

作物の根系の計量形態学的解析

(研究課題番号 0 2 6 6 0 0 1 2)

平成 3 年度科学研究費補助金

(一般研究 C)

研究成果報告書

平成 4 年 3 月

研究代表者 巽 二郎
(名古屋大学農学部助教授)

名古屋大学図書	
和B	80648

目次

[I] はしがき	1
(1) 研究組織	2
(2) 研究経費	2
(3) 研究発表	2
[I I] 研究成果	
1. 概要	3
2. 根系画像データベースに関する研究	4
3. 根系イメージからの高次情報の抽出	10
4. 根系の構造とフラクタル次元	12

[1] はしがき

最近、植物の根系の構造と機能の解析の重要性に着目され、さまざまな分野で根系に関する研究が幅広く取り上げられ、その解析が進められている。植物の根は主として地下に発達するために、研究対象物として直接調べるためには、土壌中から取り出す必要がある。そのための採取技術や方法が開発されてきているが、土壌中にあるがままのインタクトな状態での根系の構造や機能の実態は十分解明されていない。

根系の機能に関して言えば、アイソトープを用いたトレーサー法によって *in situ* での養分吸収能などはおおまかに知ることができる。しかし土壌中の根系の形態や構造についての情報は散発的で乏しく、またその蓄積も一事例としての、しかも断片的、局所的かつ定性的なものにとどまっている。

本研究は、根系の形態的アーキテクチャを定量的に記述・解析しようと試みたものである。そのためにフラクタル幾何学を用いて根系形態の解析を行うと共に、根系アーキテクチャの原データともいえる根系像を、個人コンピュータ上にデジタルイメージとして蓄積し、検索、情報抽出などの可能な小規模な根系データベースシステムの構築を目指したものである。このような試みによって、根系アーキテクチャの基本構造の解析、根系生長のモデル化、植物種や環境による根系構造の変異などに関する情報が整理され、関連づけられ、当該分野の研究が一層発展すると期待される。

平成4年3月(1992年3月)

研究代表者 巽 二郎

(1) 研究組織

本研究の研究組織および研究経費は以下のとおりである。

研究代表者： 巽 二郎 (名古屋大学農学部助教授)

研究分担者： 吉田重方 (名古屋大学農学部教授)

(2) 研究経費

平成2年度： 2,300千円

平成3年度： 600千円

合計： 2,900千円

(3) 研究発表

1. 学会誌など

Tatsumi, J., A. Yamauchi and Y. Kono Fractal analysis of plant root systems. Ann. Bot. 64: 499-503 (1989).

巽 二郎 根系画像データベースに関する研究 I. パーソナルコンピュータによるシステムの構築 日作東海支部報 112: 25-26 (1991).

Tatsumi, J. and S. Yoshida Fractal propaties of the root system of soybean. Jpn. J. Crop Sci. (in preparation).

2. 口頭発表

巽 二郎 マメ科作物の根系形態のフラクタル解析 日本作物学会 1992年4月発表予定

〔ⅠⅠ〕研究成果

1. 概要

作物の根は、高次元の分枝を繰り返しつつ土壌空間に生長する。このような根は根系を形成し、それは植物種の違いや土壌環境に対応して、柔軟かつ多様な発達を示す。この根系の形態やアーキテクチャの定量的把握と根系形成の法則性の解明は、根系の機能の解析や根の活力の評価、根系形質の育種への導入、さらには作物の生産性向上のために重要である。

本研究は、（１）根系データ採取の効率的なシステムの開発、根系像の有機的記録／蓄積を計るための根系データベースの構築、（２）根系形態の定量的解析を、コンピュータを用いて能率的に進めるための、根系形態を記述、解析するためのモデルの開発の二点に焦点をあてながら、種としてマメ科作物の根系構造の持つ、基本的な性格ならびに根系発達の一般的法則性を計量形態学的に明らかにしようとした。その結果、

（１）個人あるいは研究室レベルでの使用に適した、安価でしかも高性能な、根系像イメージ入力／解析システムを開発した。このシステムは通常の根系像の画像解析に十分な能力を持ち、また光磁気ディスクの採用により、小規模な画像データベースとしても実用的に使用しうることが示された。

（２）数種のマメ科作物の根系形態のフラクタル解析の結果、これらの根系が比較的広いスケール範囲にわたってフラクタル構造であることが明かとなった。また根系形態の複雑さの指標であるフラクタル次元は、根系の生長にともなって増加することが示された。

（３）根系形態のフラクタル次元と、根系生長の主要なパラメータである根長および根端数との関係を調べた結果、フラクタル次元はこれら２つのパラメータと密接な正の相関を持つことが示された。分枝数を反映する根端数とフラクタル次元（ D ）との相関は、根長と D との相関と比較してやや低いことから、 D で示される形態的指数は根系の分枝の密度だけでなく、根長密度や根径分布特性をも一定程度含むものと考えられた。

（４）以上のことから、フラクタル解析は根系の形態構造を定量的に取り扱ううえで有力な解析法であることが示された。

2. 根系画像データベースに関する研究

1) パーソナルコンピュータによるシステムの構築

私達は現在改良根箱法を用いた根系の構造解析を行っているが、その過程で大量の根系写真、あるいは根系サンプルの蓄積が生じている。これらのサンプルあるいは写真の大部分は、研究上必要な一部の根パラメータを測定した後は再び利用されることが少なく、ストックされたままになっている。このような根系像をデジタル画像としてコンピュータのシステム中に蓄積し、必要に応じて検索、利用することの可能な画像データベースを構築すれば、研究上有益だと考えられる。また検索した根系画像を基に、新しい視点から画像処理を加え、根系形態／構造に関する種々のパラメータを得ることも可能となる。

このようなパターン情報を数値化したデータを利用しやすい形に加工、蓄積、管理・更新し、他のデータと結合しやすい形にファイル化するシステムを、一般に画像データベースと呼んでいる。すでに画像データベースとしては地図や医用写真に関するものなどが開発利用されているが、ここでは個人的あるいは小グループでの根系研究に適した、小規模で簡便、安価なシステムの開発を目的とした。

(1) システムのハードとソフト

システムの構成：第1図に本システムの構成を示した。画像蓄積用の外部メモリーには再書き込み可能な5インチMOディスク（光磁気ディスク）装置を用いたのが特徴である。MOディスク1枚の片面で約300MBの記憶容量があり両面で約600MBとなる。ただ現在のところMOディスクには互換性がない。したがって異なるMOドライブで書き込まれたディスクは共用できない。最近3インチのMOディスクが開発された。もし互換性が保証されれば、このようなデータベースの外部メモリーとして一層の価値が発揮できると考えられる。

CPUとしてアップル社のMacintosh IIcxを8MB RAM、80MBハードディスクで用いた。この機種は初心者にも扱いやすいのが特長である。

画像入力用の装置としてここではスキャナー(EPSON;GT-6000)を用いた。A4サイズを最大600DPIの分解能でデジタル入力ができる。

画像取り込みソフトはE P S c a n Ver. 1.1 を，画像解析ソフトはI m a g e Ver. 1.27 を用いた．画像ファイルはP I C T形式で保存した．

