

トウモロコシ根系パターンのモデリング 1

東京農工大学 農学部 滋澤 栄

キーワード：フラクタル，Lシステム，複雑系，ひげ根，土壌

1. はじめに

本研究は，ファイトテクノロジー研究¹⁾の一環として開始したものである。「土壌-植物-大気複合系」のダイナミックスを理解し，その知的成果を生物生産技術へ利用しようというもので，「植物との対話」というスローガンのもとに学際的な研究を進めている。著者らは，土壌と根系の相互関係を対象にしている。本報告は，中間的な研究成果²⁻⁵⁾の概要を取りまとめたものである。

日本人同士が対話するのに日本語が必要なように，「根系と対話」するには何らかのツールが必要である。既に耕うんにおける土塊形成過程では，フラクタル性が重要な役割を果たすことを解明していた⁶⁻⁸⁾。波多野氏の研究から土壌の粗孔隙分布にもフラクタル性が見られ⁹⁾，最近ではフラクタル次元が解析されている¹⁰⁾。根系の生育環境としての土壌が，構造上フラクタル性をもつならば，そこで発達する根系にもフラクタル性が反映すると予想することは，ごく自然であろう。そこで，「対話のツール」として，フラクタル¹¹⁻¹⁴⁾を利用することにした。

複雑なフラクタルパターンを再現するため，様々な試みがなされようとしているが¹¹⁻¹⁶⁾，生物の発生を記号論理的に再現しようという試み¹⁵⁻¹⁸⁾は注目に値する。Lシステムである。単純な記号変換則に基づいて次々と規則的なパターンを発達させようというもので，パターンユニットと変換則を工夫することにより，自己相似なパターンを再構成することが可能となる。これが第2のツールである。

土壌環境と根系生長の関係は系統的に研究されている¹⁹⁾。モデリングに関しては，水の移動に着目した熱力学モデルとしてのSPACモデル²⁰⁾，土壌粗孔隙への根の進入・伸張の実験²¹⁻²²⁾とstochastic growth model²³⁾，粗孔隙分布と水移動および根分布の関係の情報量あるいはフラクタルを用いた定量化モデル^{9, 10, 24)}，などが見られる。これらの研究は，断片的ではあるが，根系生長モデルを構成する上で重要な知見を与えてくれる。

しかし本研究で解くべき問題は，「なぜ」あるいは「どのようにして」根系全体の形が決定されていくのかを知ることであり，実際に根系を描くルールを定めることである。根系の幾何学的構造を知り，その構造決定の原理まで理解する必要がある。残念ながら，著者の調べた文献やパーソナルコミュニケーションの範囲内では，根系生長を評価するのに総根重，総根長，分枝根数，表面積などが一般的であり，根系の原形を再現するにたるパラメータを調べ上げた例は無かった。

極めて初歩的で単純な方法ではあるが，根箱を用いて実際に根系を生長させ，得られた根系サンプルを手がかりに，試行錯誤のモデリングを開始した。

実は，根研究会を通じて，このような研究がいくつかなされていることを最近になって知った次第である。

2. 根系サンプルの作成

本実験の主要な目的は、土壌の物理的条件のひとつである土壌密度（土壌硬度、耕うん抵抗、走行性能など土の機械的性質に強く関与する）と根系パターンの関係を知ること、および得られた根系の幾何学的特徴を把握することである。

供試作物はトウモロコシ（品種：ゴールドエンクロスバンタム）である。根箱は透明のアクリル樹脂板で作成した（長さ30cm、幅5cm、高さ30cm）。供試土壌は腐葉土を含む沖積土（粘土25%、シルト48%、砂28%）で、蒸気殺菌したのち元肥として苦土入り尿素複合磷安746号（5g）を土壌表面に散布した。土壌条件を表1に示す。上層が低密度で下層が高密度：根箱(a)~(c)、上層が高密度で下層が低密度：根箱(d)~(f)、全層高密度：根箱(g)、全層低密度：根箱(h)、の4種の土壌密度条件とした。高密度層は、根が貫通できる限界密度¹⁹⁾（粘土で 1.46g/cm^3 ）を越えるようにし、イネの種子根最大伸張圧（ 0.265MPa ）²⁵⁾を越える土壌硬度が実験終了時（播種後32日）で得られた。

表1 根箱の土壌条件。土壌密度は土を充填したとき（含水比28%）に測定した。土壌高度は、播種後31日の根系サンプル作成時に、山中式土壌硬度計により側面6箇所を測定した平均値である（含水比25%）。

Root box symbol	Top layer			Bottom layer			Abbrev.
	Depth (cm)	Density (g/cm^3)	Strength (MPa)	Depth (cm)	Density (g/cm^3)	Strength (MPa)	
(a)	13	0.80	0.08	13~25	1.57	3.70	LO/HI
(b)	13	0.80	0.05	13~25	1.55	3.70	LO/HI
(c)	13	0.95	-	13~25	1.56	-	LO/HI
(d)	8	1.46	3.70	8~25	0.83	0.05	HI/LO
(e)	8	1.47	3.70	8~25	0.84	0.06	HI/LO
(f)	8	1.46	-	8~25	0.81	-	HI/LO
(g)	25	1.50	3.30	-	-	-	HIGH
(h)	25	0.82	0.05	-	-	-	LOW

