日作紀（Jpn. J. Crop Sci.）64(1)：50—57（1995）

フラクタル解析による根系分布パターンの定量的評価*

巽　二郎**
（名古屋大学農学部）
1994年7月29日受理

要　旨：根系分布を定量的に評価する目的でフラクタル理論を応用した解析を行った．根箱（30×41×2 cm）を用いて施肥量を変えて栽培したダイズとエンドウの幼植物の根系を，改良式ピンボード法で根系の配置を乱さずに2次元に展開して採取した．パソコンに接続したスキャナで根系の画像を取り込み，Box-counting法で根系のフラクタル次元（D）を推定した．根系の発達にともない根系全体のDが増加した．根系を上位根系と下位根系にわけて調べると，根系の下方への発達と下位根系のDの増加のパターンがよく対応していた．総根長（L），根投影面積（PA）とDとの関係を一次回帰で近似すると，それぞれの相関係数はダイズ，エンドウの多肥/少肥区ともにおおむねD～L＜D～PA＜L～PAの順で高かった．特にダイズの上位根系ではD～L間の相関係数が0.711～0.740とL～PA間のそれ（0.970～0.974）と比較して低かった．以上のことから，根パラメータとしてのDは，根長や根面積の単純な反映ではなく，これらのパラメータでは示し得ない根系分布の複雑度，たとえば分枝密度や根径分布といった情報を含む指標であり，根系構造の定量化のうえで有用であることが示された．
キーワード：根系，根系構造，根長，根箱，フラクタル．

Fractal Geometry in Root Systems : Quantitative Evaluation of Distribution Pattern : Jiro TATSUMI (*Faculty of Agriculture, Nagoya University ; Present Address : Faculty of Agriculture, Kobe University, Rokko-dai, Nada-ku, Kobe 657, Japan*)

Abstract : In order to describe root distribution quantitatively, fractal analysis was applied to root systems. Root systems of soybean and garden pea seeldings grown in narrow root boxes (30×41×2 cm) were sampled with minimum disturbance of root arrangement using the root box-pin board method. Root samples were taken on 15, 25 and 41 days after sowing for soybean and 30, 55 and 94 days after for graden pea. The harvested root system was spread on the scanner bed connecting to a personal computer (Macintosh IIcx), and the root image was digitized with a 256 gray scale and 144 DPI resolution. Each image stored on a magneto-optical disks loaded on a MO disk drive (Reo drive, Yano Electric) was analyzed by the NIH Image software (ver. 1.5) running on a Macintosh computer (Quadra 800). The fractal dimension (D) of root images was estimated by counting the number of pixels constituting root image at various resolutions (box-counting method). D increased as the root system developed. D of the lower half (Dl) increased slowly compared with that of the upper half. This changing pattern of Dl corresponds well to the slower development of roots into the lower soil layer. The linear positive correlations were found between D and total root length (L) and between D and root projection area (PA). The correlation coefficients between D and L, and between D and PA were lower than that between L and PA. In soybean correlation coefficient between D and L was lower than graden pea, particularly in the lower half of the root system. These results indicate that fractal analysis is applicable to root systems, and that the D can be an effective parameter describing root morphology quantitatively.
Key words : Fractal, Root box, Root length, Root morphology, Root system.

根系の形成過程は，二つの要素に大別することができる．根軸の伸長と分枝の発生である．根軸の伸長は根系骨格の拡大とともに分枝根の発生の場を提供する意味を持つ．いっぽう分枝根の発生は新たな生長中心（根端）を確保するという意味で根系形成のポテンシャリティーを高め，組織を若く保つ上で重要である．

このように根軸の長さとともに分枝の状況は根系構造を規定する重要なファクターである．自動根長測定器（ルートスキャナ）の普及以来，根長の測定がルーチン化・省力化され，根の研究の発展に大きく寄与してきた．しかし一方，根の分枝に関するデータ採取法は旧態依然とした非能率的なものにとどまっており，分枝の側面から根系の定量的解析を試みた研究はたいへん少ない[28]．

最近Fitter[1~4]がトポロジー（位相幾何学）の概念に基づいて根系の分枝パターンを解析する手法を提案し，根系の構築構造を理解する上で分枝を中心とした観点からのアプローチが有効であることを示した．この方法は根系全体の全ての分枝根の数や分枝長，分枝相互間の位置関係を計測する必要がある．

