

研究

根はりにおける土壤粗孔隙の役割—分布モデルとフラクタル次元による検定

北海道大学農学部 波多野隆介

1. はじめに

根の伸長を土壤の堅さ、容積重、孔隙率等の平均的な物理性と関連づけて解明しようとする試みは多く成されてきた。しかし、実際の土壤の水平断面上のこれらの分布は必ずしも均一ではなく、しかも根の伸長経路となりうる粒間粗孔隙、乾燥亀裂、古い根の跡の管状孔隙など、さまざまな粗孔隙が存在する。土壤マトリックスは根が伸長できないほど堅密でも、根はこれら粗孔隙を伸長し、下層に根系を拡大していることが、土壤調査でもしばしば観察される。

このような粗孔隙への伸長を積極的に評価しようとする試みが近年少しづつ始めている。Dexter(1978, 1986a, b)はその一連の研究により、根の粗孔隙への侵入を確率論に基づいてモデル化しようと試みた。Tardieu(1991)も粗孔隙への根の伸長が根系拡大に重要なファクターであり、土壤踏圧による根の伸長阻害は、この粗孔隙が破壊された結果起こっているためであることを示唆している。Hatanoら(1988)は土壤により粗孔隙分布状態が異なり、その情報エントロピーが根の侵入確率と密接な関係を持つことを示唆した。Hasegawa & Sato(1987)は亀裂に伸長した大豆根による水吸収を記述するモデルを提案した。Hatano & Sakuma(1990)は、さまざまな土壤の粗孔隙分布のフラクタル次元と根のフラクタル次元を比較し、粗孔隙のフラクタル次元は根の次元より高く、マトリックスが比較的堅密な土壤は根の伸長に余裕をもった空間を用意していること、その空間が亀裂のように単純で根が著しく偏る粘土質土壤は、一見水吸収に不利に見えるが、高い水分吸引圧側の透水性が均一な根の分布を示す砂質土壤より良く、水分供給が持続することでその不均一性を補っている可能性のあることを示した。

これらの研究は粗孔隙の存在が土壤の物理的肥沃度を左右していることを明瞭に示している。その粗孔隙および根分布の数値化には簡便的にフラクタル次元が使えると考えているが、本報告では簡単なモデルを作成し、それにより表現した分布と実測分布の状態をフラクタル次元で比較した結果を示し、この次元の物理的数学的意味はともかく、実用的指標の1つとなりうると思われる根拠としたい。

2. 材料と方法

1) 土壤試料

褐色低地土(札幌)、疑似グライ土(石狩高岡)、黒色ローム質火山性土(北長沼)の畑圃場の下層土(深さ30cm)から、直径30cm、高さ10cmの不攪乱土壤試料を採取した。土壤の理化学性を表1に示す。疑似グライ土は火山性土は有効水分量が多く、容積重も小さく、その物理性は他に比べて良好である。

表1 供試土壤試料の理化学性

土壤	層名	粘土 %	pH	有効水分		容積重 g/cm ³
				pF1.8-2.7 cm ³ /cm ³	孔隙率 cm ³ /cm ³	
褐色低地土	B	36.5	5.7	0.036	0.56	1.20
	C	24.5	5.5	0.043	0.66	1.03
疑似グライ土	B g	38.5	5.7	0.023	0.56	1.24
	C g	37.5	5.2	0.034	0.55	1.19
黒色火山性土	B	22.2	6.0	0.060	0.68	0.74

2) 根と粗孔隙分布の測定

直径5cm、高さ10cmのバーミキュライトを充填したカラムにトウモロコシ(2本)を育て、根がその下端に十分伸長した後、そのカラム3個を、下端約5mmを土壤カラムに差し込んで設置し、約2週間、根を十分に土壤カラムに伸長させた。土壤カラムは圃場容水量水分状態で、蒸発を抑えるため、アルミホイルで覆った。実験期間中の養水分はバーミキュライ

トカラム表面から適宜与えた。生育終了後、バーミキュライトカラムは取り外し、土壤カラムを、水平に2~3cm毎に切取り、断面に見られる粗大孔隙、根を5mmメッシュで、有り、無しで読み取った。ここで言う粗大孔隙は、根より明かに広い径あるいは幅を持つ、管状、割れ目状の孔隙で、その大きさは1から5mm程度である。なお読み取った断面は合計12点である。詳細は別に報告した(Hatanoら、1988)。

