルゴリズムとした⁵⁾。

根端運動：観測ではたまたま2mm間隔の細かな屈曲変動のほか、主軸根と1次分枝根に見られる下方湾曲、高密度土壌進入時の水平屈曲の統計性、1次分枝根に見られる長く伸びる根と短いままの根の存在などが確認された。文献データ^{2, 6)}と観測結果を参考にし、根端の確率的な転頭運動と重力屈性を基本にした伸張運動を仮定し⁵⁾、1次分枝根の長短の差を近傍の分枝根同士の代謝産物獲得の競争モデルとして暫定的に定式化した^{2, 5)}。また主軸根、1次・2次の分枝根の伸張速度差は文献データ^{1, 9)}を参考にし20:5:1に仮定した。

モデリングに確率性を導入するのは議論が多いところである。確率現象には、ミクロな領域での決定論的な現象がマクロな観測スケールや観測装置のために現れる場合と、構造自体がカオス性やフラクタル性をもつために現れる場合が考えられる。著者の観測スケールでの根系および土壌構造のフラクタル性、生命現象自体の様々な揺らぎなどから推察して、上記後者の場合が根系パターン形成現象における確率性の主要な原因ではないかと考えている。

上記三つの階層のモデリングに基づくルール群を統合する場合、上位階層ルール(大きなスケールのルール群)が下位階層のルールをルーズに支配するように設定した。そのため、Lシステムによってパターンが無限に拡大することはなく、またLシステムでは定式化できないよりミクロな領域の現象も組み入れることができた。

6. シミュレーション結果

図4に、1本の主軸根のシミュレーション結果を示す²⁾。主軸根は鉛直下方へ発生させ、ランダム転頭運動をしながら2mm/1ステップの速度で伸張させた。観測データに基づいて、2cm伸張した時点で1次分枝根を発生させた。

1次分枝根の近傍5本に伸張競争をさせ、早く1cm以上伸びた根は、観測データに基づいて確率40%の生存率で長く伸びることができる。生存率を越える分枝根が誕

生した時点で、他は「いじけ根」（あるいはS型分枝根）として伸張が止まる。主軸根が下層の硬い土壌に進入する際に、観測データに基づいて確率50%で水平屈曲させた（図は屈曲した場合）。水平方向へ伸張方向が曲げられた主軸根へは重力屈性が作用し、観測データに基づいた根の湾曲に近い曲率が与えられた。一方屈曲部分では、1次分枝根が主として屈曲部の外側へ発生するルールを駆動させた。同時に2次分枝根の発生を開始させた。便宜的に、硬い土壌では全ての根につき伸張速度を約半分に下げた。図4は、根箱側板に沿って発達した主軸根の様相とよく似ていることがわかった⁵⁾。

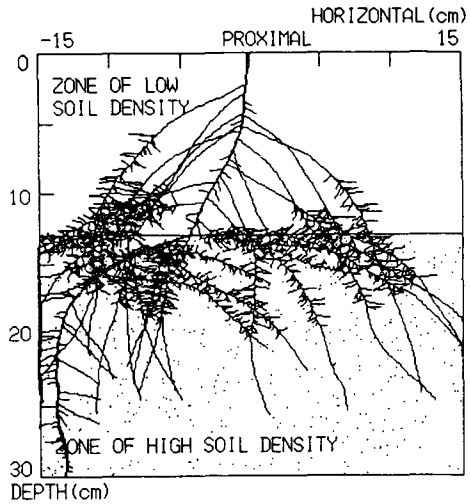


図4 1本の主軸根のシミュレーション

図5は、上記のモデルをひとつの根系発生に適用したものであり、それぞれ図1の観測した根系サンプルをシミュレートしたものである²⁾。メタルールはそれぞれの根箱ごとに異なり、対応する根系サンプルから抽出されたものである。根分枝ルールと根端運動はすべて同じルールを適用した。図1と図5を比較した場合、シミュレーションの方が根の量が多くなっている場合があるなどの差があるが²⁾、根系の骨格や輪郭及び根分布の状態などはよく似ている。根分布の状態を定量化した結果を図2のシミュレーション結果として示す。異方的べき分布をよく再現していることがわかる。