画像イメージの取り込み：第1表にA 4サイズ (210 x 297 mm)の根系像の画像取り込みの際の分解能と，取り込んだイメージの展開に必要なC P U上のR A Mサイズを示した．取り込む画像のサイズが一定の場合，分解能が2倍になると必要なメモリは4倍となる．7 2 D P I (ドット／インチ)の場合分解能は約0. 3 5 mmである．マメ科作物などの比較的太い根をもつ根系の骨格を取り込む場合には，この程度の分解能でも十分であると思われるが，イネ科作物などの側根は一般に細いのでさらに高い分解能 (3 0 0 D P I程度)が必要であろう．イネの場合細い側根では0. 0 5 mm程度の根径をもつ．本研究では，マメ科作物の場合主として1 4 4 D P Iを用いた．

第1表にはさらに画像取り込みの際の濃淡のレベルと必要メモリサイズとの関係も示してある．2値 (1 b i t／白黒) 画像は必要メモリが少ないが，取り込みの際の条件によって画質が大きく左右される．たとえば細い分枝根などが消える場合がある．したがって良質のイメージをうるためには最低でも1 6階調程度が望ましい．たとえば0. 0 8 mmの分解能で1 6階調の根系像を取り込むとすると，必要なR A Mメモリサイズは約1 0 M Bとなる．しかしここで用いたC P Uの主記憶は8 M Bであるから能力を越えている．画像の取り込みは分割すれば良いが，画像イメージの加工，計測のためには1つの根系像をあまり細分化するのは取扱上不便である．このようなことから本システムではR A M上の画像サイズとして2 M Bすなわち分解能0. 1 8 mm (1 4 4 D P I)，1 6階調程度以下が取り扱いやすいことがわかる (第2図)．

画像イメージのファイリング：私達はマメ科作物の根系構造骨格の解析のために分解能0. 3 5 mmあるいは0. 1 8 mm，1 6階調を採用し，これを原画像としてファイルした．P I C T形式で保存した場合，画像にもよるがおよそ1 5 0 0から1 0 0 0程度の画像が1枚のM Oディスクに収容できる．また階調画像ではなく，白黒画像の場合はこの1 0倍程度の画像ファイルが収納可能である．第2，3図は原画像を二値化処理したもので，それぞれ1 4 4と7 2 D P Iの解像度のものを示した．

(2) 根系像の採取法

根系像の由来はさまざまである．塹壕法によって得られる土壌断面のトレー

ス像，コアサンプリング法などによる断片化した根系サンプルなど，土壌中における根系構造の乱れの比較的小さいものや多いもの，サンプルサイズの大きいものや小さいものなどがある．本研究では縦42cm，横30cm，厚さ2cmのほぼA3サイズの根箱に土壌をつめ，この中に発達した根系を対象とした．Kono（1987）らの方法で根箱中の根系を採取した．採取した根系は透明のビニールにはさまれた状態で得られる．メチレンブルー0.1%水溶液で1時間染色した後，2から3時間水洗する．このようなサンプルを直接スキャナーのガラス面にのせ，余分な水分を濾紙などで取り除いた後入力した．このような方法で簡便に能率良く根系像をデジタル化することができる．

第4図上はスキャナーで取り込んだ根系イメージの原画像の例を示す（144DPI，16 gray scale）．下の図はそれをイメージ処理して二値化した根系像である．

このような根系像を基にして，根系の構造に関する種々のパラメータの抽出を行った．

引用文献

1. 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.
2. 坂内正夫，大沢 裕 1987. 画像データベース 昭晃堂（東京）

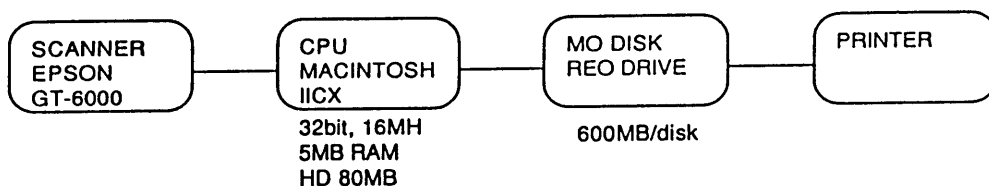
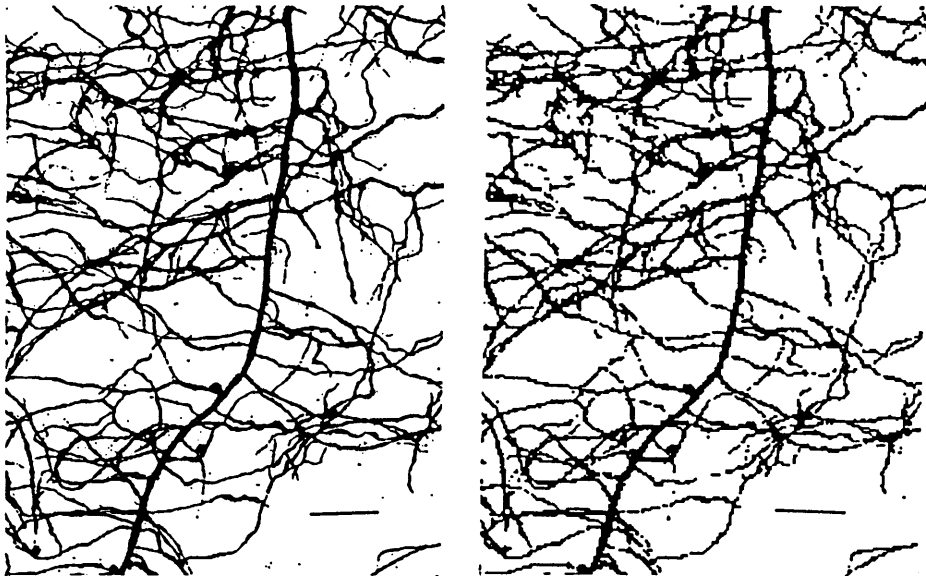


Fig. 1 Schematic diagram of the hardware system for a root image database.

Table1. Relationship among resolution, gray scale and memory size (KB) of a image in the frame memory.

DPI	m m	1bit	4bit	8bit
72	0.35	148K	582K	1164K
144	0.18	590K	2346K	4584K
300	0.08	2539K	10156K	20312K



Figs. 2 and 3. Root images of 144 DPI (left) and 72 DPI (right), which were processed for binary images: A portion of the root systems of soybean seedlings grown for 24 days in root boxes. Bars indicate 10mm.

