

根の成長を形で捉えると？

- フラクタルによる根系生態の定量化の試み -

錦 織 正 智

根は、養水分の吸収、体の支持、そして植物ホルモンの生産や土壌環境の知覚器官として、成長を担う重量な役割を果たしています。これら根の機能は、根の形と関わりが深く、形が変われば機能も変わると考えられています。また、根の形態形成には、土壌環境が大きく影響することも知られています。

これまでにおこなわれてきた多くの研究は、根の重さを中心に、長さ、面積、体積などを測定することで進められてきました。しかし、これらの測定形質は、主に成長量を反映した、指標であり、直接的に形態を評価しているものではありません。

このことから、“土壌環境 - 根系形態 - 根系の機能”の一連の関係を解き明かすには、根系の形を客観的に評価する方法を考える必要があります。

しかし、根系には沢山の分岐があり、多様な太さや長さの要素で構成されていることから、非常に複雑な形をしています。客観的に評価をおこなうことは、容易ではありません。それでは、根系の形を評価するには、どのような手法を使えば良いのでしょうか。

近年、“複雑なもの”を定量的に表す手法の一つとして、“フラクタル”の利用が珍しいことではなくなりました。ここでは、根の形をフラクタルで捉えてみようと思います。

根の形の複雑さをフラクタルで表す

フラクタル (Fractal) とは、フランスの数学者 Mandelbrot が生み出した自然を記述する幾何学であり、“不規則な断片”を表すラテン語“フラクトゥス (Fractus)”に由来して名付けられました。

“山脈、海岸線、稲妻”，自然界に存在する形や構造、現象は、様々なサイズの要素から構成されており、複雑なランダムパターンで構成されています。しかし、よく見ると、山脈は、山頂の集まりで、その山頂は、小さな頂の集まりです。海岸線や稲妻も同様です。このように、ある一部分が全体の概観と同じような厚生であることを“自己相似性”と呼び、自己相似性を備えていることがフラクタルな形の特徴です。

ここで、コンピュータに取り込んだ根系のイメージ画像 (図 - 1) を見てみましょう。一部を取り出し、拡大してみると、もとの根系の全体とよく似た形に見えます。つまり、根系の形態は自己相似性であることから、フラクタルな形ということが分かります。

複雑な形も、フラクタルの視点から捉えれば、構成要素のランダムパターンに規則性を見つけ

出し、“複雑さの程度”を“フラクタル次元”として定量化することが出来ます。例えば、点は0次元、線は1次元、平面は2次元ですが、根系は何次元と表せばよいのでしょうか？1次元よりは複雑ですが、2次元と呼ぶには単純な形です。このような形を、1~2次元間の非整数の次元として表すのがフラクタル次元です。

それでは、根系を例にフラクタル次元を求めてみましょう。ここでは測定方法の中で最も多用されて

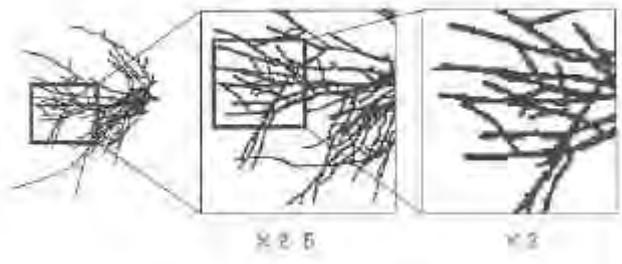


図 - 1 根系における自己相似性の成立

いる BOX - Counting 法について話を進めます。

まず、根系（図 - 2）を間隔 r の格子によって一辺が r の正方形に分割します（これを粗視化と言います）そして、根系の一部が乗っている格子の個数を数え上げ、それを $N(r)$ とします。この作業を、間隔 r の大きさを様々に変えて繰り返すことで、

$$\log N(r) = -D \log r + \log k$$

データ示される右下がりの回帰直線を得ることができます。 k は定数なので、この式を書き直すと、

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

となり、乗数の絶対値 D がフラクタル次元（ D ）になります。

D 値は値が大きい程、形が複雑であることを示します。値の解釈には、Mandelbrot が指摘しているように“ D の数値は、特定の形をしているのではない”という点には、注意が必要です。つまり、同じ値を示していても、形のパターンは無限に存在します。

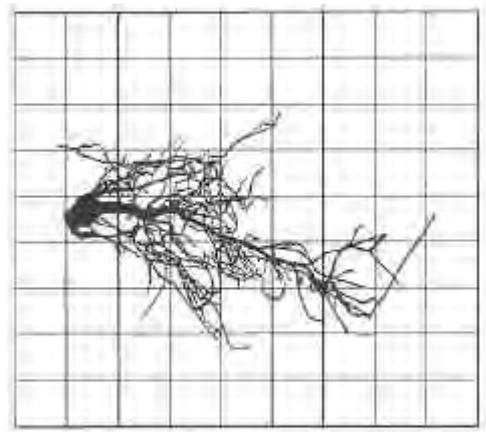


図 - 2 根系形態の正方形による粗視化

フラクタル次元から見た根系の発達様式

根系の形態形成には、土壤環境が関与していることを冒頭で述べましたが、この関係を、次の実験結果を例にフラクタル次元を使って眺めてみましょう。

苗長 2cm 程度のナナカマドを、異なる 4 種類の用土（鹿沼土、パーミキュライト、ピートモス、寒天培地）へ植え付けて、30 日間養成したところ、図 - 3 に示す根系になりました。これらについて、先に述べた方法を使ってフラクタル次元を算出し、併せて成長量も測定しました（表 - 1）。