* この研究の一部は文部省科学研究費No. 02660012の補助金によって行った．
** 現在，神戸大学農学部．

NII-Electronic Library Service

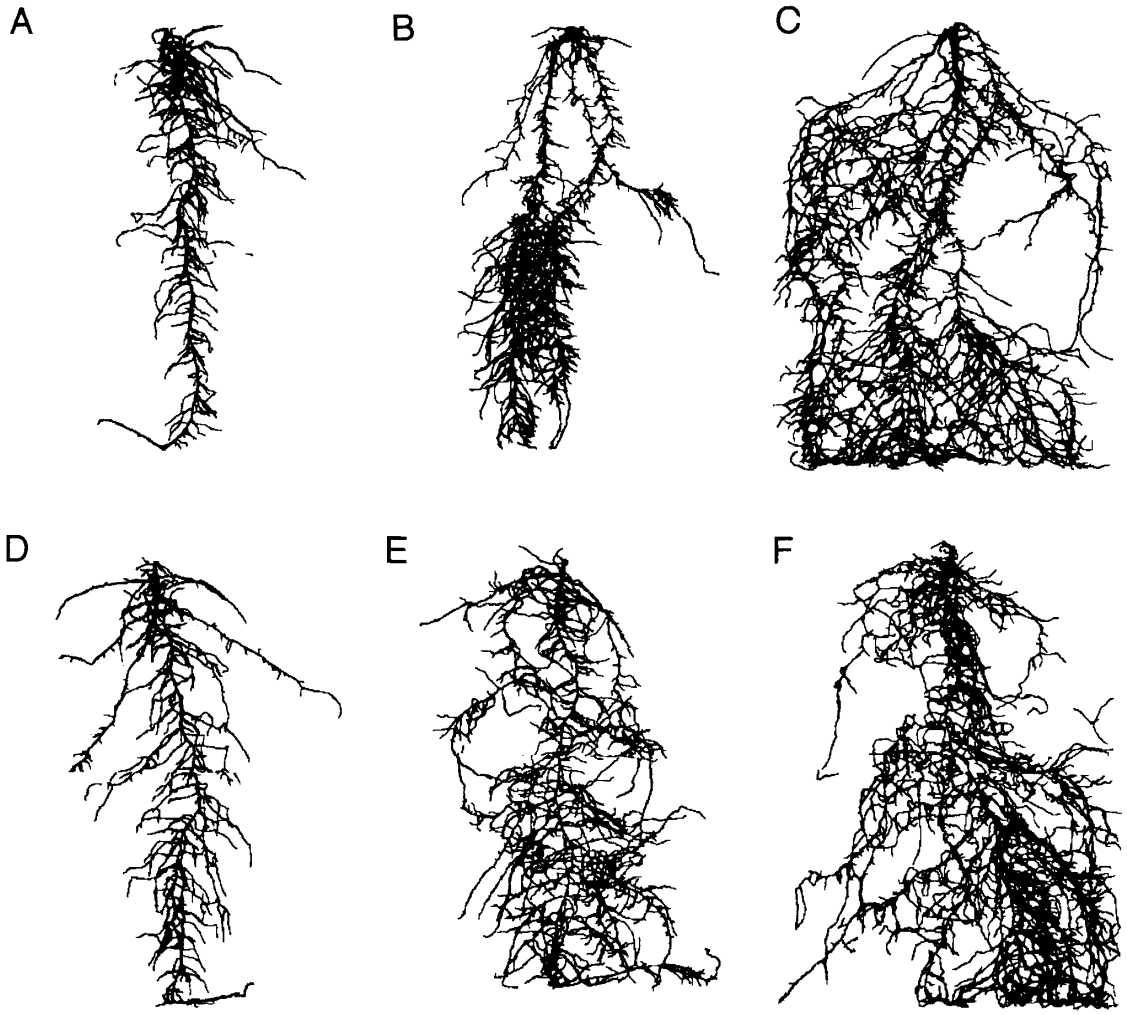


Fig. 1. Digitized images of soybean root systems grown in root box soil with high (A, B, and C) and low (D. E, and F) fertilizer levels.
A ; 15 d old (D=1.458, Du=1.504, Dl=1.343), B ; 25 d old (D=1.537, Du=1.462, Dl=1.586), C ; 41 d old (D=1.538, Du=1.521, Dl=1.550), D ; 15 d old (D=1.427, Du=1.427, Dl=1.394), E ; 25 d old (D=1.484, Du=1.484, Dl=1.483), and F ; 41 d old (D=1.536, Du=1.498, Dl=1.560). Compound fertilizer (N, P, K=8, 8, 8%) was applied at the rate of 0.3g (high fertilizer) or 0.1g (low fertilizer) per 3 kg of root box soil. Du and Dl indicate D in upper and lower half of the root system, respectively. Images are printed out in 72 DPI resolution.