3) シミュレーション

根の分布は粗孔隙分布に依存すると仮定した確率モデルを構築した。モデルパラメータには、実測分布からその特徴を表す以下のものを抽出した。

粗孔隙分布に関するものは、

1. クラスターの中心の存在確率 ($P_c = m/t_n$; m はクラスターの数、 t_n は全観測格子数)、

2. クラスター中心からの最大距離 ($L(i)$; $i=1 \sim m$)、

3. クラスター中心からK個離れた格子に粗孔隙が存在する確率 ($P_x(i, k) = X(i, k)/(8K)$; $i=1 \sim m$, $K=1 \sim L(i)$, $8K$ は中心からK個離れた格子の数)。

根の分布に関するものは、

1. 根の伸長可能な粗孔隙の存在確率 ($P_{rp} = r_p/t_p$; r_p は根が伸長した粗孔隙を含む格子の数、 t_p は粗孔隙の数)、
2. 根の伸長可能な土壤マトリックスの存在確率 ($P_{rm} = (t_r - r_p)/(t_n - t_p)$; t_r は根を含む格子の数)。

パラメータ値の決定方法について、図1に例示した。

シミュレーションは、0~1の乱数とおのおのの確率を比較して行った。その手順は図2の通りである。

3. 結果と考察

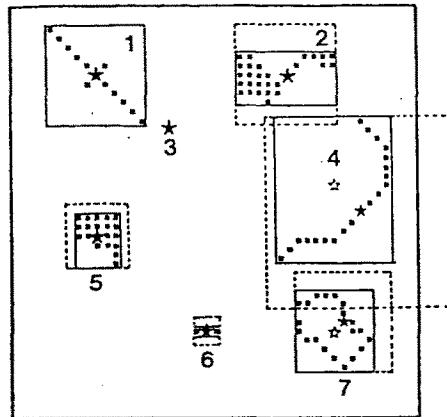
1) 粗孔隙と根の分布

図3に粗孔隙、根分布の実測結果の例を土壤ごとに示した。褐色低地土では管状孔隙が集団化した分布を示し、数も多く、根も孔隙が集団化した場所に多いことが特徴的である。疑似グライ土では乾燥亀裂のような連続的な粗孔隙の分布があり、根もその場所に多い。一方、物理性の良好なローム質黒色火山性土の粗孔隙は、根の跡の管状孔隙であるが、数は少なく、ばらばらな分布となっていた。それに対して、根は多く、しかしながらランダムな分布を示していた。これら3土壤の下層土12点の測定結果はいずれも根は孔隙中に明らかに選択的に伸長を果たしていたことが統計的に確かめられ、また粗孔隙の分布パターンをエントロピーの尺度でみたところ、孔隙が集中的な分布となるほど根はその孔隙へ伸長することが認められている(Hatanoら、1988)。

2) フラクタル次元による分布の評価

ここでは粗視化による2次元のフラクタル次元により評価を試みた。フラクタル次元は粗視化正方形の大きさと個体を含む正方形の数の両対数関係の傾きから得られるが、この直線部分は、図4にみるように2つに分かれ、視野によってフラクタル次元が変化していることを示している(Hatano & Sakuma, 1990; Hatanoら、1992)。

褐色低地土の粗孔隙の分布は細かくみると、集中化した面的なものと、点のものが混在



☆、重心；★、重心に最も近い粗孔隙（中心）
数字はクラスター番号

i	L	X(i)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5	4	2	2	2	2					
2	5	2	5	6	7	7					
3	0										
4	10	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
5	3	7	11	1							
6	1	2									
7	5	2	2	7	4	4					