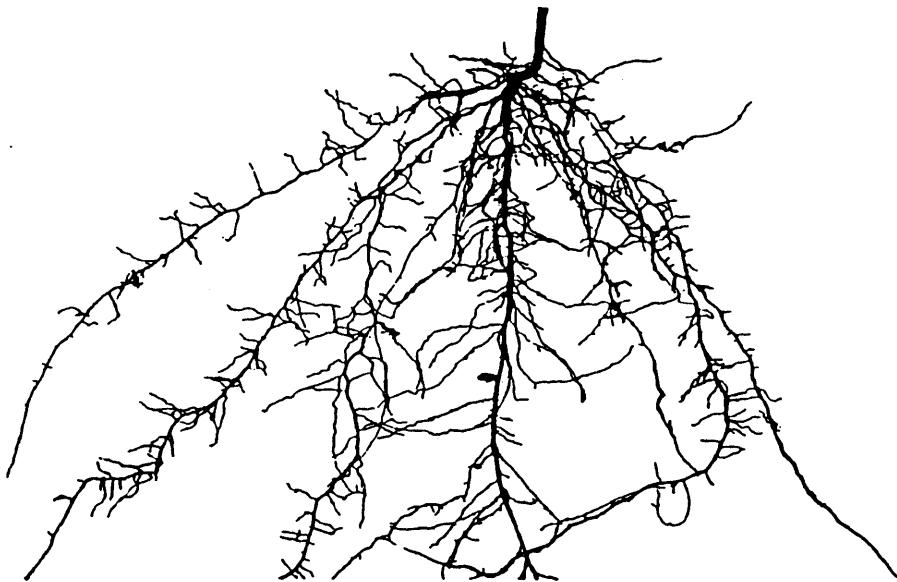
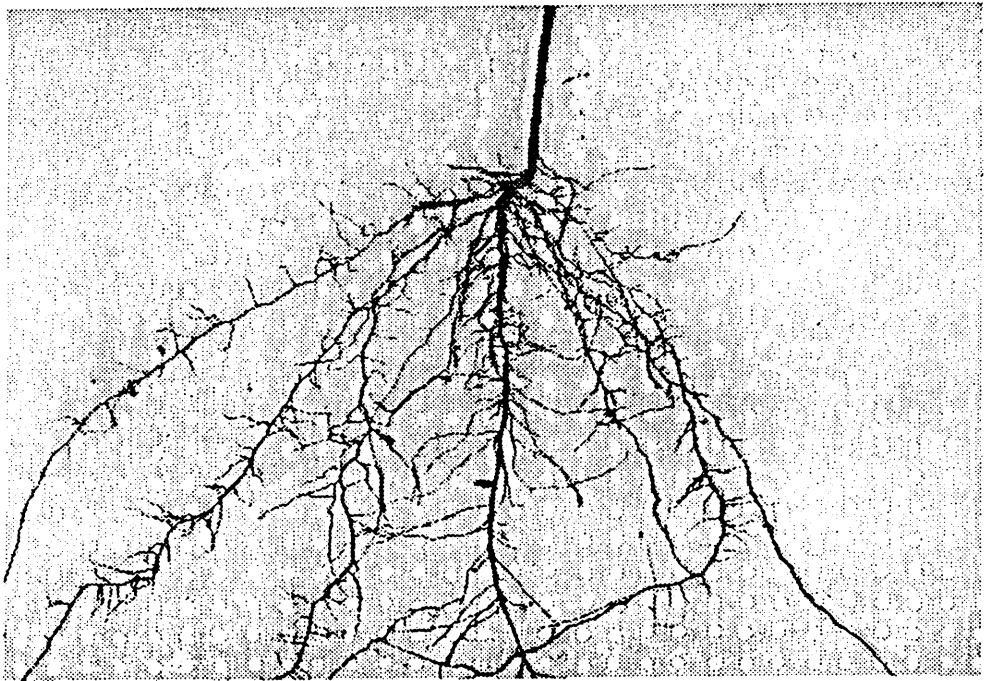


Fig. 4 Images of the root system of soybean digitized in the frame memory. Upper, 4 bit gray scale image; lower, binary image.

3. 根系イメージからの高次情報の抽出

根系の投影面積や根長（密度）などはもっとも一般的な根系パラメータとして用いられている。根系のパターンの特長のひとつは分枝、即ち枝別れを有する点にある。Fitter (1982)は Morphometric analysisの手法によるアプローチで、根系の定量的記述と解析を試みた。川の流れの形は枝別れ構造である。このようなパターンの場合ホートン則 (Horton's Law of Branching) がなり立つことが知られている。つまり、いま枝別れしたそれぞれの分枝次元別の分枝を考えた場合、ある次元の分枝の数は、その上あるいは下の次元の分枝の数と比例的関係にある。すなわち分枝次元 (u) を横軸に、各次元の分枝数 (N) の対数を縦軸にとると、右下がりの直線ができる。この直線の傾の絶対値の逆対数を分枝比 (R_b) と呼ぶ。分枝比の違いは枝別れ構造の違いを定量的に示している。たとえば同じ分枝数を持つ構造であっても、高次分枝の発達の違いによって分枝比が異なる。この解析法はしかし次のような欠点をもつ。1) しばしば良い直線関係が成り立たない場合がある。2) ランダムな分枝構造は必然的にホートン則に従う。

その後 Fitter (1985)はトポロジカルモデルを提唱した。枝別れ（樹形）構造はリンク (Link) をもつ。リンクには外部リンク（生長点）と内部リンクが区別される。またそれぞれのリンクは個々の重み (Magnitude; たとえばすべての外部リンクは重み 1 である) とパス長 (Pathlength; ある点から出口までのリンク数) をもつ。その結果 System magnitude (生長点/根端数) が同じであっても分枝の仕方の違いによって、Diameter (d) /Altitude (a) (最長のパスにおけるリンク数) が異なる。

Fitter のこれらのモデルは根系構造の解析に有用であるが、しかし広く用いられてこなかった。その理由は、これらの解析法を適用するためには、根系全体にわたる各分枝状況の精細な測定が必要なためである。幼植物においてさえ、その根系は数百のオーダーの分枝を有する。

最近、Mandelbrot (1983)が自然界にあるさまざまなものの形がフラクタルであることを明らかにした。たとえば海岸線の形や山の稜線の形、雲の形や放電の形、川の流れの形などはフラクタル幾何学によって数学的に取り扱い記述できることができて、それらの形の複雑さの程度がフラクタル次元 (D) によって定量的に表現できることが示された。木の樹形がフラクタルであることを

Morseら(1985)が示した。根系の形態もまたフラクタルであることが想像されるが、このことはTatsumiら(1989)によって始めて示された。つまり根系の形は自己相似性を持つということである。根系形態へのフラクタルの応用は、次のような利点を有する。1) フラクタル次元の計測がコンピュータを用いて比較的簡便に可能なこと、2) コンピュータによる解析に適していること、3) したがって多数の根系サンプルを処理可能なこと、4) フラクタルモデルによる根系生長のシミュレーションが可能なこと。

引用文献

1. Fitter, A. H. 1982. Morphometric analysis of root systems: application of the technique and influence of soil fertility on root system development in two herbaceous species. *Plant. Cell Environ.* 5:313-322.
2. Fitter, A. H. 1985. Functional significance of root morphology and root system architecture. In *Ecological Interaction in Soil* (Special publication of the British Ecological Society, No. 4; Ed. by A. H. Fitter, D. Atkinson, D. J. Read and M. B. Usher), pp. 87-106, Blackwell, Oxford.
3. Mandelbrot, B. B. 1983. *The Fractal Geometry of Nature*, 468 pp. Freeman, New York.
4. Morse, D. R., Lawton, J. H., Dodson, M. M. and Williamson, M. H. 1985. Fractal dimension of vegetation and the distribution of arthropod body lengths, *Nature* 314: 731-733.
5. Tatsumi, J., A. Yamauchi and Y. Kono 1989. Fractal analysis of plant root systems. *Ann. Bot.* 64: 499-503.