したがって，多大な労力と時間が必要であることから，現在までのところ実際の研究への適用がほとんど見あたらない[7]．このようにみると，根系に関する研究がさらに発展する上で，分枝に関するデータ採取法の簡便化・省力化が必要とされていることが理解される．

自然界には根系の形によく似た枝分かれ構造が多く認められる．誘電破壊による放電パターンやヴィスカスフィンガー，金属葉などのDLA凝集体などのいわゆる樹枝状形態である[15,22,26]．

Mandelbrot[15]によるフラクタル幾何学の提唱以来，これらの自然界のパターンが，細部の構造に全体像のミニチュアが見てとれる自己相似性を有する性質，つまりフラクタルであることが明らかにされ，フラクタルの概念を用いてこれらのパターン形成の法則性が研究され，多くの成果を上げつつある[22,26]．

最近，生物学や医学の分野においてもフラクタルに着目した研究が増加し，その応用の可能性が増加しつつある[6,9,12-14,16-18,27,29]．筆者らはいくつかの作物の根系について解析し，2次元に展開した根系の分布パターンがフラクタルであること，したがって根系分布の複雑さがフラクタル次元とよばれる指数で定量化され得ることを示した[24,25]．このことは，根系の構築構造や根系分布パターンの定量化を行う上で，フラクタル解析が有効であることを示している．しかも筆者らの用いた測定手法は非常にシンプルで

NII-Electronic Library Service

あり，簡単な画像解析装置の援用によって簡便かつ短時間に根系のフラクタル次元を求めることができるという利点を有している．

根系の分布がフラクタル的性質をもつことはその後他の研究者たちによっても報告されており，根系研究におけるフラクタル解析の重要性が指摘されている[5,19]．しかし根系のフラクタルに関する研究は非常に少なく，その内包する意味や応用の可能性についてはまだ十分明らかでない．

本報告の目的は，根系の発達にともなうフラクタル次元の変化，およびフラクタル次元と根長をはじめとする根パラメータとの関係を調べ，根系形態の定量化に際してのフラクタル解析の有効性を探ることである．

材料と方法

1. 材料：幅 30 cm，高さ 41 cm，厚さ 2 cm の硬質塩ビ製の根箱（内容積 2,460 cm^3）に 3.35 kg の水稲育苗用培養土（商品名，イブキ肥鉄 1 号）と発泡ケイ酸資材（商品名，イネニカ：小野田 ALC）100 g を混合したものを詰め，基肥として 8-8-8 化成肥料を 0.3 g 加えた区（多肥区）と 0.1 g 加えた区（少肥区）の 2 つの区を設けた．このように準備した根箱にダイズ（品種，奥原早生）とエンドウ（品種，手無し赤花）の浸積した種子を根箱あたり 2 粒づつ播種し，発芽後 1 個体に間引いて，自然光下の無加温ガラス室内で生育させた．潅水は土壌表面から適宜行った．ダイズは 9 月 26 日に播種し，その後 15 日目，25 日目，41 日目に材料を採取した．エンドウの播種は 11 月 16 日で，その後 30 日目，55 日目，94 日目に採取した．反復数は（採取根箱数）はダイズで各 2〜3，エンドウでは各 2 であった．

2. 根系の採取：根系配置の乱れを最小にするために，ピンボード法によって土壌中から根を分離し，Kono らの方法[10] を用いて透明な 2 枚の薄いビニール（A3 サイズ）に挟んだ形で根系を採取した．地上部を切り離した後，採取した根系を 0.25% Coomassie Brilliant Blue R 水溶液を満たしたバット中で 1〜2 時間浸積・染色し，その後水道水で十分洗浄して過剰の色素を除去した．

3. 根系画像の取り込み：このようにして準備した根系を，イメージスキャナ（EPSON 6000GT）のガラス面上に，根系を挟んだビニールシートごとていねいに広げ，144 DPI（0.176 mm/pixel）の解像度，256 グレイ階調でスキャンしてパソコン