図1 粗孔隙分布モデルパラメータの決定

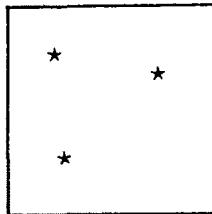
1

データ

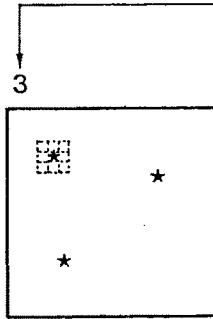
m , クラスター個数
 n , 正方形升総数

$$P = m/n, \\ mm = m, nn = n$$

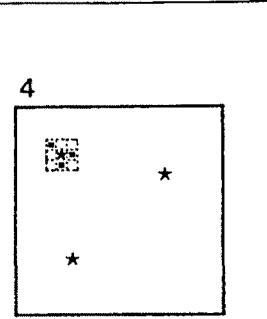
2



3



4

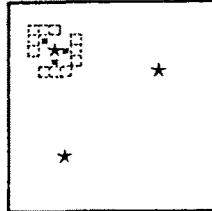


→ $P >$ 乱数の位置にクラスターの中心粗孔隙を配置。
 $mm = mm - 1, \\ nn = nn - 1, \\ P = mm/n \\ N - mm = 0$
 パラメータの読み込み。
 $L(I), I = 1 \sim m$
 $X(1,1), X(1,2), \dots$
 $\dots X(I,L(I))$

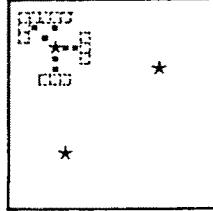
中心の回りに $K = 1$ の粗孔隙領域を配置。
 $(KX = 8 \text{ 個})$
 $PX(1) = X(1,1)/KX$
 $XX = X(1,1)$
 $KK = KX$

$PX(1) >$ 乱数の位置に粗孔隙を配置。
 $XX = XX - 1$
 $KK = KK - 1$
 $PX(1) = XX/KK$
 $N - XX = 0$
 $X(1,1) > 2 \text{ の時}$
 中心の計算
 $N = \text{一致}$

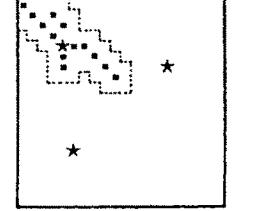
5



6



7



$K = 1$ 粗孔隙の回りに
 $K = 2$ 領域を配置。
 $(KX = 11 \text{ 個})$
 $PX(2) = X(1,2)/KX$
 $XX = X(1,2)$
 $KK = KK$

$PX(2) >$ 乱数の位置に粗孔隙配置。
 $XX = XX - 1$
 $KK = KK - 1$
 $PX(2) = XX/KK$
 $N - XX = 0$
 $K = 2$ 粗孔隙の回りに
 $K = 3$ 領域を配置。

$K = L(I)$ まで同様に粗孔隙を配置。
 $I = I + 1 \longrightarrow 3$

図2 シミュレーション手順

しており、大きくみると、大小の格子的な分布がみられる。それを分ける領域 r_0 は 23mm となる。 r_0 以下の細かくみた場合には、 0.98 次元となり、値的には 1 次元に近いが、面と点の混在が等価であった結果と考えるのが妥当であろう。 r_0 以上では 1.76 となり、やはり数値的には線と面が合はばしている状態を反映していた。ここでみられた領域 r_0 は、分布形の変換点を表す値であり、集中した孔隙の平均的な大きさを表しているのではないかと

