根系の形態を「見る」

森田茂紀*・関谷信人・阿部 淳

東京大学大学院農学生命科学研究科

要 旨：フィールドで根系の研究を進める場合、土壤中における根系の形態や分布を把握することが前提となる。これまで、根系調査法として様々なものが提案・利用されてきたが、十分に標準化が進んでいない。そこで、著者らはフィールドにおける根系調査法の標準化を進めるため、改良土壌断面法を提案する。この方法では調査する植物体の近くに塹壕を掘り、土壌断面を整形した後、適当な間隔で土壌採取用の金属製円筒を打ち込み、根を含む土壌を採取する。丁寧に根を洗い出して、長さを測定して根長密度を求める。このようにして得られたデータから、根長密度の等値線を描いたり、根の深さ指数を算出すれば、根系形態の概要を把握できる。特殊な機械や器具を必要とせず、作業方法や指標の測定・算出を標準化しやすい。ただし、多くの時間と労力が必要で、対象植物に対して、どの位置に、どの方向で土壌断面を作製するかを考えないと、異なる調査の結果を比較対照することが難しい。また、単位面積当たりの根量の推定や、形成過程の解析には向いていない。必要に応じてコアサンプリング法と組み合わせることも現実的である。

キーワード：改良土壌断面法、根系形態、根長密度、根の深さ指数、コアサンプリング法。

Grasping root system morphology: Shigenori MORITA*, Nobuhito SEKIYA, and Jun ABE (Graduate School of Agricultural and Life Sciences, the University of Tokyo)

Abstract : Root research often starts from observation of root structure and morphology in soils under field conditions. Although many methods for root observations are available, most of them are yet to be standardized. Here, we recommend an improved soil profile method as the standard of root research in fields. The method requires only simple and inexpensive tools and follows simple procedures though it is a bit time-consuming. After digging a trench and clearing its soil profile, metallic cylinders are inserted into the profile at some intervals. Soils are then sampled from the profile by removing the cylinders, and roots are carefully washed out to measure their lengths/weights. By analyzing those values, we can obtain some important parameters such as root length/weight density and root depth index. For comparison of those parameters among different studies, sampling procedures need to be standardized especially how to determine the position and the direction of trench in a field because root distribution may vary with planting density. For the same reason, attention has to be paid when estimating total root length/weight per unit area by using root length/weight density. The method has a limitation in time-course analysis of root system development. Core sampling method should be combined, if necessary.

Keywords : improved soil profile method, root system morphology, root length density, root depth index, core sampling method.

はじめに

2012年6月下旬にスコットランドのダンディーで、国際根研究学会 (International Society of Root Research : ISRR, 森田・阿部, 2010) の第8回シンポジウムが開催された。このシンポジウムでは、根系形態や1本の根の組織構造に関する3次元CGを用いた発表がいくつかあった。2次元の根系像や組織切片像をみて頭の中で3次元構造を再構築することは容易でないため、これらの3次元CGには大きなインパクトがあった。しかし一方で、「だから、何だ」という気もする。3

次元CGは確かにある時点では研究目的となりうるが、最終的にはその先にある研究目的を達成するための手段にすぎないからである。

森田は大学院修士課程の2年間、根の組織切片を作成して顕微鏡で観察していたし (川田ら, 1978)、その後も、阿部と蛍光顕微鏡を利用した機能形態学的研究を進めてきた (森田・阿部, 1999; 森田ら, 2005)。これらの経験から、維管束連絡の立体構造を把握したいと考えている。とくに親根と側根の維管束連絡は非常に複雑であり、異なる方向の組織切片から連絡部分の3次元構造を再構築することは非常に難しいが (川田

ら, 1977), 養水分転流について研究するためには必要である。そのため, 3次元CGで根の中の通気組織の広がりやつながりを視覚的に表現できることが効果的なことは, よく理解できる。