根箱地表の中央に3粒の種子を深さ1cmに播種し、温室内で生育させた。2葉展開時に間引きし、根箱間生長差の少なくなるように各根箱に1株残した。肥培管理は、1週間に1度の500ml灌水のみとした。播種後32日に根系サンプルを作成した。葉齢の平均が11葉であった。

まず根箱側板を丁寧にはずし、両側面に沿って生長した根系をそれぞれ写真撮影した。この観察から、根分枝間隔や角度が分かる。次に2cm格子状に釘を打つけた板を用意し、根系の形を固定しながら土を洗い流した。得られた根系サンプルを写真撮影し、画像解析に供試した。根系サンプルの形は2cm以上のスケールで意味をもち、特に根系輪郭や根分布の特徴は解析対象となる。

3. 根系の観察と根分布解析

実際に得られた根系の観察が、モデリングの第1歩である。まず根系サンプルより、主軸根（あるいは節根、不定根）の数及び根系基部の広がり角 θ_1 （主軸根発根部の発根角度範囲で、扇の中心角に相当する）、根箱側面の根系観測より1次及び2次分枝根の発生間隔と角度を観測した。表2にその結果を示す。特に1次・2次の根分枝間隔と分枝角度は、土壌密度差あるいは根箱間に統計的有意差が認められなかったため、全体の平均値と標準偏差が意味を持つことになった。

表2 根分枝パラメータの観測結果。各根箱につき、主軸根の数は1株当たり、1次分枝根は60本及び2次分枝根は30本の観測平均と標準偏差を示す。

Root box symbol	Seminal and nodal root		1st order lateral root				2nd order lateral root			
	Number	$\theta_1(\text{deg})$	Interval(mm)		$\theta_2(\text{deg})$		Interval(mm)		$\theta_3(\text{deg})$	
			Ave.	Dev.	Ave.	Dev.	Ave.	Dev.	Ave.	Dev.
(a)	16	90	4.2	0.5	60	13	-	-	-	-
(b)	18	90	3.5	0.6	62	14	2.9	0.2	70	4
(c)	12	55	4.1	0.6	62	15	2.3	0.4	68	7
(d)	13	90	3.6	0.7	58	13	-	-	-	-
(e)	14	90	3.3	0.7	68	11	2.2	0.4	68	5
(f)	13	90	3.0	0.2	60	12	-	-	-	-
(g)	13	90	4.2	0.8	70	13	2.5	0.3	72	2
(h)	14	90	3.1	0.2	68	15	2.4	0.2	68	4
For all treatments	Ave. 14	Ave. 85	3.5	0.6	63	15	2.4	0.3	68	3

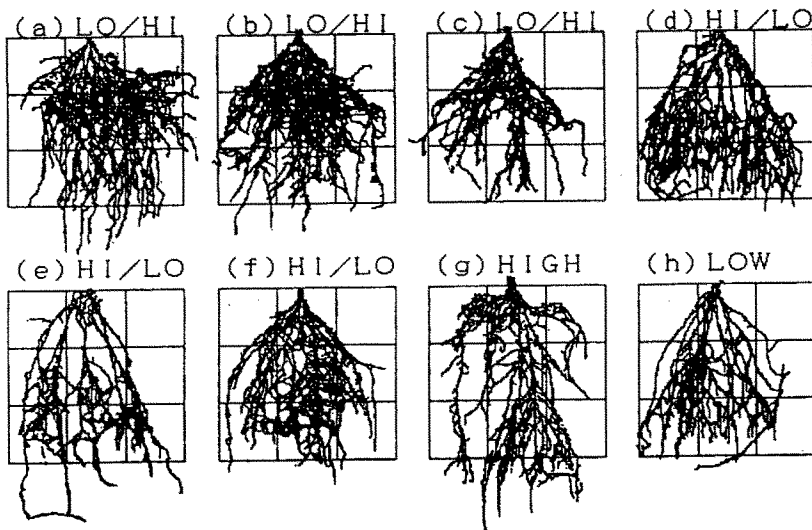


図1 根系サンプルの2値画像。図中の格子は10cm×10cmである。

次に、根系の全体的特徴を解析した。図1に根系サンプルの2値画像を示す。1画素の精度は1.43mm×1.43mmなので、主軸根の太さよりも粗い。従って、2値画像データより根系輪郭や根分布の定性的な解析はできるが、根面積などを定量評価するには信頼性が低い。