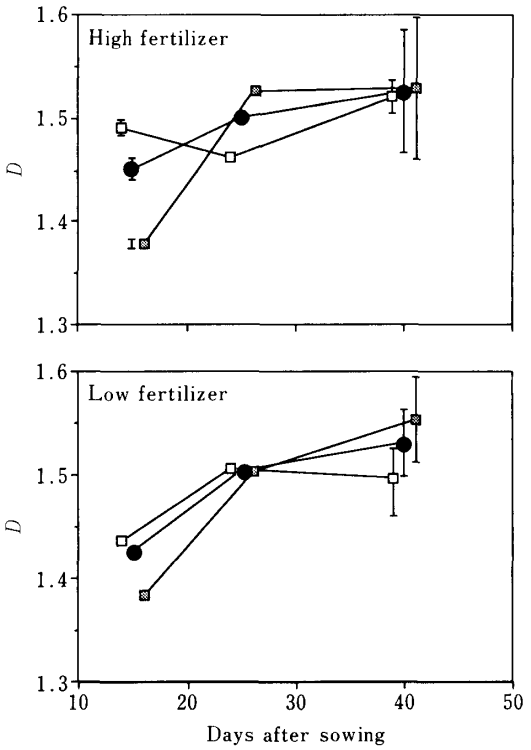


Fig. 2. Changes in fractal dimension (D) of the root system of soybean seedlings grown with high (upper figure) and low (lower figure) fertilizer levels after sowing. Symbols in figures are: closed circle; the whole root system, open/closed square; upper/lower half of the root system. Bars indicate twice standard error of the mean (n=3). Plots with no error bars indicate mean of the duplicate. See Fig. 1 for fertilizer level.

(Macintosh IIcx，アップル社) に画像を取り込んだ．取り込んだ画像は 5 インチ光磁気ディスク装置 (Reo Drive，ヤノ電気) に転送して PICT ファイル形式で保存した．スキャナのガラス面が A4 サイズであるので，画像は根系の上下二つに分けて取り込んだ．したがって全根系の画像サイズは約 400 万画素となった．

4. フラクタル次元の計測：根系のフラクタルの計測は既報にしたがい[24,25]，Box-counting 法により画像解析ソフト（NIH Image 1.5）とパソコン (Macintosh Quadra 800，アップル社) を用いて行った．略述するとまず原画像に 2 値化処理を行って根系像を背景から切り取った．このように前処理した 2 値化像を基に，まず根系を構成する画像の全画素数を計数した．ついで画素のサイズを 2^n 倍で増加させて，粗視化の程度を変化させた．この結果，画素サイズ 0.176 mm（原画像）から 5.644 mm まで