一方, 根系形態はどうであろうか。1本の根の3次元構造は実際の組織切片に基づいて再構築されたものであり, その意味でリアルな像といえる。しかし, 根系形態の3次元CGはシミュレーション結果に基づいて作成されているため, 根系形態の実態を反映していない可能性がある。3次元CGはフィールド調査の結果に基づいて構築されるべきであるが, 現状ではそもそも根系形態の実態を把握するための有効な手段がないといってもよい。そこで, 根系形態の概要を把握し, 機能について研究するための有効な手段として, 本稿で「改良土壌断面法」を提案したい。本稿は根系調査法に関する総説ではなく, 根系形態を把握することへのアプローチを考えたものである。

根系分布の記載

根に関する研究は大きく, モデル器官としての根の形態や機能に関する研究と, 根系全体を取り扱うフィールドワークとに分類することができる(森田・阿部, 1999; 森田, 2000)。後者の研究では, 土壌中にどれくらいの根がどこに分布しているかを知ることが研究の前提であり, 研究成果がそこにフィードバックされなければならない。そのため, フィールドでの根系研究では, 「根を掘って, 見る」ことが出発点となる。

根系のフィールド研究としては, Weaverの仕事が代表例である(Weaver et al., 1922; Weaver, 1926)。彼は, 当時アメリカで栽培されていた食用作物や飼料作物の根系をフィールドで掘り, 詳細な絵を描いている(第1図)。未だに彼の描いた図が引用されることが多い

第1図 塹壕法によるトウモロコシの根系調査の事例 (Weaver, 1926)。

ことは, 彼の仕事のレベルが高く, それ以降は, これを超える仕事あまり行われていないことを示している。

その他, 野菜の根系については加藤(1989)の「野菜の生育と根系の分布・機能」, 草本植物の根系と地下茎を取り扱った清水(1995)の「日本草本植物根系図説」, 沙漠植物については陳(1986)の「内蒙古草原植物根系類型」がある。

Weaverの仕事ヨーロッパで引き継いだのが, Kutscheraである。彼女は, 自然植生を構成する野生植物を中心に研究を進めた点で異なるが, やはりフィールドで植物の根を掘り, 分布の様相を詳細な図に描いており(Kutschera, 1960), その後, シリーズ化している。

草本植物の根系分布に関する体系的な記載研究としては, 以上のWeaverとKutscheraのものが金字塔といえる。一方, 木本植物に関するものとしては, 日本の苧住の仕事が世界的にも有名である。彼は農林水産省林業試験場(現在の森林総合研究所)時代に多くの樹木の根系を掘って分布の様相に関する膨大な調査研究を行い(苧住, 1957), それを基にして誠文堂新光社から「樹木根系図説」を出版した(苧住, 1963)。その後も精力的に研究を継続し, 最近, 2分冊となった改訂版が出版されている(苧住, 2010)。

記載から定量へ

根系形態に関する記載的な個別研究は, その他にも多くのものがある。日本において水稻(川田ら, 1963; 第2図)やトウモロコシ(山崎・帰山, 1982)の根系研究が始まる時点でも, 記載的な研究が行われている。ただし, いずれの根系調査でも, 根系を植物体に近い土壌断面に投影した像を見ている。そのため, 根系の3次元像が得られれば, 理解の精度が高まることは確かであるが, この場合, 根系分布の様相が把握できれ

第2図 モノリス法による水稻の根系調査の事例 (川田ら, 1963)。

第3図 円筒モノリス法による水稻の根系調査の事例 (Kang et al., 1994).