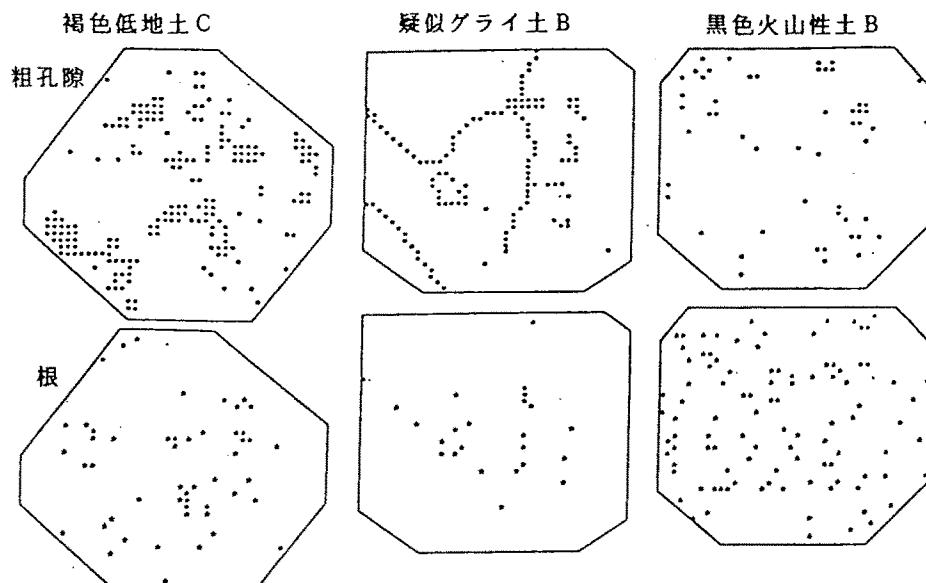


図3 粗孔隙と根の水平断面分布

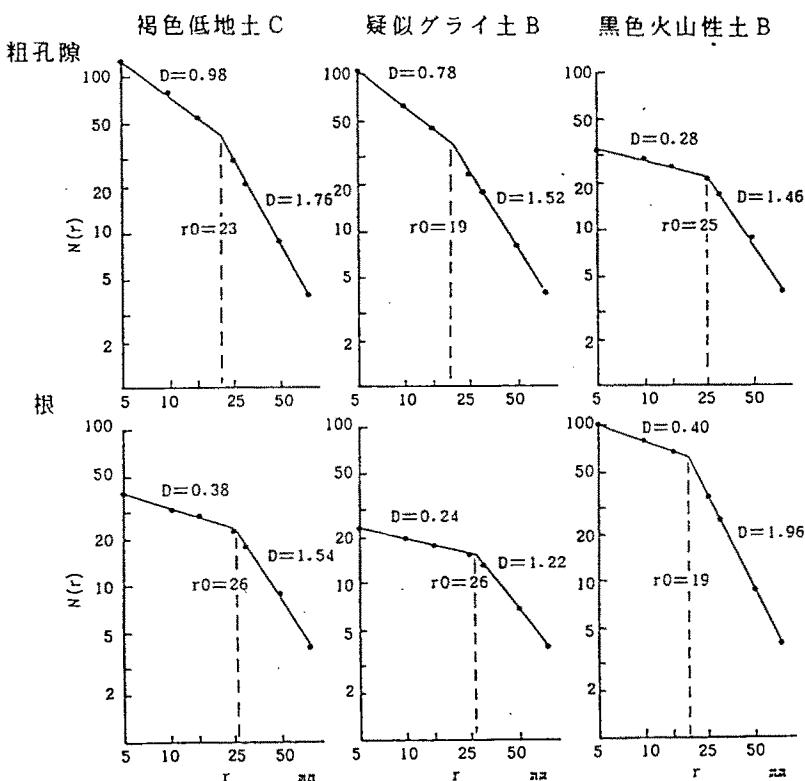


図4 粗孔隙および根の分布における粗視化正方形の一辺の長さ(r)と個体を含む正方形の数($N(r)$)の関係

推察される。根の分布は粗孔隙に比べて点在しており、領域 r_0 以下では0.38次元と0次元に近いが、 r_0 以上では格子状の分布を反映して1.54となつた。

疑似グライ土の場合には、粗孔隙分布は線的であり、ところどころに点と面の混在が認められ、これを反映して、 r_0 以下の視野では0.78次元を示し、粗く見ると1.52次元となる。黒色火山性土の場合には、面的なものは少なく、ほとんどが独立した点状であった。そのために r_0 以下の視野では0.28と小さい。根の分布は粗孔隙より込み合っており、粗く見た次元は1.96とほとんど2次元に近い。

これらの粗孔隙の次元と根の次元の関係を、 r_0 との対応で図5に示した。粗孔隙が集中化した褐色低地土および連続的な割れ目を持つ疑似グライ土では、根の分布次元は粗孔隙の次元と直線関係があり、根は粗孔隙に支配されているように見える。

そして根の次元は粗孔隙の次元より低く、すなわち1:1の直線より下にあり、もし根が分布をふやそうとしているなら、その環境がまだあるのではないかと推察される。一方黒色火山性土の場合には根の次元のほうが、粗孔隙の次元より高く、さらに根の分布は粗い視野でみると、ほとんど2次元であり十分に張り尽くした状態となっていると思われた。また粗孔隙が連続的であったり、集中化した分布をとる場合に、みている視野全体を通して関係があるということは、位置の一一致があり、それが分布様式の一致を作っているのではないかとも思われる。