NII-Electronic Library Service

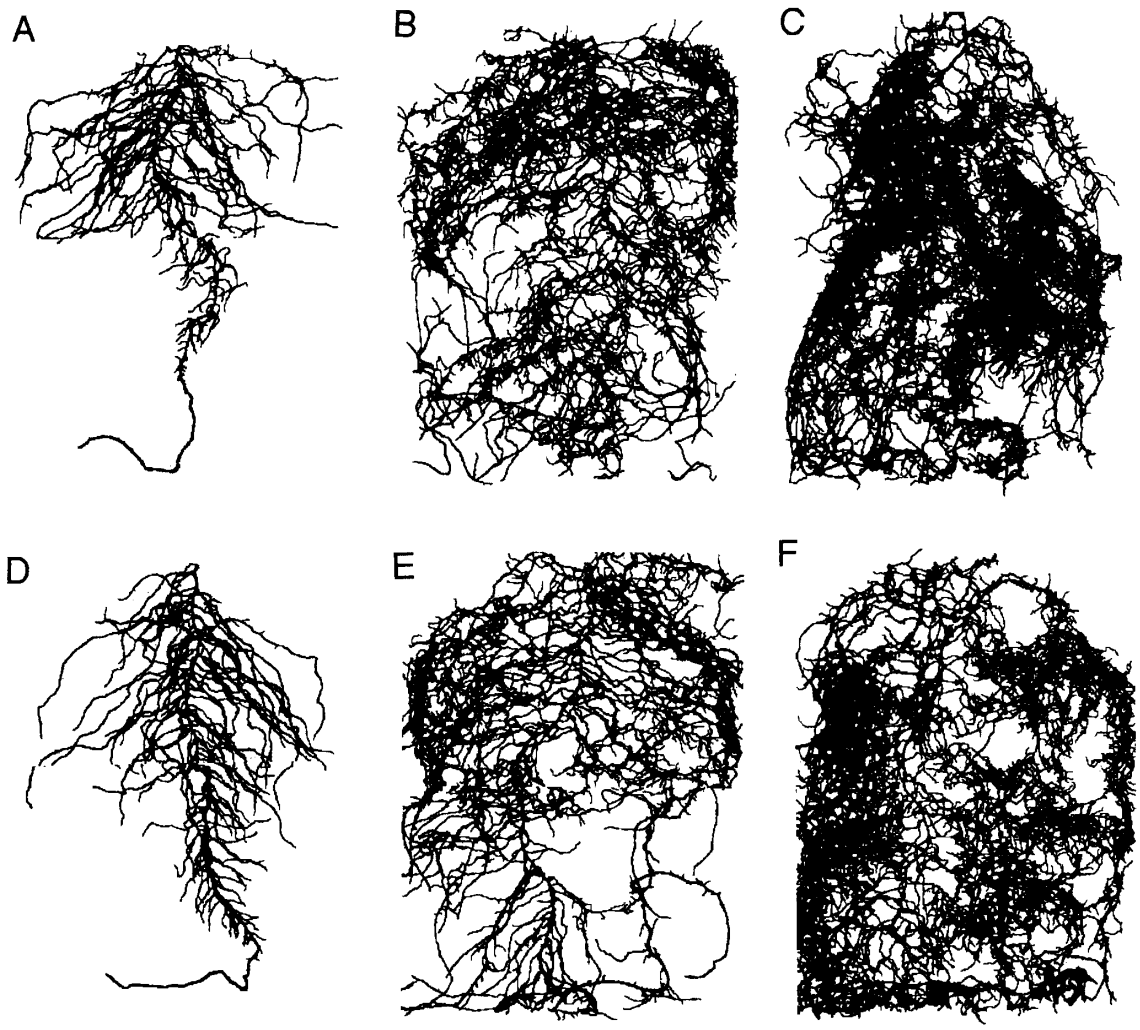


Fig. 3. Digitized images of garden pea root systems grown in root box soil with high (A, B, and C) and low (D, E, and F) fertilizer levels.
A ; 30 d old (D=1.495, Du=1.516, Dl=1.410), B ; 55 d old (D=1.602, Du=1.653, Dl=1.534), C ; 94 d old (D=1.711, Du=1.703, Dl=1.718), D ; 30 d old (D=1.521, Du=1.557, Dl=1.459), E ; 55 d old (D=1.594, Du=1.656, Dl=1.487), and F ; 94 d old (D=1.677, Du=1.685, Dl=1.667).
See Fig. 1 for fertilizer level. Du and Dl indicate D in upper and in lower half of the root system, respectively.

の，粗視化程度を異にする6段階の画像フレームにおける，根系画像を構成する画素数のデータを得た．

ついで画素のサイズの対数を横軸に，画素数の対数を縦軸に，それぞれの画素サイズの際に得られた根系構成画素数の計数データをプロットした．

ここで画素のサイズをr，その際計数された根系構成画素数をN (r) とすると，

$$\log N(r) = -D \log r + \log K \qquad (1)$$

という右下がりの回帰直線が得られる．Kは定数だから，この回帰直線は下記のように書ける．

$$N(r) \propto r^{-D} \qquad (2)$$

すなわちN (r) はrのべき乗に比例するという関係が成立している．このような直線関係は対象画像がフラクタル，つまり自己相似性を有する形の場合に成立し，そのフラクタル次元は式2の乗数の絶対値D，すなわち回帰直線（式1）の傾きの係数の絶対値で与えられる[15]．画像が2次元平面の場合，Dは1から2の間をとり，Dが大きいほど対象画像の形態が複雑であることを示している．本実験では，得られた回帰直線の回帰係数は，測定に供試した根系画像のすべてにおいて0.998以上であった．

5. 根長および根投影面積の測定：総根長は根系の2値化原画像に細線化処理を行い，根系の走行方向がランダムであると仮定して求めた[11]．根投影面積は2値化原画像の全画素面積から計算した．

NII-Electronic Library Service

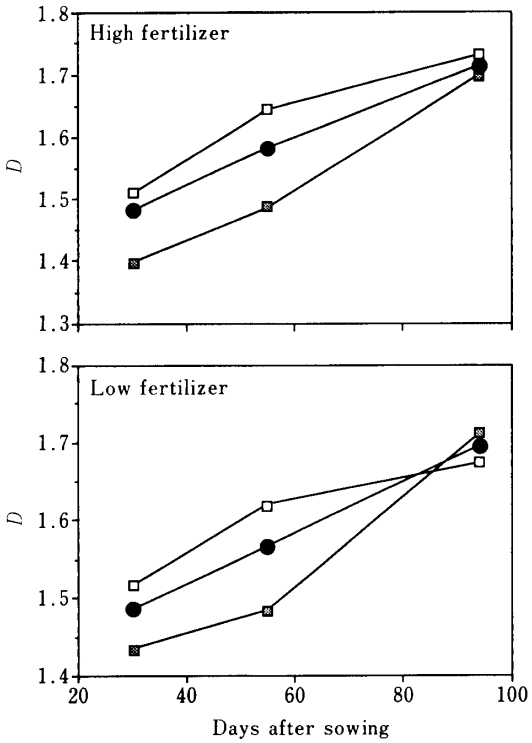


Fig. 4. Changes in fractal dimension (D) of the root system of graden pea seedlings grown with high (upper figure) and low (lower figure) fertilizer levels after sowing. Symbols in figure are: closed circle; the whole root system, open/closed square; upper/lower half of the root system. Plots indicate mean of the duplicate. See Fig. 1 for fertilizer level.