成熟期における株下 (右側2ヶ) と株間 (左側2ヶ) の深さ別の根長密度 (それぞれ右側; cm cm^{-3}) と根重密度 (それぞれ左側; mg cm^{-3}) の分布を示す。品種の凡例は、図の下のとおり。バーは LSD ($P < 0.05$) を示す。

ば当初の目的は達成できたことになる。その後、種・品種の違いや、自然条件・栽培管理の影響についての調査事例を増やすことは意味があるが、個別の調査結果の比較を行うためには根系の形態をどう読み取るかが問題となる。

私たちは根系の像をみれば分かったような気になるし、この根系とこの根系が似ているとか、違うということが、ある程度は直観的に理解できる。ただし、その感覚を数字に置き換えることは容易でない。ヒトの目にはすぐ分かる草型を定量化しにくいことと同じである。根域 (根系が分布している土壌空間) の大きさだけでも定量的に測定することは難しく、たとえば到達深度 (rooting depth, 調査した根の中で最も深くまで達しているものの深さ) のような最高値は測定範囲内に限定されるものであり、正確な値が得られてもそれだけで根系分布の特徴を表すことにならない。しかし、見た目の主観だけでは、種や品種による根系形態の特徴や、環境条件による根系形態の違いを評価したり、比較することはできない。すなわち、根系のビジュアルな形態像は感覚に訴えるという意味で大きなインパクトがあるが、解析的な研究を進めるには、どうしても次のステップとしてその定量化が必要となる。

根長密度の利用

根系分布を定量化しようという場合、まず思いつくのは、根重や根長を測定することである。測定は根長より根重の方が容易であるし、両者の間には密接な正の相関関係が認められるため (Morita et al., 1988), 根重を測定する場合も多い。しかし、根重では無視でき

るくらいの側根が、根長では非常に大きな割合を占めており、実際の養水分吸収の入口として重要であることが分かっているため (Yamauchi et al., 1987, 1996; Wang et al., 2006), 側根を含む根長を測定することが望ましい。なお、根長と根重との両者を測定すれば、比根長 (根重当たりの根長の割合, specific root length 単位 mm g^{-1}) を算出することができ、直径や分枝程度の相対比較を行うことができる (Kang et al., 1994; Morita et al., 2005)。

ただし、根長や根重を測定する場合、個体単位にするか、面積 (土壌体積) 当たりにならないと意味がないし、異なる根系について比較できない。そこで、根量と分布を合わせて検討するために、根長密度 (単位土壌体積の根長, root length density, 単位 cm cm^{-3} あるいは cm^2) を利用することも多い (間脇ら, 1990)。スポット的な調査でも根長密度は測定できるし、測定して数字にすれば、種・品種や環境条件が違ってても、原理的には比較が可能である。なお、根長密度に対応するものとして、根重密度 (単位土壌体積の根重, root weight density, 単位 g cm^{-3}) も利用できる (Kang et al., 1994)。

根の深さ指数

根系の形態について考えるとき、根量とともに重要なのが分布の様相である。根系の垂直分布を定量化する場合は、縦軸に土壌表面からの深さを、また横軸に根長密度あるいは根重密度を取ったグラフを描くことが多い (第3図; Kang et al., 1994)。これは、根系の垂直分布に関するビジュアルな表現として有効である

が、比較や評価のためにはさらに定量化が必要となる。現時点では根の深さ指数 (Oyanagi et al., 1993) を算出するのがベストであると考えている (阿部・森田, 2003)。これは、調査を行った深さまでにおける根量の50%が含まれている深さを示すもので、単位は cm である (根重密度を利用した根の深さ指数も考えられる; 森田ら, 1995)。根の深さ指数が大きいことは、根系が相対的に深根性であることを、また、小さいことは浅根性であることを示している。したがって、根の深さ指数を算出すれば、その大小を比較するのは非常に簡単である。根の深さ指数を用いて考察する場合の注意点としては、①根を採取する方法、とくに調査する深さを揃えておく必要がある、②深さ別の分布の推移を議論することは難しい、③個体や面積当たりの根量の比較ができない (根の深さ指数が小さい、すなわち浅い根系であっても、根の総量が多ければ根の深さ指数の大きい根系より土壌深層の根量が多いということもある)。IRRI (国際稲研究所) における陸稲・天水田イネの根系の研究では、調査を行った深さまでの全根量に占める 30cm 以深の根量の割合を「deep root ratio」という指標として用いたものがあるが、根の深さ指数の考え方と相通ずるものがある (例えば Kamoshita et al., 2002)。