4. 根系の構造とフラクタル次元

前節において、根系形態のフラクタル解析の可能性が示された。しかし、これが根系構造のどのような形態的特長と関連しているのか、フラクタル次元 (D) で示される根系パラメータが、どのような意味合いを持つのか、は明らかではない。そこで本実験では根箱で生育させた根系についてこれらの点を中心に検討を加えた。

材料および方法

厚さ 2 cm, A 3 サイズのプラスチック製の根箱に、水稻育苗用の培養土 (イブキ肥鉄 1 号) とこれに重量比 3 % の割合で発泡ケイ酸資材 (イネニカ) を混和したものを 3 kg 充填した。肥料は 8-8-8 化成を根箱当り 0.2 g (Exp. 1, and 2) あるいは 0.1 g と 0.3 g (Exp. 3) を均一に混和した。播種 1 日前にこのように準備した根箱を畑土を懸濁させた水道水に浸漬し、水を含ませた後引き上げ、過剰の水分を自然流下させた。このような根箱にダイズ (品種、奥原早生) またはササゲ (品種、ジュウロクササゲ) を各 2 粒あて播種し、ガラス室内で生育させた。その後間引いて 1 本立てとした。実験 1 ではダイズを 5 月 2 日に播種し、その後 16 日目 (5 月 18 日), 33 日目 (6 月 3 日), および 40 日目 (6 月 10 日) にサンプリングした。実験 2 ではダイズを 6 月 21 日に播種し、その後 11 日目 (7 月 2 日), 24 日目 (7 月 15 日) に、ササゲを 6 月 21 日に播種し、その後 11 日目 (7 月 2 日) と 32 日目 (7 月 23 日) にそれぞれサンプリングした。

地上部を切り離した後、根系をピンボードを用いていねいに土壌から洗いだし、ビニールにはさんで採取した。採取した根系サンプルを 0.1% メチレンブルーで 2 から 3 時間染色した後、水道水で良く洗い、余分な色素を除去した。このサンプルの根系像をすでに述べた方法でスキャナーを用いてデジタル画像として取り込み、光磁気ディスクに保存した。

フラクタル次元の測定：

取り込んだイメージは強調処理を施した後、二値化処理を行った。余分なゴミや不要部分を消去した後、Tatsumi ら (1989) の方法で根系のフラクタル次元を測定した。すなわち簡単に述べると；根系イメージを構成するピクセルのサ

イズ (r) を 2 倍, 4 倍, 8 倍, . . . と, 変化させてそれぞれのスケールでの根系を構成するピクセル数 (N) を数える (第 5 図) . いま横軸にピクセルのスケールの対数 (log r) を, 縦軸にピクセル数の対数 (log N) をプロットすると, もしイメージがフラクタルであれば, 右下がりの直線が得られる (第 6 図) .

すなわち

$$\log N \approx -D \log r + \log k$$

ここで k は定数, ゆえに

$$N \propto r^{-D}$$

このベキ指数 (直線の傾き) の絶対値がフラクタル次元 D を与える. いま 2 次元で考えているから, 図形が直線の場合, D は 1 となり, 平面を覆うベアノ曲線などの場合は D が 2 となる.

このような直線関係は実際の形の場合, あるスケール範囲においてのみ成立する. 第 6 図は第 5 図に示した根系の log r ~ log N の関係をプロットしたものである.

ここで用いた D を求める方法は, 粗視化の度合いを変化させるやり方である. このほかに D を求める方法は, 測度の関係より求める方法, 相関関数より求める方法, 分布関数より求める方法, スペクトルより求める方法, などがある (高安, 1986) . 洪沢・荒木 (1990) は測度の関係からトウモロコシの根系の D を求めている.

根長の測定:

根長の測定は根系イメージを基にして, 次のような方法をもちいた. 二値化したイメージに細線化処理を施す (第 5 F 図) . 細線化されたイメージを基にして次の式のように求めた (Lebowitz, 1988) .

$$L = D ((H + V) + 2^{0.5} X)$$

ここで D は任意の 2 つの画素間の距離, H, V, X はそれぞれ水平, 垂直, 対角線上に隣り合った画素対の数 (細線化されたイメージ上の) である.

本実験では, 根系を構成する各根の走行方向が不規則であると仮定して, 簡便のために $H = V = 2 X$ として根長 (L) を計算した.

結果および考察

1) 根系のフラクタル

測定に供したすべての根系について、たとえば第6図に示したように、 $\log r$ と $\log N$ との間に常に高い直線関係が認められた。Dの値はほぼ1.2から1.7の間であった。このことはここで用いたダイズとササゲの根系の形がフラクタルであることを示している。また0.18mmから約20mmのスケール範囲で高い直線性が得られた。Tatsumiら(1989)はイネ科の各種作物とエンドウおよびラッカセイの根系のフラクタル次元がほぼ1.5前後であり、0.2から20mmのスケール範囲でべき関係が認められることを報告しており、この結果とはほぼ一致する。

根系は土壌中では本来3次元空間を生長する。ここでは根箱を用いて強制的に2次元に展開した根系について調べ、フラクタル次元を求めた。3次元空間中での根系のフラクタル次元はどうなっているのだろうか。d次元空間中のD次元フラクタルのm次元のスライス(断面)は、通常 $D - (d - m)$ 次元のものとなる(Vicsek, 1989)。いま、求めた根系のフラクタル次元が3次元空間の2次元断面でえられたものと仮定すると、根系の3次元空間でのフラクタル次元は、 $D + (3 - 2)$ すなわち $D + 1$ で得られるから、ここで調べた根系の3次元土壌空間中でのフラクタル次元はほぼ2.2から2.7程度と推定される。

田中ら(1990)は20日から70日齢のダイズの根系の土壌中での3次元構造を調べ、1cmから8cmのスケール範囲で土壌中の根系がフラクタルであることを示した。得られたDは土壌深度によって異なり、2.02から2.28の範囲であった。

2) 生長にともなう根系のフラクタル次元(D)の変化

第7, 8, 9図にDと根系全体の総根長(L)の生育に伴う推移を示した。根系の発達にともない、D, Lともに増加した。しかし第7図に示されるように、根系の発達が進むにつれてD値の増加が頭打ちとなった。これはダイズの根系発達にかかわる本質的な特長であるのか、それとも根箱のサイズが限られているために根系の構造が変化したためなのかは明らかでない。第10, 11, 12図に生育にともなう根系像の代表的なサンプルを示した。播種後40日目