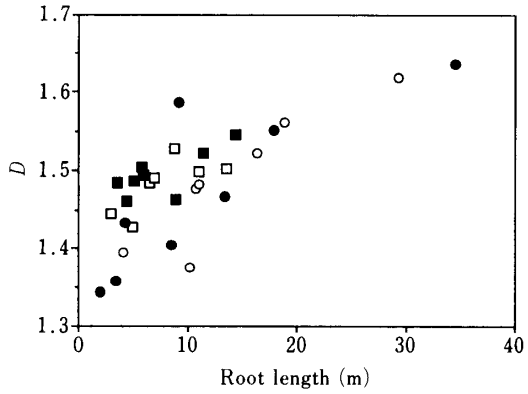


Fig. 5. Relationship between D and length of the root system of soybean seedlings. Symbols are: square; upper half, and circle; lower half of the root system. Open and closed symbols indicate high and low fertilizer levels, respectively.

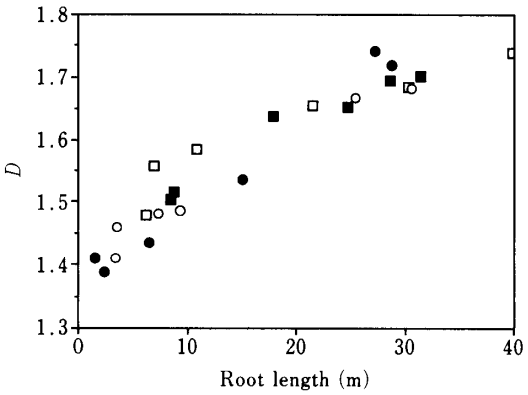


Fig. 6. Relationship between D and length of the root system of garden pea seedlings. Symbols are: square; upper half, and circle; lower half of the root system. Open and closed symbols indicate high and low fertilizer levels, respectively.

結　果

根の発達と D：第1図に多肥区と少肥区におけるダイズの生長にともなう根系の発達の様子をイメージ画像の例で示した（解像度を72 DPIで表示）．両区ともに播種後15日目では主根の近傍のみに分枝根の発達が認められるが，播種後41日目では分枝根が根箱のほぼ全面に発達した．いっぽう根系全体のフラクタル次元(D)は，このような根系の発達に対応して増加した(第2図)．根系を上半分(上位根系)と下半分(下位根系)とに分けて D の推移をみると，両区とも15日目では上位根系の D (Du) が下位根系のそれ(Dl)を上回っていたが，その後 Dl の増加が著しく，最終日の41日目の多肥区では Du と同じレベルに達し，少肥区では $Dl > Du$ となった．また施肥量の違いによって上位根系と下位根系の D の増加パターンに違いがみられた．多肥区では上位根系における D が15日目においてすでに高い値を示しその後増加速度が鈍るのに対して，少肥区では多肥区にやや遅れて25日目に多肥区と同じ水準に D が達した．一方下位根系の D の増加は多肥区で25日目まで急速に進み，その後増加が停滞するのに対して，少肥区では D の増加が25日以降も引き続き，最終的に多肥区を上回った．

第3図に多肥区と少肥区におけるエンドウの生長にともなう根系の発達の様子をイメージ画像の例で示した．播種後30日目では分枝根の発達が上位根系に比べて下位根系で貧弱であるが，生育とともに差が小さくなり，94日目では上・下位根系ともに根箱全面に発達した．このような変化を第4図に示した D の推移でみると，30～55日目では両区ともに Du が Dl を上回っていたが最終日の94日目では Du

NII-Electronic Library Service

Table 1. Correlation coefficients among root parameters of soybean and garden pea seedlings grown in the root box with high or low fertilizer[1].

Plants	Parameters[3]	High fertilizer[2]			Low fertilizer		
		Upper[4]	Lower	Whole	Upper	Lower	Whole
Soybean							
	D～L	0.740[ns]	0.820	0.837	0.711[ns]	0.907	0.982
	D～PA	0.836	0.853	0.851	0.721[ns]	0.984	0.971
	L～PA	0.970	0.991	0.989	0.974	0.934	0.997
Garden pea							
	D～L	0.973	0.990	0.987	0.950	0.895	0.939
	D～PA	0.985	0.994	0.995	0.970	0.988	0.957
	L～PA	0.989	0.999	0.996	0.990	0.998	0.991

[1] Fitted by regressin lines.
[2] Compound ferilizer (N, P, K=8, 8, 8%) was applied at the rate of 0.3g (high fertilizer) or 0.1 g (low fertilizer) per 3kg of root box soil.
[3] D ; fractal dimension, L ; total root length, PA ; projction area of root systm.
[4] Paraeters were determined for the area of upper half, lower half, and the whole root system. Each value in the table is significant at 1% level (n=8 for soybean and n=6 for garden pea), except the values with "ns" symbol.