なお、従来の研究では、根系の垂直分布しか取り扱ってこなかったが、肥培管理などの栽培管理面からは水平方向への根系の広がりに関する情報も有用である。立体的な広がりを取り扱うには定量化に注意が必要であるが、根の深さ指数の考え方は水平方向に応用することができる。

水稻と畑作物

根の深さ指数はすぐれた指標であるが、分布の比較はできても、根量の検討ができないことは既に説明したとおりである。そこで、著者は水稻根系の発育形態学的な研究を進める過程で、根系形態を、①根量 (根長密度から推定した単位土壌容積当たりの根量) と、②分布 (根長密度から算出した根の深さ指数) との組合せで特徴づけることを提案した (第4図; 森田ら, 1995)。この方法を利用することによって、根系形態の品種間差異を明確に提示することができたので、少なくとも灌漑水田で栽培した水稻根系の調査では有効な方法と考えている。

ただし、灌漑水田の水稻の場合には、直径 15cm の円筒を利用して根を含む土壌モノリスを採取しているが (森田・阿部, 2001)、畑では、それより細い直径 5cm 程度の採土器を利用することが多い (例えば Kondo et al., 2003)。コアサンプリング法は比較的短時間で多くのサンプルを採取できるため、定量化が容易

第4図 円筒モノリス法による水稻の根系調査の結果比較 (森田ら, 1995 のデータから作成)。

である。コア中の根長や根重を直接測定するほか、コアサンプルを割って両断面に現われた根数から根量を推定するという方法がある (Boehm, 1979)。これは、空間に線状の構造がランダムな方向に分布しているとき (土壌中で根がランダムな方向に伸長しているときに相当)、ある断面における点密度 $\times 2$ = 体積当たりの長さ密度という原理 (諏訪, 1977) を利用している。実際には、両者の間に有意な正の相関関係が認められる場合もあるが (Schuurman and Goedewaagen, 1971)、根の伸長方向に偏りがあるなどの理由から、精度が必ずしも高くはない (van Noordwijk et al., 2000)。

以上のようにコアサンプリング法は利用しやすいが、①得られたデータからビジュアルな根系像を構築することが容易でない、②土壌が固いとサンプルの採取が容易でない、③あまり深くまではサンプルが取れない、④個体あるいは単位面積当たりの根量を推定する場合、どの位置に、何本くらいのコアを打ち込めばよいかが標準化されていないという問題がある。最後の問題については、株際や株間・条間から根系を採取することが多いが、理論的背景があるわけではなく、標準化に向けて検討が必要である (Levillain et al., 2011)。

改良土壌断面法

根系形態を「見る」方法論を改めて考えるようになったのは、セルロース系バイオエタノール原料作物の栽培研究を進める過程で (Hattori et al., 2010; Ra et al., 2012)、根系調査の必要が生じたからである。原料作物の栽培研究では、どこで、なにを、どのように栽培するかがポイントとなる (Hattori and Morita, 2010)。その理由の一つに食料とエネルギーとの競合を避けることがあるが、そのために非農地でも高いバイオマス生産性を示す非食用作物を、低投入持続的に栽培するシステムを確立する必要がある。そのため、乾燥・過

湿、貧栄養土壌などの様々な環境ストレス条件下でも高いバイオマス生産性を示す、すなわち環境ストレス耐性が高い作物を選定する必要がある。

そのような観点から、著者らは既往の文献レビューおよび実際の栽培試験の結果から、ネピアグラスとエリアンサスを選定した。これらの原料作物は環境ストレス耐性強いことが分かっているが、著者らはその理由の一つが根系にあると考えている。このことを検証するために、根系調査を行おうと考えた。しかし、根域が非常に広いことが予想されたため、根量と分布を合わせて検討するために、土壌断面法を改良して利用した (Shiotsu et al., 2012)。