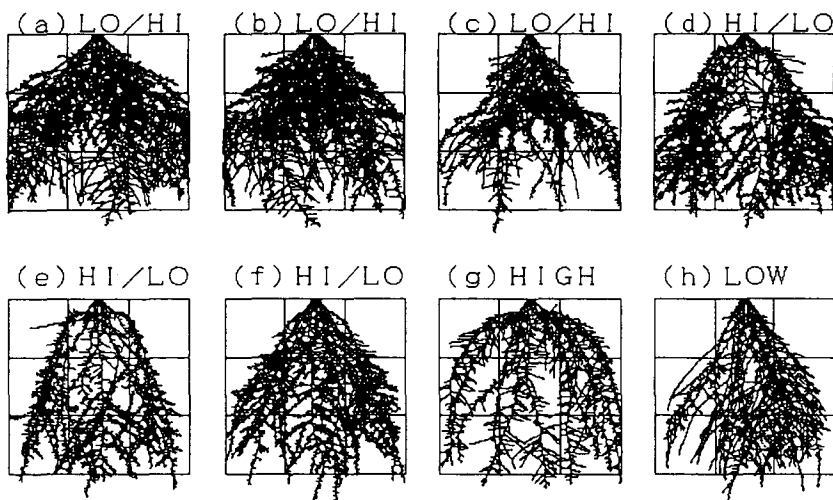


図5 異なる土壌での根系シミュレーション

7. おわりに

モデリングというと、研究仲間では様々な対応を受ける。数理屋やエンジニアでは、モデリング無しに企画や設計が有り得ず、实在現象の思考空間への写像とその逆を日常的に行っている。実際の現象を全体として扱おうとしたら、必ず思考空間では数式無しでもモデリングが行われている。農家であっても例外ではない。しかし農学研究者の中には、モデリングに対してあるいは思考のツールとしてのモデルに対して、否定的な意見を聞くことが多い。なぜだろう。

本研究では、未熟にも自分で観測した根系の形を再現するため、様々な試行錯誤や仮定を設定しなければならなかった。根系に関する個々の研究論文やデータが、不勉強なため何辺読んでも根系全体像の再現に位置づかないケースもあった。階層的モデリングというアプローチは、それらのちぐはぐなデータや知見を全体の中に位置づけるのに、少しは役だったようである。しかし、暫定的に仮定した多くの事項の実験的検証が、今後の課題として残されていると感じている。

土壌が変わると（当然栄養状態も含めて）根系の形は変化する。根系モデルの3次元化と併せて、より多くの土壌密度条件および土性での観測データを蓄積し、メタルールの統一性（根系全体の特徴のパターン化）の解明が重要であろう。農法との関連性については、機会をみて議論したいが、ここではSSCM(Site Specific Crop Management)Systemの要素技術として位置づけたいことを記しておく。

参考文献

- 1)ファイトテクノロジー研究会編：ファイトテクノロジー，朝倉書店，1994
- 2)S. Shibusawa: Modeling the branching growth fractal pattern of Maize root system. *Plant & Soil* (in press)
- 3)澁澤 栄：平成4-5年度科研報告書（一般C），1994
- 4)渋谷 栄ほか：農業機械学会誌，54(3)，pp.53-60,1992
- 5)渋谷 栄ほか：農業機械学会誌，55(2)，pp.101-108,1993
- 6)渋谷 栄ほか：農業機械学会誌，52(1)，69-75,1990
- 7)渋谷 栄ほか：農業機械学会誌，52(2)，3-9,1990
- 8)S. SHIBUSAWA: *Jour. Terramechanics*, 29(1), 107-115, 1992
- 9)Hatano, R. et al.: *Soil Sci. Plant Nutri.*, 34(4), 535-546, 1988.
- 10)波多野隆介：根の研究，2(2)，44-50,1993
- 11)MANDELROT B. B.: *The fractal geometry of nature*, Freeman, 1983.
- 12)高安秀樹：フラクタル，朝倉書店，1986.
- 13)高安秀樹 編著：フラクタル科学，朝倉書店，1987.
- 14)TAMÁS VICSEK: フラクタル成長現象（宮島佐介 訳），朝倉書店，1990.
- 15)土居洋文：「生物のかたちづくり」，サイエンス社，1988.
- 16)Lindenmayer, A.: *J. Theoret. Biol.*, 18, 280-299 and 300-315, 1968.
- 17)Lindenmayer, A.: *J. Theoret. Biol.*, 30, 455-484, 1971.
- 18)Nishida, T.: *Memoirs Fac. Sci. Kyoto Univ. Seri. Biol.*, 13, 97-122, 1980.
- 19)Russel, R. R.: 「作物の根系と土壌」（田中典幸 訳）農文協, 1981.
- 20)Kramer, P. J.: 水環境と植物（田崎忠良監訳），養賢堂，1986.
- 21)Dexter, A. R.: *Plant and Soil*, 95, 135-147, 1986.
- 22)Dexter, A. R.: *Plant and Soil*, 95, 149-161, 1986.
- 23)Dexter, A. R.: *J. Soil Sci.*, 29, 102-116, 1978.
- 24)波多野隆介ほか：日本土壌肥料学会誌，58(2), 209-216, 1987.
- 25)村瀬治比古ほか：農機関西支部報，56, 15-16, 1984.
- 26)Ney, D. and Pilet, P. E.: *Plant, Cell and Environment*, 4, 339-343, 1981.