のサンプルでは根箱の底辺部において、根の広がり制限されて根系が密に分布した結果、画像上の個々の根の識別度が明らかに低下している。このような根箱のサイズによる影響が、根系の発育にともなって増大すると考えられる。Fitter は根系の発達につれてDが単調に増加せずに、根系の発達初期に一時的に減少することを見だし(未発表)、この現象は主根の分枝よりも伸長生長が卓越する発育ステージであるためと説明している。

第13図に実験1のサイズについて、各発育ステージを込にしてDとLとの関係を示した。上記のような点にかかわらず、両者に高い正の相関が認められた。第2実験のサイズの根系についても同様にDとLとの間に高い相関が認められた(第14図)。

これらのことはDが、根系の生長を定量的に表す1つの指標となりうることを示唆している。第15図に実験2におけるササゲの場合を示した。この場合もDとLとの間に高い正の相関が認められた。ただグラフの左下の、根長が非常に短くD値が1に近いプロットは回帰直線からはずれている。この根系像を第16図に示す。これは播種後11日目の根系のした半分のものであって、非常に単純な形をしている。DとLとの関係は、発育ステージを通じておおまかに見た場合高い相関を示すが、その関係はFitterが指摘したように、根系の発育にともなってすこしずつ常に変化していると考えられる。このような変化は根系構造の骨格の変化の重要な部分を反映している可能性があり、この点についてさらに詳細な検討の必要がある。

2) フラクタル次元(D)と根端数との関係

根系全体の根端数は根系全体の分枝数に1を加えたものである。したがって根端数は分枝数を反映している。第17図に実験2におけるサイズの根端数(A)と根長との関係を示した。両者に高い正の相関が認められた。つぎに根端数とDとの関係を第18図に示した。ここでも高い正の相関が見られたが、A-L関係よりは相関係数が低い。つまり分枝数はD値よりもLで示される根長とより密接に関連している。このことからDは根系の分枝密度だけを単純に反映しているだけでなく、根長密度やその他のパラメータたとえば根径と関連する根の分布密度などとも関連していると推定される。このようにD値は根系の空間的な分布を総合的に示す指標として有効であると考えられる。

根端の数だけでなくその分布も重要な情報を含むと考えられる。第19図に

実験2のサイズの根端の箱内における分布を示した。この分布がどのような特長を持つのかは今後の課題である。

引用文献

1. Lebowitz, R. J. 1988. Digital image analysis measurement of root length and diameter. *Environ. Exp. Bot.* 28: 267-273.
2. 洪沢 栄・荒木 肇 1990. トウモロコシ根系の形状およびヤマモの形状と品質—ファイトテクノロジー的アプローチ—*農業機械学会誌* 52: 89—93.
3. 高安秀樹 1986. フラクタル 朝倉書店, 東京.
4. 田中典幸・有馬 進・原田二郎・三原 実 1990. サ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.
5. Tatsumi, J., A. Yamauchi and Y. Kono 1989. Fractal analysis of plant root systems. *Ann. Bot.* 64: 499-503.
6. Vicsek, T. 1989. *Fractal growth phenomena*. World Scientific Publish. London. (宮島佐介訳, フラクタル成長現象, 朝倉書店, 東京, 1990)

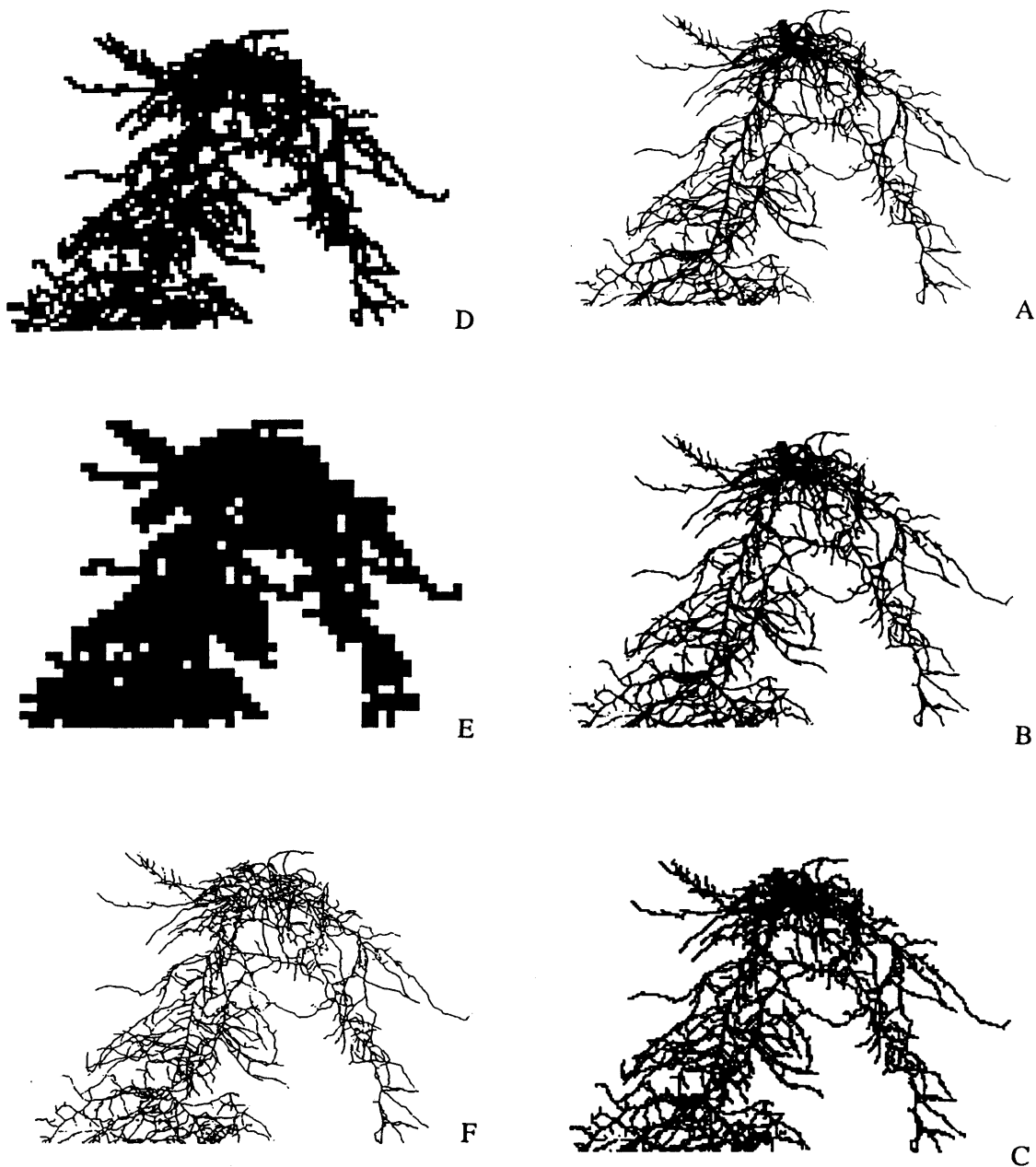


Fig. 5 Digitized images of soybean root system (Exp. 2, 24 days old).
A, binary images of original scale (0.3509 mm/pixel); B, scale=
0.7018 mm/pixel; C, scale=1.4036 mm/pixel; D, scale=2.8072
mm/pixel; E, scale=5.6144 mm/pixel;
F, the same root image shown in A after thinning.