畑作物に関する従来の根系調査法を取りまとめたものとしては、Boehm (1979) のものが便利であるが、残念ながら現在絶版である (第5図)。これをみると、畑作物の根系調査法には様々なものがあるが、比較的大きな根域をもつ作物の根系調査を行う場合、塹壕を掘って断面にでてくる根系を調査する方法が有効である。ただし、塹壕を掘って土壌断面を整形したうえでどうするかについてはいくつかの試みがあり、必ずしも標準化された方法は確立されていない。

山崎・帰山 (1982) は、Weaver や Kutschera と基本的に同じ方法を採用して、土壌断面を掘り進みながらトウモロコシ根系の投影像を描いた。根系の広がりや深さ、節根の伸長方向はよく理解できたが、この方法では根量や分布を定量化するには至らなかった。森田と阿部がコムギの根系調査をしたときには、塹壕を整形した後、土壌を5mm程度かき取って現れた根端（側根を含むすべての根の切断部位）の数を測定して、格子の面積で割って根数密度 (root number density, cm^{-2}) とした (第6図; Morita et al., 1993)。土壌の深さ別に根数密度を解析することで根系分布を把握できたが、根量の推定を行うに至らなかった。Nakamoto et al. (1992) は、土壌断面を約5mmかき取り、現れた根数から根長密度を推定した。ただし、この方法を採用するには習熟が必要であり、誰がやっても精度の高いデータが得られるまで標準化されているわけではない。

そこで、ネピアグラスとエリアンサスの根系調査を行う場合、中元がイネ科畑作物の根系調査に用いたり (中元, 1989; Nakamoto et al., 1989)、森田がメキシコの沙漠で点滴灌漑栽培したトウガラシとメロンの根系調査に用いた (森田・豊田, 1998; 第7図) 改良土壌断面法を利用した。すなわち、塹壕を掘って土壌断面を整形する。ここまでは多くの方法と共通している。その後で、土壌断面に10cmの格子をあて、その格子の中央に体積 100cm^3 の金属製の円筒を断面に垂直に打ち込み、根を含む土壌を採取する。これには土壌採

第5図 根系調査法の代表的書籍の表紙 (Boehm, 1979)。

左・中央が土壌断面法、右は初期のミニリフトロン法 (柄をつけた鏡を細い管の中に挿入し、移動させながら断面の根を観察する)。

第6図 土壌断面法によるコムギの根系調査。

第7図 改良土壌断面法によるトウガラシの根系調査 (森田・豊田, 1998)。

土壌断面の位置別に土壌調査用の金属製円筒を打ち込み、ふたをしてある。

取用として広く市販されている円筒を利用できるし、土壌中に打ち込むための柄も用意されている。これなら誰でも容易に行うことができ、データの標準化を進めやすい。円筒を掘り出して丁寧に根を洗い出し、長さを測定する。以上のようにしてそれぞれの格子の位置における根長密度を算出すれば、根長密度の等値線地図を描くことも可能であり(第8図)、また、ある程度の精度で根量も推定することができるため、根系形態の全体像を把握するのに適している。

第8図 改良土壌断面法によるトウガラシの根系調査の事例(森田・豊田, 1998)。
条に直交する土壌断面で、横軸の0の位置に条がある。図中の数字は根長密度 (cm cm^{-3}) を示す。

残された問題

以上、みてきたように、根系研究の出発点、また到達点としてフィールドにおける根系形態を把握することが必要である。根のデザインにおいて、①達成目標としての理想型根系の解明、②根系の形態と機能の制

御技術の開発とともに、③根系の形態と機能のモニタリング方法の開発と利用をあげたこと(森田, 2003)にもつながる点である。灌漑水田で栽培した水稻の根系について円筒モノリス法を利用することはすでに提案した(森田・阿部, 2001)。ここでは、畑作物の根系形態をフィールドで把握するのに有効な方法として、上記の改良土壌断面法を改めて提案したい。

