

根系構造のフラクタル解析に関する研究

田中 典幸・清水 康弘*・有馬 進・原田 二郎
(生産生物学講座)

平成5年12月10日受理

Fractal analysis on the structure of plant root system

Noriyuki TANAKA, Yasuhiro SHIMIZU, Susumu ARIMA
and Jiro HARADA

(Laboratory of Crop Science)

Received December 10, 1993

Summary

Two kinds of fractal analyses, plane and cubic, on the structure of root systems were conducted using several plant species, soybean (*Glycine max* Merr.), kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.), alfalfa (*Medicago sativa* L.), adzuki bean (*Phaseolus angularis* L.), peanut (*Arachis hypogaea* L.), cowpea (*Vigna sinensis* Endl.), and maize (*Zea mays* L.), in order to determine the factors that affect the fractal dimension (D).

For the cubic analysis, plants were grown in 40 cm long, 90 cm deep and 40 cm wide boxes filled with loam soil. The detection of root existence in each soil cube was made by eye-inspection. For the plane analysis, plants were grown in root boxes made from a half of Wagner pot having a transparent plastic plate on one side. The photo-image of roots which could be observed through the plastic plate were taken at several growth stages and used for analysis. The detection of root was made in cubic units of side 1, 2, 4 and 8 cm in cubic analysis and in square units of side 1, 2, 3, 4 and 5 cm in plane analysis. The fractal dimension (D) was determined as a regression coefficient between logarithms of the side length of cubes or squares and their numbers in which root existed.

As a result of cubic analysis, it was clarified that the highest fractal dimension indicating high root branching was marked right below the soil surface, but it decreased with depth (Fig. 2). On the other hand, the fractal dimension in the vertical soil profile was low near the tap root, increased as the distance from the tap root increases, and decreased in further distant profile as shown in Fig. 3. In the case of plane analysis, the fractal dimension increased gradually and reached to the plateau according to the growth stages, and the overall tendency was similar among species (Fig. 4). Moreover, a close relationship was recognized between the fractal dimension and the shoot growth (Table 2). Results suggested that the fractal dimension could be a useful parameter for determination of the structure of root systems.

Key words: fractal analysis, fractal dimension, growth stage, root system, soil depth

根系の全体的構造を明らかにするためには多大な労力と時間を必要とする。しかし、根系構造について自己相似性が認められる場合は、その一部を調査することによって根系構造の全体を極めて効率的に推定することが可能となる。その場合には、自己相似性が高いほど正確に全体を推定できることとなる。

根は一定の規則性をもって出現・生育し、複雑な根系を形成する^{3,4)}。したがって、根系の形成過程からみて、その部分と全体は共通した発育様式を示すと考えられ、根系の全体と部分あるいは部分間の形態には相似性があると考えてよい。本研究ではこのような根系の相似的な構造をフラクタルの概念により解析することを試みた。その場合、根系の立体的な分布と平面的な分布についてそれぞれ別個に解析することにした。フラクタル理論に基づいた根系の解析は、Bahman¹⁾や巽ら²⁾の研究があるが、平面的な分布について解析されているにすぎない。

材料と方法

材料には、ダイズ、インゲンマメ、アルファルファ、アズキ、ラッカセイ、ササゲならびにトウモロコシを供試して、1990年に栽培を行った。立体的解析には40×40×90cmの根箱に各作物1個体を栽培し、播種後30日に生育中期のダイズについて、また、播種後60日目から各供試作物について調査を始めた。その際、地表からの深さ別の土壤小立方体について根の有無を肉眼で識別して記録した。平面的解析には、ワグネルポットを縦に切断し切断面に透明アクリル板を接着した根箱で各作物を栽培し、アクリル板内面に観察される根の生育を実態観察と写真により、出芽から9週間目まで1週間毎に調査した。

立体的な解析の場合には、第1図(a)のように根系の存在する土壤を立方体の辺長を1, 2, 4, 8 cmの小立方体に分割し、根の存在が認められる立方体の数を測定した。また、平面的解析の場合には、第1図(b)のように2次元的に広がった根系に辺長を1, 2, 3, 4, 5 cmの正方形の升目をかけ、根の存在した升目の数を測定した。

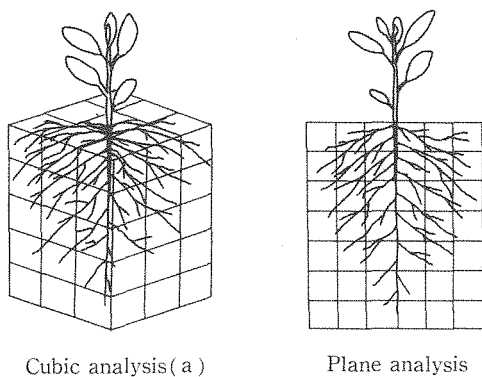


Fig. 1. Measurement of fractal dimension.