根系の輪郭を比較すると、土壌密度条件によって大略3種のパターンが見られた^{2, 4)}。第1のパターンは全層高密度の根箱(g)で、地表付近の主軸根が怒り肩のような形をした長方形型のものである。第2のパターンは全層低密度の根箱(h)と上層高密度/下層低密度の根箱(e)に見られるなで肩のような形をした鋭角三角形型のものである。第3のパターンは、他の根箱に見られるもので、上部が三角形で下部が長方形の混合型である。これらの輪郭は、第1近似として根系基部を原点とした極座標の3次元回帰モデルで記述できる⁵⁾。

$$\theta = a + bR + cR^2 + dR^3 \quad (1)$$

主軸根が根系基部から発根して伸張し、根系の骨格構造を形成する。更に無数の分枝根を発生させ、複雑な編み目状に入り組んだ根系を発達させる。根分布は主として分枝根の発生・発達の様相で決まると推察できる。そこで根系基部を観測点におき、根がどのような分布しているかを定量化する試みを実施した。

図2の観察データは、その結果である⁴⁾。Radialとは、根系基部を中心に半径Rの円を描き、その中に含まれる根系画素の数を数え上げたものである。Horizontalとは、根系基部を中心に幅2Rの縦長帯の領域に含まれる根系画素数を、またVerticalとは地表から深さRの領域に含まれる根系画素数をそれぞれ数え上げたものである。図の縦軸の値は、便宜上面積に換算した値を示した。ここでRを測度と

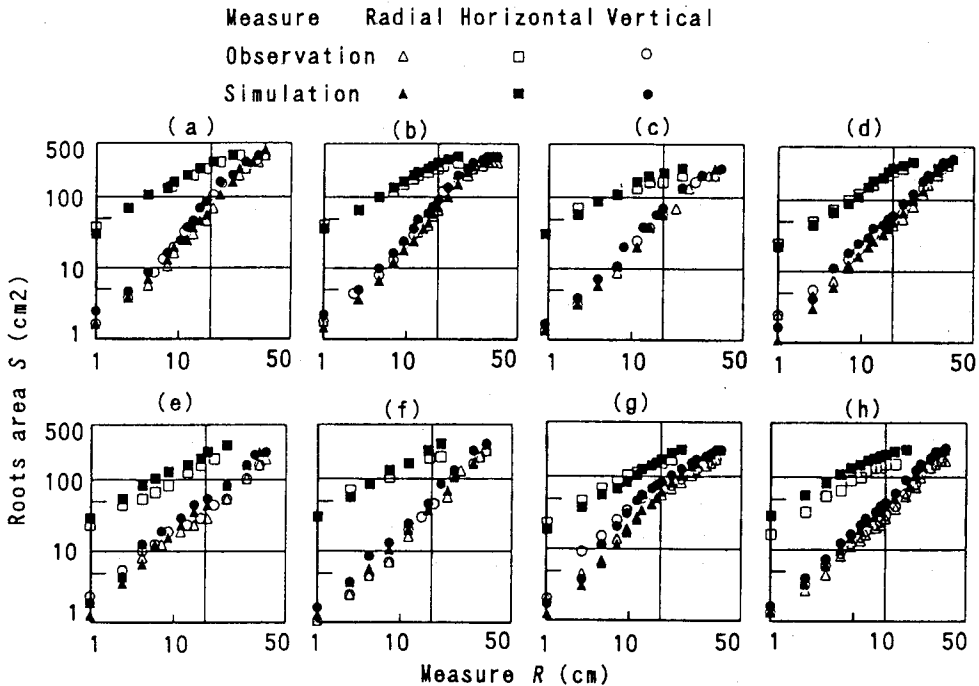


図2 根の異方的べき分布（観察結果とシミュレーション結果）

いい、数え上げられた画素数(換算面積)を測定量という。データは全て両対数グラフで直線関係を示し、べき分布が確認された。測度によって直線の勾配が異なるから、異方的べき分布である。

面的に均一な分布をすれば、図2の直線勾配は2となるが、全て2以下となった。不均一な根分布である。この図より、根分布は統計的な意味でのフラクタルであり、各測度間のフラクタル次元の関係を解析すると、異方的なフラクタル成長現象^{12, 14)}をしていることがわかり、自己アフィンフラクタル(異方的フラクタル)の様相を示していることがわかった⁴⁾。異方的フラクタルは、観測スケールを大きくしていくと空間次元がひとつ小さくなり(例えば2次元の広がりものは1次元の直線状に見えてしまう)、観測スケールによってフラクタル次元の値も変化する可能性がでてくる。

更に図2の観測円測度の結果を微分し、根の半径密度 ρ を計算すると、第1近似としては半径の3次元回帰モデルで記述できる⁵⁾。

$$\rho = a + bR + cR^2 + dR^3 \quad (1)$$

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) 渋沢 栄ほか：農業機械学会誌，54(3)，pp.53-60, 1992
- 5) 渋沢 栄ほか：農業機械学会誌，55(2)，pp.101-108, 1993
- 6) 渋沢 栄ほか：農業機械学会誌，52(1)，69-75, 1990
- 7) 渋沢 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) MANDELBROT 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：日本土壤肥料学会誌，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.

「参考文献」は次号に掲載予定の後編の分を含む。

「トウモロコシの根系パターンのモデリング2」(第3巻第4号掲載予定)

4. Lシステムとは 5. 階層的モデリング 6. シミュレーション結果 7. おわりに