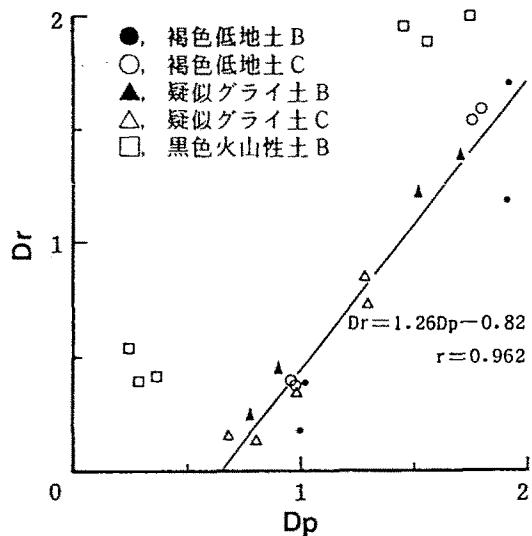


図5 粗孔隙分布の次元(D_p)と根の分布の次元(D_r)の関係

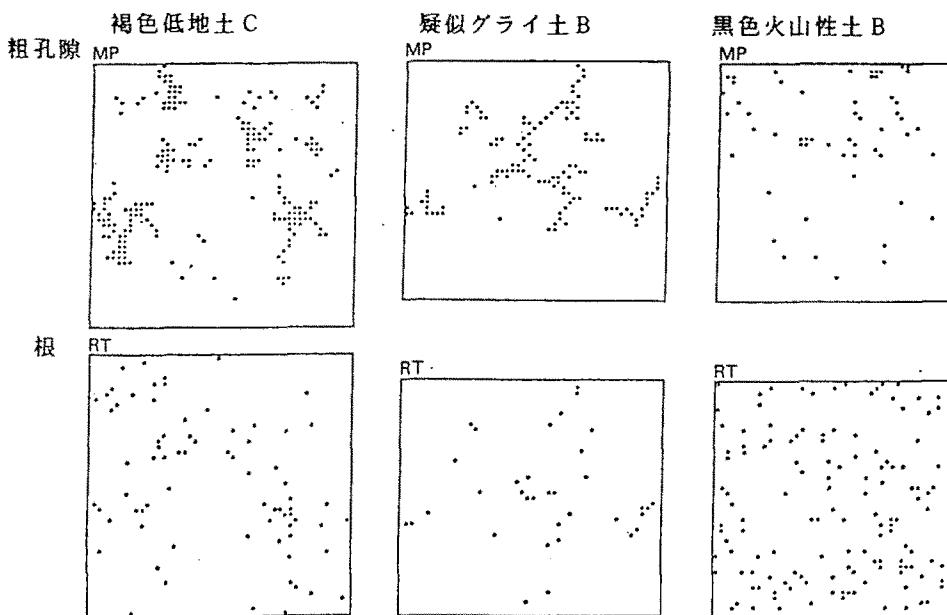


図6 シミュレーション結果

3) シミュレーションと実測分布の比較

図6にみるように、シミュレーション結果は実測分布と良く似たものとなった。その結果が、実際にどの程度近似されているかをみるために、フラクタル次元を比較した。図7に粗孔隙分布の実測次元とシミュレーション次元の関係を示す。両者はほぼ1:1の関係にあるが、割れ目状孔隙を持つ疑似グライ土ではシミュレーション次元は実測次元よりやや低く見積られた。割れ目は視覚的にはいくつかのクラスターに分けられるが、本来は連続しているものが切れ切れになっている場合もある。今回のシミュレーションではクラスターの中心をランダムに配し、その周囲にクラスターを構築していったため、クラスター間の連続性は考慮されていない。このことが、クラスターの形は良く似たものとなっても、全体としての分布様式を表すフラクタル次元に不一致を生じさせたのかかもしれない。

図8に示す根の分布の実測とシミュレーション次元の関係は、粗孔隙での関係より良い一致を示した。このように、根の分布が粗孔隙の分布に依存していると仮定した条件でのシミュレーションにより、根の分布が良く再現されることから考えれば、この仮定は正当であったと言える。また土壤により異なる粗孔隙の分布様式は、根の伸長を阻害するさまざまな物理的要因を反映した状態を示しているのであろうと推察される。渋沢ら(1992)が言うようにフラクタル次元は特定の分布を再現しない。しかし、それは視覚を補い、根の物理的環境を総合的に数値化する可能性があるという意味で、極めて有効な武器である。