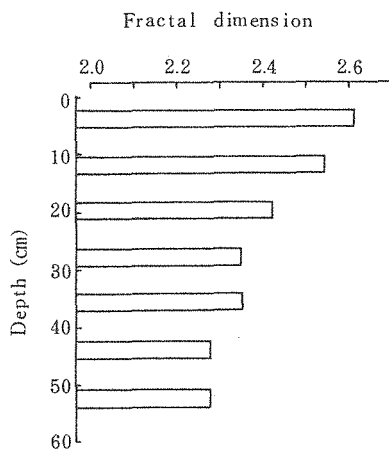


Fig. 2. Change of fractal dimension of soybean root system with soil depth in cubic analysis.

自己相似性の程度を数学的に示すフラクタル次元の算出法には、粗視化の度合いを変える方法⁹⁾を用いた。すなわち、立方体あるいは正方形の辺長を“ r ”，それぞれ根が含まれていた立方体あるいは正方形の数を $N(r)$ とするとき、

$$N(r) = A \cdot r^{-D} \dots\dots\dots(1)$$

(1)式のような関係が得られた場合、もとの図形はフラクタルであり、 D をフラクタル次元という。この式の両辺の対数をとると、

$$\text{Log } N(r) = -D \text{Log } r + \text{Log } A \dots\dots\dots(2)$$

A ：定数

(2)式となり、直線回帰関係が成立することとなる。本研究では、フラクタル次元 D を、この回帰直線の回帰係数の絶対値として推定した。フラクタル次元が非整数値をとった場合でも、フラクタル次元が平面的解析であれば2、立体的解析であれば3に近いほど、その根系はより複雑な構造をもっていることを示す。本研究において、立体的解析では根系の自己相似性の程度を土層別および作物間で比較した。また、平面的解析では生育に伴う経時的変化について検討した。

結果と考察

1. 立体的解析

生育中期のダイズ根系の地表からの深さによるフラクタル次元の変化を観察した(第2図)。フラクタル次元は、地表から深くなるほど2.61→2.35→2.28と減少することが明らかとなった。次に、ダイズの株元からの水平距離の遠近によってフラクタル次元がどのように変化するかをみると、土壌の鉛直断面におけるフラクタル次元は断面が株元から離れるにつれて高くなり、13cmから16cm付近で最高値に達し、それ以上離れた部位では再び低下した(第3図)。

第1表には、収穫期に立体解析を行った場合、作物別の根系のフラクタル次元を深さ別に示した。アルファルファを除いてインゲンマメ、トウモロコシおよびダイズでは、地表からの深さによるフラクタル次元の変化が明確には見られなかった。アルファルファではフラクタル次元が他作物に比べて低く、特に地表から20cm～40cmの深さで低

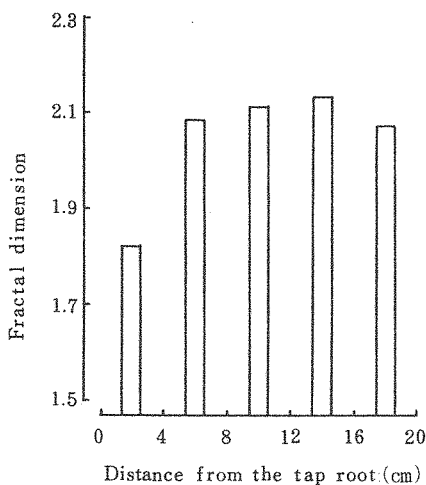


Fig. 3. Change of fractal dimension of soybean root system according to the distance from the tap root.

Table 1. Comparison of fractal dimension of root system among plants by cubic analysis made at harvest stage.

Soil depth(cm)	Kidney bean	Alfalfa	Maize	Soybean
0-20	2.86	2.34	2.98	2.92
20-40	2.88	1.85	2.98	2.87
40-60	2.86	2.21	2.99	2.84

かった。

2. 平面的解析

根系の平面的解析を行って生育時期別のフラクタル次元の推移を作物間で比較した(第4図)。全ての供試作物に共通して、フラクタル次元は生育に伴って次第に高くなる傾向を示したが、それぞれ、生育盛期を過ぎると一定の値となって、それ以上増加しなかった。フラクタル次元の値が最大になる時期はラッカセイで最も早く、アズキおよびトウモロコシ、インゲンマメおよびササゲ、ダイズと続き、アルファルファが最も遅くなった。

また、最も高いフラクタル次元を示したのは、アズキとトウモロコシで、特に、アズキは8週目に1.91に達して供試作物中で最高のフラクタル次元を示した。ラッカセイは、最初の1週間目のフラクタル次元が高かったものの、最終的なフラクタル次元は最も低くなった。また、アルファルファのフラクタル次元は他の作物より遅く増加を始め、最大値もかなり低い値となった。