試験結果から、フラクタル次元を大きい順に並べると、パーミキュライト > ピートモス > 鹿沼土 > 寒天培地となりました。また総根長と表面積ではピートモス > 鹿沼土 > パーミキュライト > 寒天培地、体積ではピートモス > パーミキュライト > 鹿沼土 > 寒天培地、そして、根端数と乾物量では鹿沼土 > パーミキュライト > ピートモス > 寒天培地の順になりました。

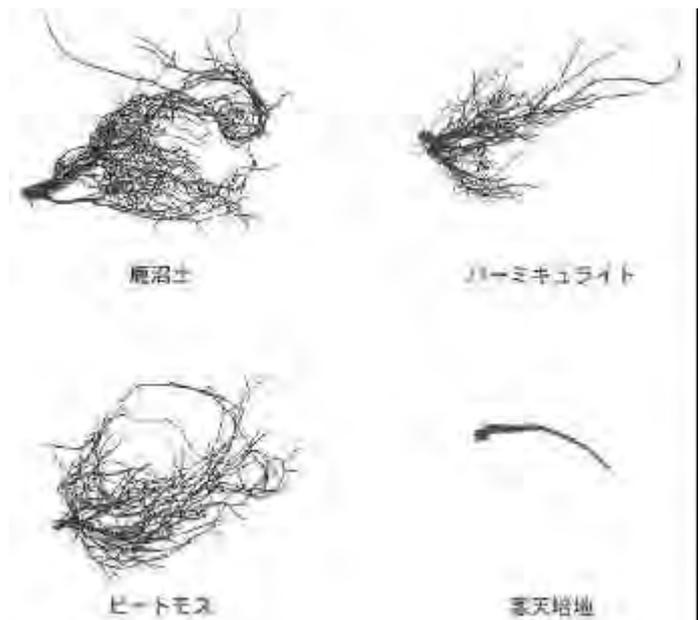


図 - 3 異なる用土で培養した根系の形態

根系の発達様式を、フラクタル次元と成長量の相関関係（表 - 2）で整理してみると、次のように分類することができます。

まず、鹿沼土では、フラクタル次元として全ての測定形質の間に高い正の相関関係がありました。この結果から、根系の発達様式は、成長量の増加と複雑な形作りの進行は平行していることが理解できます。またパーミキュライトでも、概して相関係数が高いことから、鹿沼土と同様の発達様式があること

が推察できます。

ピートモスでは、特に体積との間に高い正の相関関係があることから、成長量の中でも根量の増加が、根系の複雑な形作りを進めることに何らかの関係を持つ発達様式である、と考えることができます。

寒天培地では、相関係数は低いものの、乾物量を除く4成長量との間に、負の相関関係を認めることができます。このことは、成長量が増加することで根に分岐（側根）が生じても、単位面積当たりの分岐数が少ないために、根系の形は複雑になっていない、と解釈できます。

このように、フラクタル次元と根長などの成長量の関係を理解すると、土壤環境で異なる根系の発達様式を分類できることが分かりました。

表-1 異なる用土で養成した根系のフラクタル次元と成長量

測定形質	鹿沼土	パーミキュライト	ピートモス	寒天培地
フラクタル次元(D)	1.34	1.39	1.36	1.23
総根長 (cm)	130.1	110.8	138.5	4.6
表面積 (cm ²)	39.1	37.8	43.6	2.5
体積 (cm ³)	1.5	1.7	2.6	0.1
根端数 (本)	41.2	40.8	38.8	2.0
乾物量 (mg)	9	8	6	1

n = 5

表-2 フラクタル次元と成長量間の相関係数

測定形質	鹿沼土	パーミキュライト	ピートモス	寒天培地
総根長	0.99***	0.94**	0.73	-0.69
表面積	0.95**	0.99***	0.77	-0.45
体積	0.95**	1.00***	0.86	-0.25
根端数	0.99***	0.88*	0.76	-0.43
乾物量	0.96**	0.80	0.83	0.45

* , ** , *** ; それぞれ 5% , 1% , 0.1% 水準で統計的に有意。

おわりに

フラクタルによる根系形態の数量化の概要について述べてきました。フラクタル次元は根の“質”の指標であり、従来より多用されてきた重さ、長さ、体積などが“量”の指標である点で異なります。根系形態の数量化は、根系の形態形成と土壤環境の関係や、根系の形と機能の関係を科学的に考察するための必須の技術です。

もっと根の成長を観察し、まだまだ表層しか分かっていない土壤と根の関係についての解明を進め、新たな知見を栽培技術の開発へ応用することが今後の課題です。

(生産技術科)