が Dl と同じ(多肥区)あるいは Dl が Du を上回(少肥区)った.

多肥区と少肥区を比較すると,少肥区では上位根系の D の増加速度が55日目以降において多肥区より低下する傾向に示し,いっぽう下位根系では少肥区において55日目以降急速な D の増加がみられ,多肥区を上回った.このように少肥区では,実験後期における下位根系の急速な D の増加が,ダイズにおいてと同様に特徴的に認められた.

以上のように,D の値は生育時期や施肥量の違いに対応して変化し,それぞれの根系イメージからみた根系分布の直感的な複雑さの程度の違いとよく対応していた.Fitter と Stickland[5] は根箱で栽培した数種の牧草類について根系のフラクタル次元を調べ,根系の発達に対応した D の増加パターンが種によって特徴的であることを報告している.しかし,彼らの実験では根箱面に出現した根系のみをペンでトレースしたものについて解析を行っており,全根系を対象としたものではない.本実験では画像解像度を0.176 mmに設定しており,根径の比較的小さな高次分枝根をも解析対象に含んでいる.したがって本結果は,太い根からなる根系骨格だけでなく一層微細な根系構造をも含めた,より広いスケール範囲でみても根系の形態がフラクタルなパターンであり,また根系構造の発達とフラクタル次元との間に密接な関係が存在することを示している.

根パラメータと D:第5,6図に根系の重要なパラメータの一つである根長(総根長,L)と D との関係を,ダイズとエンドウについて各生育ステージをこみにしてそれぞれ示した.ダイズ,エンドウともにLと D との間に正の相関が認められたが,両者ともに根長の増加につれて D の増加が頭打ちになる傾向を示した.また上位根系と下位根系にわけてみると,ダイズでは上位根系のプロットが根長の比較的短い部分に集中し,しかも同じ根長範囲の下位根系と比べて高い D を示した.一方エンドウではこのような傾向が認められなかった.このことはダイズでは根系の上位と下位とで構造の発達パターンが異なるのに対して,エンドウでは根系全体で均質的な構造が発達するという種の根系形成戦略の違いの存在を示唆している.

第1表に,測定で得られたパラメータ間の相関を回帰直線で近似した場合に得られた相関係数を示した.全体的にみると,L～PA間において高い相関係数が存在し,これらのパラメータ間の直線的な関係が確認された.いっぽう D～L間の相関係数は全体にやや低く,エンドウに比べてダイズ,特に上位根系で低かった.各相関係数はダイズ少肥区の下位根系と全根系を除けば D～L<D～PA<L～PAの順に高くなっていた.これらのことは,根系の分布形態の複雑さの程度として示される D が,根長や根投影面積のみでは定量化できない情報を多く含むことを示している.

考　察

本実験において,フラクタル次元が根系の分布パ

NII-Electronic Library Service

ターンの複雑さを評価する簡便かつ定量的な指標の一つとして利用可能であることが示された．幾何学的にみると，樹枝状パターンの場合，分枝次元や分枝密度が高く，パターンの境界面が複雑であるほどフラクタル次元が高くなる．根系においてもフラクタル次元の増加が根の分枝次元や分枝密度の増加を強く反映していると考えられる．筆者らが予備的に根系のフラクタル次元と分枝構造との関係を検討した結果[8,20,21]，フラクタル次元と分枝関連パラメータとの間に密接な関係が示唆された．Fitter と Stickland[5] も同様な傾向を認めている．フラクタル次元で示される根系分枝パターンの複雑さを構成する要素として，根長で代表される長さに関連したパラメータだけでなく，分枝に関連する根系構築要素が重要な役割を果たしていると推察される．

第2，3図でみたように，根系を上半分と下半分に分けて調べると，両者のフラクタル次元(*Du* と *Dl*)が異なる場合がほとんどであった．これは根系が不規則なフラクタル，すなわち自己アフィンフラクタル[15,26]であるためである．根系は全体として下層へと発達するので，上下方向について異方性が強くなる[19]．自己アフィンフラクタルでは局所的なフラクタル次元と全体のパターンを特徴づける大域的な次元を持つことが知られている[26]．今後，これらの点に留意した解析方法の検討が必要であろう．また，本来，根系は土壌中を3次元的に生長する性格を持つ．3次元の土壌空間における根系の分布がフラクタルであることが，田中ら[23]によって示されているが，2次元に展開された根系の示す性質が3次元土壌空間中での根系構造にどのように還元し得るのかといった問題についての検討も必要である．