第2表には、各作物について生育に伴う根系のフラクタル次元の推移と草高ならびに葉数の増加との関係を両者の相関係数で示した。根系のフラクタル次元はアルファルファの草高との場合を除き、全ての作物において地上部の諸形質と有意な相関を維持しながら高くなることが分かった。なかでも、トウモロコシは他のマメ科作物に比べてフラクタル次元とShootの生育との相関が高くなる傾向を示した。

以上の結果から、1) 供試したすべての作物根系においてフラクタル次元は非整数値を示し、自己相似的な構造が認められる。2) フラクタル次元は地表面からの土壌の深さと株元からの水平距離によって変化する。3) フラクタル次元は地上部の生育と関係して変化するが、その変化は比較的生育の初期において著しいことが明らかとなった。以上の点を考慮すると、フラクタル理論は作物根系の構造を解析する一つの手段として有効であると考えられた。

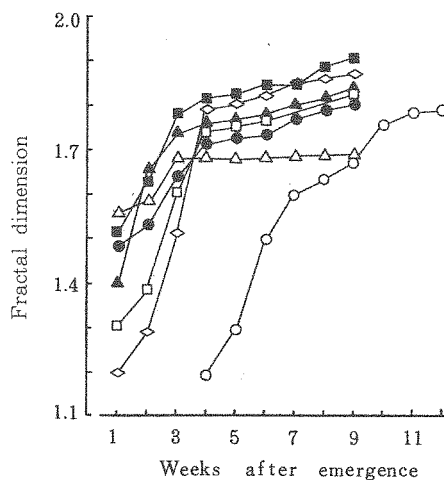


Fig. 4. Changes of fractal dimension of root system with growth in plane analysis.
○, Alfalfa; ●, Soybean; ◇, Maize; □, Cowpea; ■, Azuki bean; △, Peanut; ▲, Kidney bean.

Table 2. Coefficient of correlation between fractal dimension and growth of above ground part.

	Plant height	Number of leaves
Maize	0.97 **	0.98 **
Cowpea	0.86 **	0.89 **
Alfalfa	0.51	0.70 *
Kidney bean	0.92 **	0.79 **
Soybean	0.93 **	0.82 **
Azuki bean	0.75 *	0.78 *
Peanut	0.88 **	0.76 *

*, ** : Significant at 5 and 1 % level.

摘 要

作物の根系構造をフラクタル概念を用いて平面的および立体的な2種の観点から解析し、フラクタル次元(D)に影響を及ぼす要因を検討した。材料にはダイズ、インゲンマメ、アルファルファ、アズキ、ラッカセイ、カウピー、トウモロコシを供試した。立体的解析では壤土を充填した40×40×90cmの容器に各作物を栽培した。土壌を単位立方体に区分し、各立方体中の根の有無を肉眼で観察した。平面的解析では縦断したワグネルポットに透明のプラスチック板を貼りつけた根箱で各作物を栽培した。生育時期別にプラスチック板の内面に現れた根の写真を撮影し調査に用いた。調査は立体的解析では、辺長を1, 2, 4, 8 cmとした立方体について、平面的解析では、1, 2, 3, 4, 5 cmの正方形について行った。フラクタル次元(D)は立方体あるいは正方形の辺長と根の認められた立方体あるいは正方形の数との両対数間の回帰係数として求めた。

立体的解析の結果、フラクタル次元は土壌の最上層で最も高く、根の旺盛な分枝を示したが、深くなるにつれて減少した(第2図)。根系の縦断面で見たフラクタル次元は主根付近で低く、主根から離れるにしたがって増加し、さらに離れると低くなった(第3図)。一方、平面的解析の結果、フラクタル次元は生育時期が進んで徐々に上昇し、やがて一定となったが、この変化は全ての供試作物で共通して認められた(第4図)。また、フラクタル次元と地上部の生育との間に密接な関係が認められた。以上の結果から、フラクタル次元は、根系の構造を示す有効な指標となり得るものと考えられた。

引用文献

1. Bahman Eghball, J. R. Settimi, J. W. Maranville and A. M. Parkhurst 1993. Fractal analysis for morphological description of corn roots under nitrogen stress. *Agron. J.* 85: 287-289.
2. Tatsumi, J., A. Yamauchi, and Y. Kono. 1989. Fractal analysis of plant root systems. *Ann. Bot.* 64: 499-503.
3. 田中典幸・窪田文武・有馬 進・田口光浩 1990. ダイズにおける根系の量的解析. *日作紀* 59: 270-276.
4. 田中典幸 1977. マメ科作物の根群形成に関する研究. *佐賀大学農学部彙報*43: 1-82.
5. 依田恭二 1971. *森林の生態学*. 築地書館, 東京.