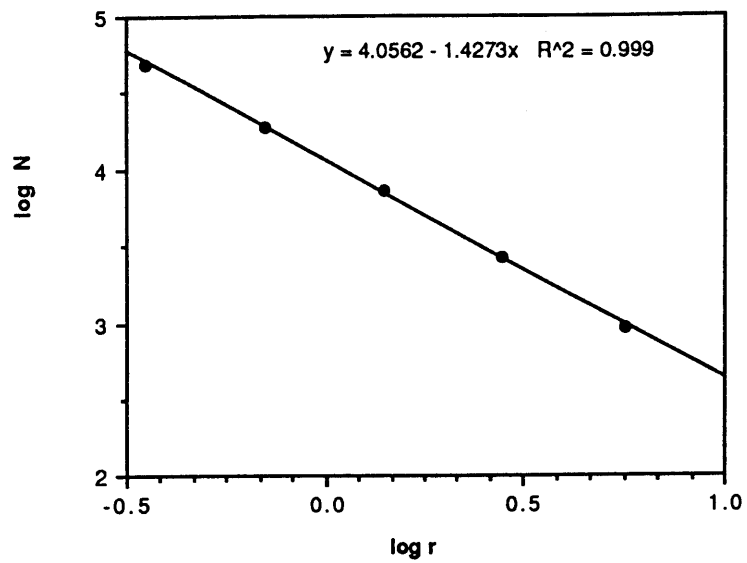


Fig. 6 Relationship between scaling factor of pixel and number of the pixel counted for root images in log scale.

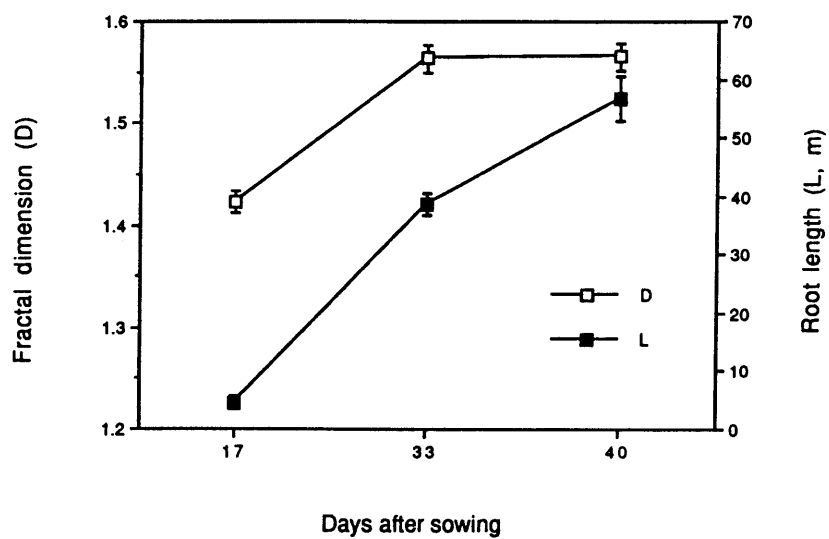


Fig. 7 Changes in fractal dimension (D) and root length (L) of the root system of soybean after sowing (Exp. 1).

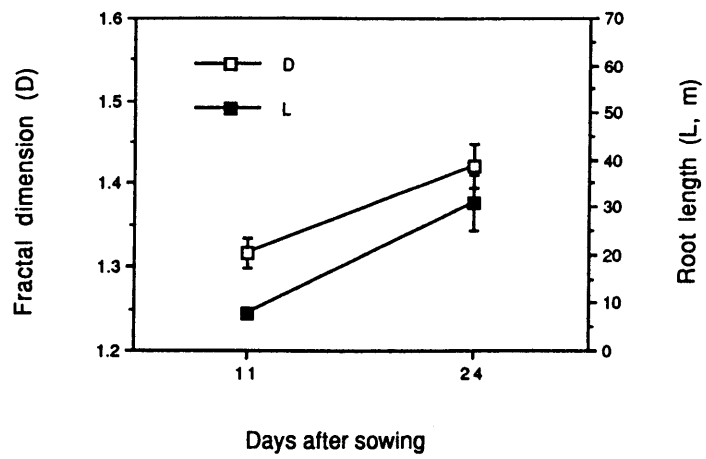


Fig. 8 Fractal dimension (D) and root length (L) of the root system of soybean after sowing (Exp. 2).

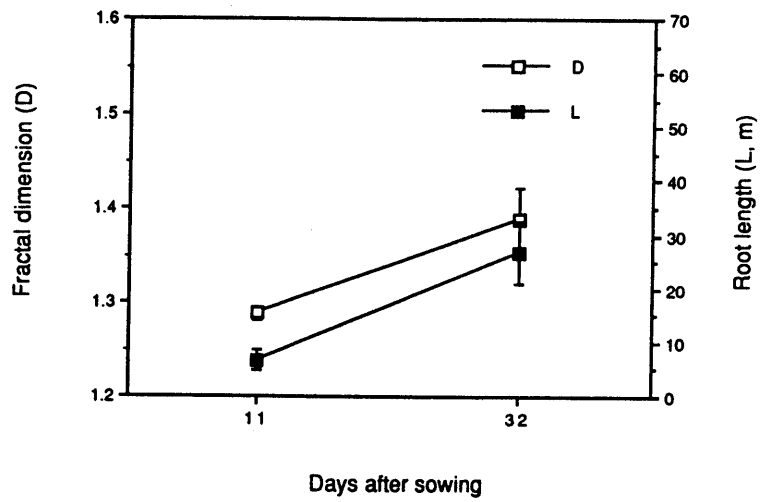


Fig. 9 Fractal dimension (D) and root length (L) of the root system of cowpea after sowing (Exp. 2).