引用文献

1. Fitter, A.H. 1986. The topology and geometry of plant root systems : Influence of watering rate on root system topology in *Trifolium pratense*. Ann. Bot. 58 : 91—101.
2. Fitter, A.H., T.R. Stickland, M.L. Harvey and G. W. Wilson 1991. Architectural analysis of plant root systems 1. Architectural correlates of exploitation efficiency. New Phytol. 118 : 375—382.
3. Fitter, A.H. and T.R. Stickland 1991. Architectural analysis of plant root systems 2. Influence of nutrient supply on architecture in contrasting plant species. New Phytol. 118 : 383—389.
4. Fitter, A.H. and T.R. Stickland 1992. Architectural analysis of plant root systems III. Studies on plants under field conditions. New Phytol. 121 : 243—248.
5. Fitter, A.H. and T.R. Stickland 1993. Fractal characterization of root system architecture. Funct. Ecol. 6 : 632—635.
6. Gunnarsson, B. 1992. Fractal dimension and body size distribution in spiders. Funct. Ecol. 6 : 636—641.
7. Hetrick, B.A.D., J.F. Leslie, G.T. Wilson and D.G. Kitt. 1988. Physical and topological assessment of effects of a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus on root architecture of big bluestem. New Phytol. 110 : 85—96.
8. 弘 央子・巽 二郎 1993. エンドウ根系のトポロジー解析とフラクタル次元. 日作紀 62(別2) : 219—220.
9. Iannaccone, P.M. 1990. Fractal geometry in mosaic organs : a new interpretation of mosaic pattern. FASEB J. 4 : 1508—1512.
10. Kono, Y., A. Yamauchi, T. Nonoyama, J. Tatsumi and N. Kawamura 1987. A revised experimental system of root-soil interaction for laboratory work. Environ. Control Biol. 25 : 141—151.
11. Lebowitz, R.J. 1988. Digital image analysis measurement of root length and diameter. Environ. Exp. Bot. 28 : 267—273.
12. Lewis, M. and D.C. Rees 1985. Fractal surfaces of proteins. Science 230 : 1163—1165.
13. Long, C.A. 1985. Intricate sutures as fractal curves. J. Morphol. 185 : 285—295.
14. Mainster, M. 1990. The fractal properties of retinal vessels : Embryological and clinical implications. Eye 4 : 235—241.
15. Mandelbrot, B.B. 1983. The Fractal Geometry of Nature. Freeman. New York. 1—468.
16. Morse, D.R., J.H. Lawton, M.M. Dodson and M.H. Williamson 1985. Fractal dimension of vegetation and the distribution of arthropod lengths. Nature 314 : 731—733.
17. Nelson, T.R., B.J. West and A.L. Goldberger 1990. The fractal lung : Universal and species-related scaling patterns. Experientia 46 : 251—254.
18. Obert, M., P. Pfeifer and M. Sernetz 1990. Microbial growth patterns described by fractal geometry. J. Bact. 172 : 1180—1185.
19. 渋沢 栄・藤浦健史・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.
20. 高貝公一郎・巽 二郎 1993. 施肥レベルと遮光処理がマメ科作物の根系発達におよぼす影響. 日作紀 62(別2) : 217—218.
21. 高貝公一郎・巽 二郎 1994. インゲンマメ根系のトポロジー構造とフラクタル解析. 日作紀 63(別1) : 198—199.
22. 高安秀樹 1986. フラクタル. 朝倉書店, 東京. 1—186.

NII-Electronic Library Service

23. 田中典幸・有馬　進・原田二郎・三原　実 1990. ダイズの根系構造に関する研究—パイプモデルと相似性について. 日作紀 59(別1) : 252—253.
24. Tatsumi, J., A. Yamauchi and Y. Kono 1989. Fractal analysis of plant root systems. Ann. Bot. 64 : 499—503.
25. Tatsumi, J. 1993. Fractal Properties of the Root System of Legume Seedlings. In Low-input sustainable crop production systems in Asia. KSCS, Seoul. 451—460.
26. Vicsek, T. 1989. Fractal Growth Phenomena. World Scientific, London. (宮島佐介訳, フラクタル成長現象, 朝倉書店) 1—294.
27. Vlcek, J. and E. Cheung 1986. Fractal analysis of leaf shape. Can. J. For. Res. 19 : 124—127.
28. Yamauchi, A., Y. Kono and J. Tatsumi 1987. Quantitative analysis on root system structures of upland rice and maize. Jpn. J. Crop Sci. 56 : 608—617.
29. Zeide, B and P. Pfeifer 1991. A method for estimation of fractal dimension of tree crowns. For. Sci. 37 : 1253—1265.

NII-Electronic Library Service