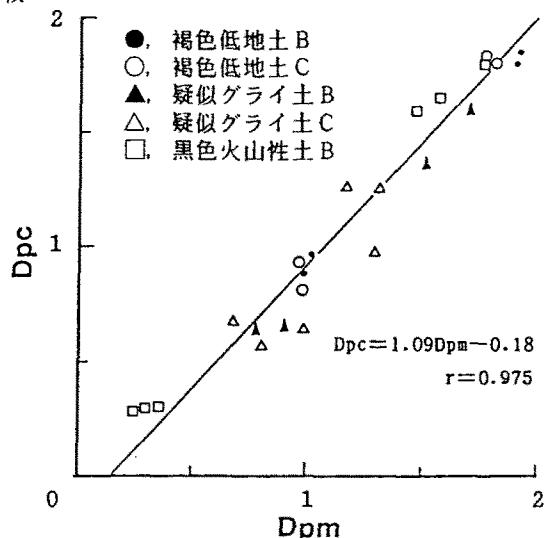


図7 粗孔隙分布の実測フラクタル次元(Dpm)とシミュレーション次元(Dpc)の比較

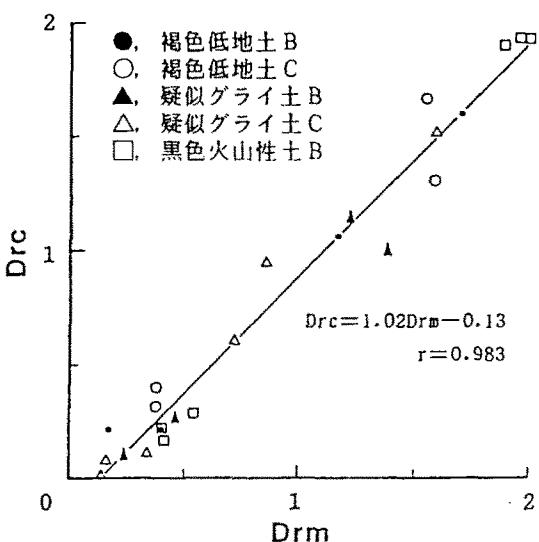


図8 根分布の実測フラクタル次元(Drm)とシミュレーション次元(Drc)の比較

引用文献

Dexter, A. R. 1978. A stochastic model for the growth of roots in tilled soil. J. Soil Sci., 29, 102-116

Dexter, A. R. 1986a. Model experiments on the behavior of roots at the interface between a tilled seed-bed and a compacted subsoil, 2. Entry of pea and wheat roots into subsoil cracks. Plant Soil, 95, 135-147

Dexter, A. R. 1986b. Model experiments on the behavior of roots at the interface b

etween a tilled seed-bed and a compacted subsoil, 3. Entry of pea and wheat roots into cylindrical biopores. *Plant Soil*, 95, 149-161

Hasegawa, S. and Sato, T. 1987. Water uptake by roots in cracks and water movement in clayey subsoil. *Soil Sci.*, 143, 381-386

Hatano, R., Iwanaga, K., Okajima, H. and Sakuma, T. 1988. Relationship between the distribution of soil macropores and root elongation. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 34, 535-546

Hatano, R. and Sakuma, T. 1990. The role of macropores on rooting pattern and movement of water and solutes in various field soils. *Trans. 14th Inter. Cong. Soil Sci.*, II, 130-135

Hatano, R., Kawamura, N., Ikeda, J. and Sakuma, T. 1992. Evaluation of the effect of morphological features of flow paths on solute transport by using fractal dimensions of methylene blue staining pattern. *Geoderma*, 53, 31-44

渋沢栄・藤浦建史・竹山光一・岩尾俊男. 1992. 土壌密度変化のトウモロコシ根系分布への影響. 農機誌, 54, 53-60.

Tardieu, F. 1991. Spatial arrangement of maize roots in the field. B.L. McMichael and H. Persson(Eds.), *Plant roots and their environment*, Elsevier B.V., 506-514