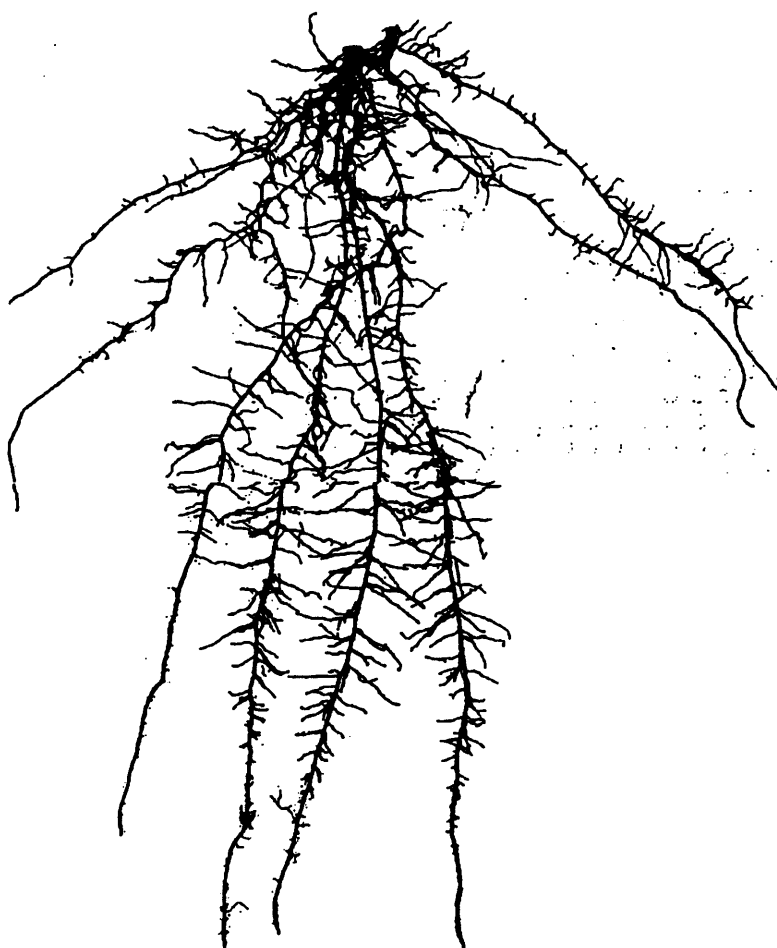


Fig. 10 Images of the root system of soybean digitized in the frame memory;
16 days old (Exp. 1), $D=1.431$, $L=5.49m$.

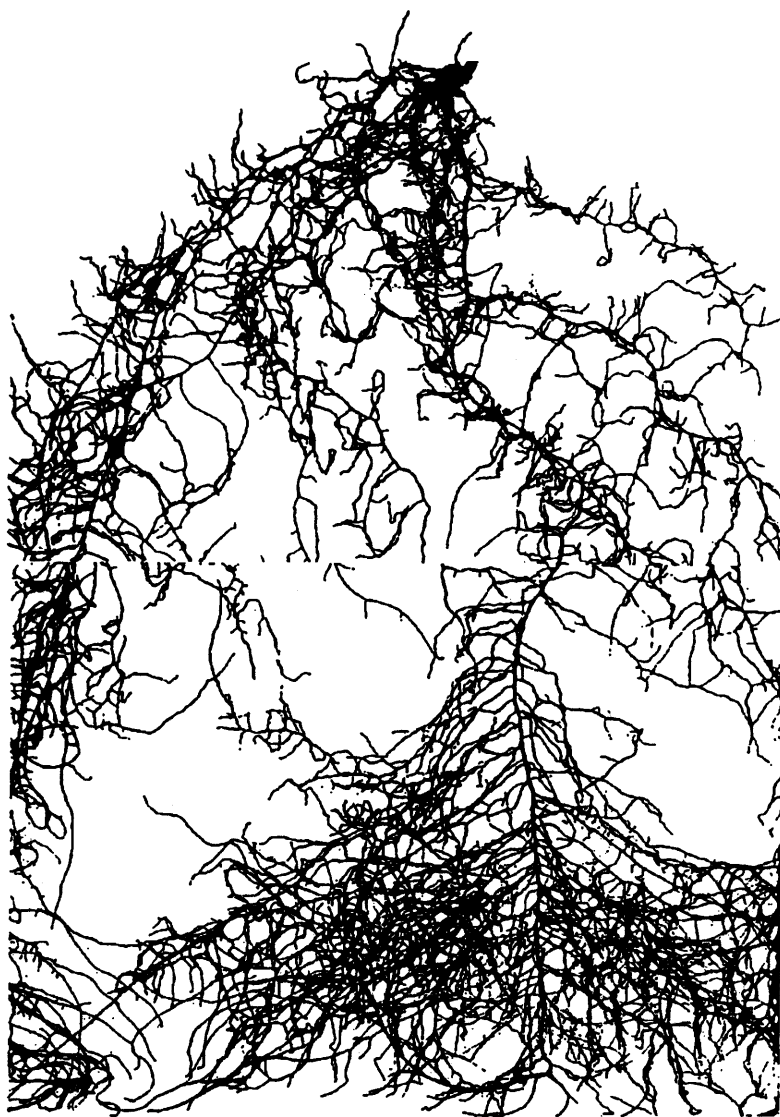


Fig. 11 Images of the root system of soybean digitized in the frame memory; 33 days old (Exp. 1), $D=1.538$, $L=37.26m$.

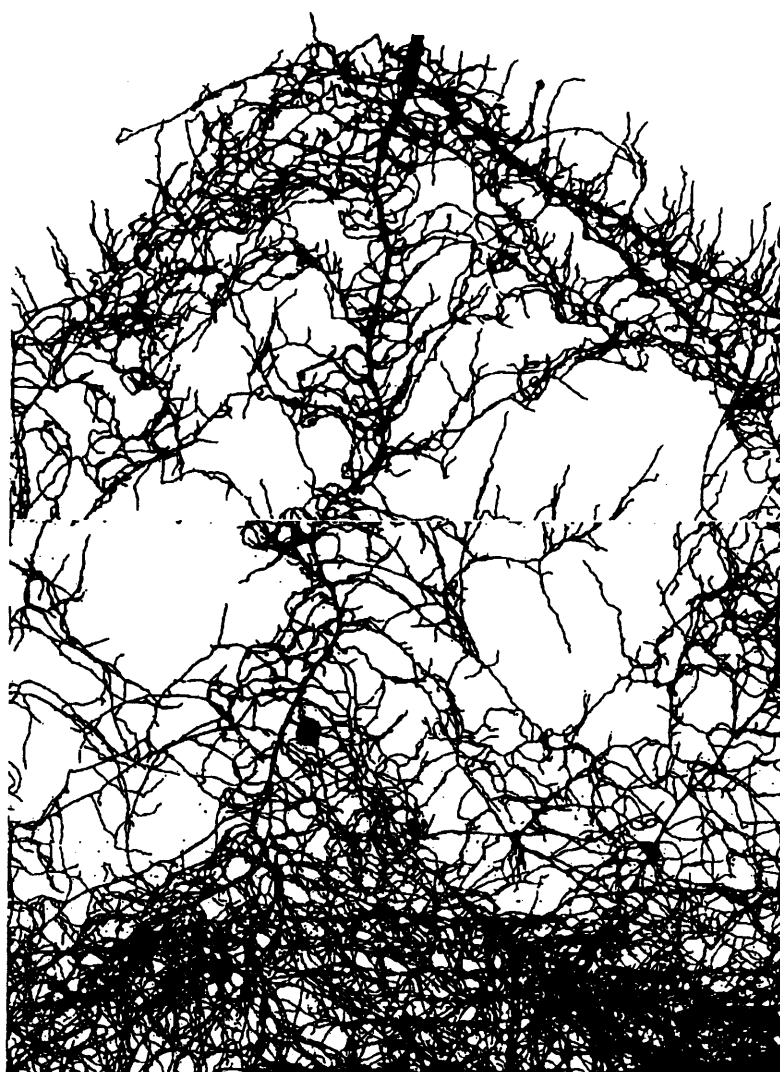


Fig. 12 Images of the root system of soybean digitized in the frame memory; 40 days old (Exp. 1), $D=1.590$, $L=62.80m$.

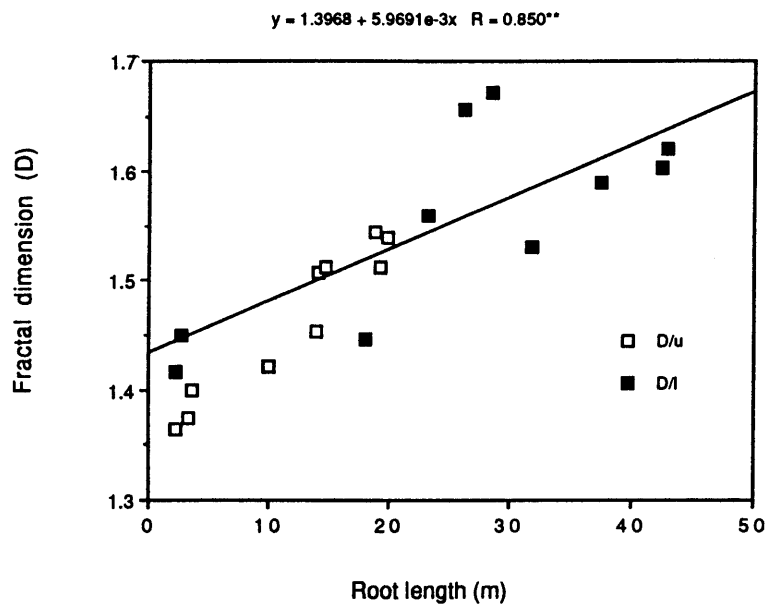


Fig. 13 Relationship between root length and fractal dimension (D) of the root system of soybean (Exp. 1); D/u and D/l indicate the upper and lower half of the root system.

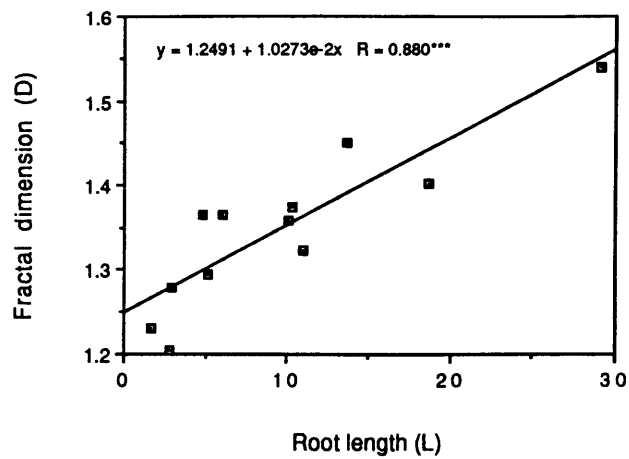


Fig. 14 Relationship between root length (L) and fractal dimension (D) of the root system of soybean (Exp. 2)

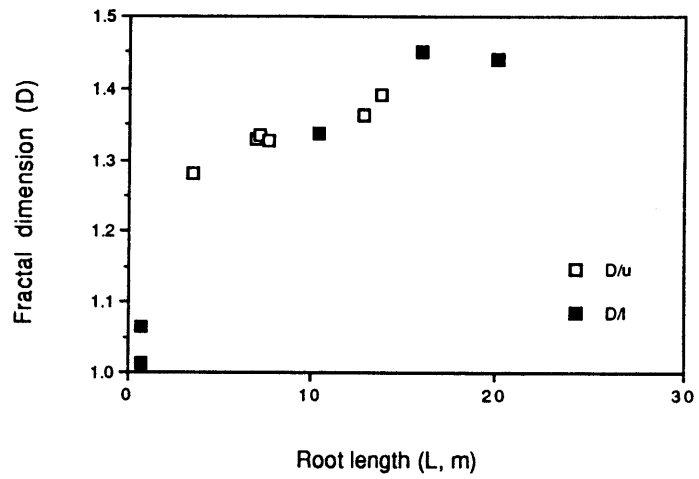


Fig. 15 Relationship between root length (L) and fractal dimension (D) of the root system of cowpea (Exp. 2); D/u and D/l indicate the upper and lower half of the root system.



Fig. 16 Images of the root system of cpwpea digitized in the frame memory; 11 days old (Exp. 2); upper image, $D=1.328$, $L=7.65m$, lower image, $D=1.023$, $L=0.73m$.

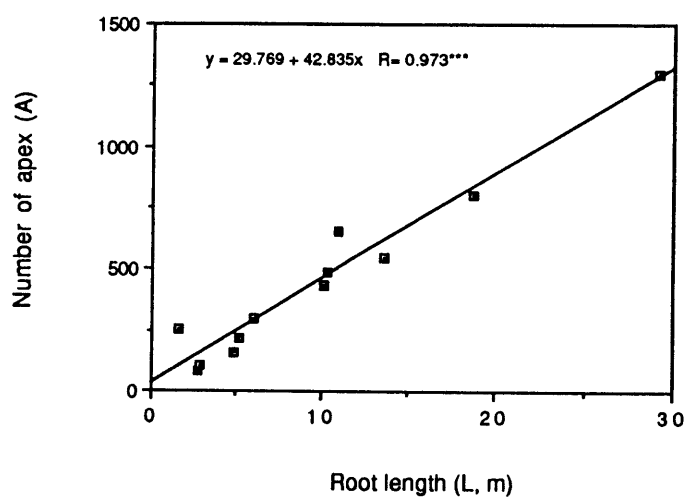


Fig. 17 Relationship between root length (L) and number of root apex (A) of the root system of soybean (Exp. 2).

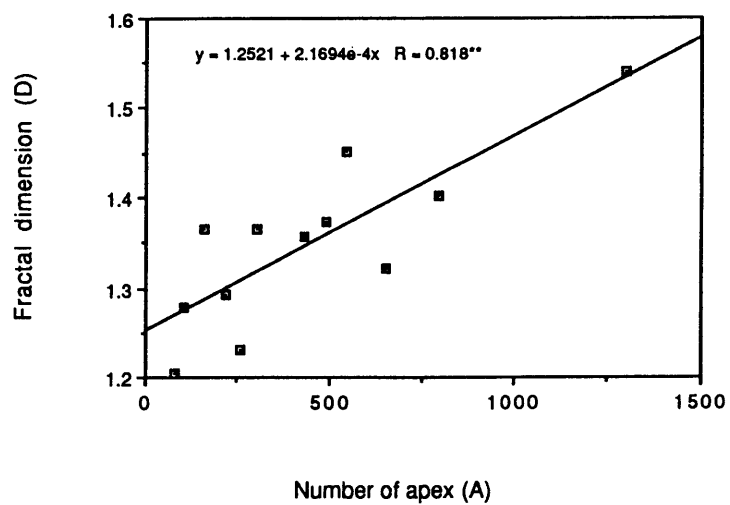


Fig. 18 Relationship between number of root apex (A) and fractal dimension (D) of the root system of soybean (Exp. 2).



Fig. 19 Distribution of root apex of soybean root system in the root box (Exp. 2, 24 days old); number of apex = 979.