改良土壌断面法を利用すれば、特別な機器を利用せずにフィールドで根量と分布を同時に、またかなり正確に把握できる。根系調査法としては、従来から様々なものが考案されているが(下田代ら, 2003; 第1表, 第2表)、いずれも一長一短であり、結局、研究目的に合致した根系調査法を選択しなければならない。しかし、そもそも根系調査法自体が標準化されていないと、異なる根系を比較することができない。したがって、根系調査法・調査項目・指標などについて標準化を進めるべきであるが(阿部, 1996)、上記の改良土壌断面法はフィールドにおける標準的な根系調査法の有力候補である。

そこで、標準化を進めるためにも、改良土壌断面法の問題点も指摘しておく。①まず、時間と労力がかかるため短時間で多くの反復を取れないが、ほとんどがかなり機械的に進められる作業なので、根を洗い出しておけば根長測定は後に回せる。②対象植物に対して、どの位置に、どの方向に土壌断面を作製するかは重要なポイントとなる。どの断面を切り取るかを統一しないと、相互比較が難しい。いずれにしても、植物体の近くに土壌断面を作製することにはなるが、条栽培す

第1表 根系調査法と計測可能な根の形態的パラメータ(下田代ら, 2003)。

	根重	根長	根数	根の表面積	平均根長	根長密度	根域	根系の到達深度	根の深さ指数	比根長	分枝係数・分枝指数	フラクタル次元・トポロジー指数	根の伸長速度・伸長期間	根の伸長方向	根の直径
発掘法	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○				○
土壌断面法		△	○			△	○		○						
モノリス法(無棒・ブロック・改良Nelson-Allmaras法)	○	○		○					○	○	○				
モノリス法(ケージ法、ピンボード法)	○	○	○	○		○	○		○	○	○	○			○
オーガー法・コアサンプリング法	○	○	○	○		○	○		○	○	○				
リゾトロン法		○	○			△	△	△	○		○	○	○	○	○
ミニリゾトロン法		○	○			△			○		○		○	○	○
根箱法	○	○	○	○	○				○	○	○	○	○	○	○
リゾメーター		○												○	
中性子ラジオグラフィー法		○				○	○					○	○	○	○
AE法		○												○	○

(Atkinson ed. 1991 Smit *et al.* 2000などを参考に作成)

第2表 根系調査法の特徴 (下田代ら, 2003).

	労 力	施 設 ・ 機 器	経 費	継 続 性	携 帯 性	根の生育への影響	計測に必要なサンプル数	計測可能なサンプルサイズ
発掘法	大	不要	少	不可	不可	破壊	多	大
土壌断面法	大	不要	少	不可	不可	破壊	多	大
モノリス法 (無粋・ブロック・改良Nelson-Allmaras 法)	大	不要	少	不可	不可	破壊	多	大
モノリス法 (ケージ法, ビンボード法)	大	不要	少	不可	不可	破壊	多	中
オーガー法・コアサンプリング法	中	不要	少	不可	不可	破壊	多	小
リゾトロン法	小	要	多	可	不可	大	少	大
ミニリゾトロン法	小	要	多	可	可	中	多	中
根箱法	小	要	多	可	可	大	少	中
リゾメーター	小	要	多	可	可	小	少	小
中性子ラジオグラフィー法	小	要	多	可	不可	小	少	小
AE 法	小	要	多	可	可	小	少	小

(Atkinson ed. 1991 Smit *et al.* 2000などを参考に作成)

る作物の場合, 条に平行な断面か垂直な断面かという点があるし, 栽植間隔が異なる場合には横方向にどこまで調査するかも問題になる. ③ある断面における根系像を見るので, 根系の全体像をどうイメージし, 根系全体の根量をどのようにして正確に推定していくかも課題である. ④そのほか, ある時間における根系像をみることになるので, 根系形成や根量推移を把握するには必ずしも向いておらず, 別の方法と組合せるか, 異なる時期に調査を繰返すしかない. ただ, これらの点はフィールドにおける根系調査に共通した課題であり, 改良土壌断面法に特有の問題点ではないことも指摘しておきたい.

おわりに

以上, 根系の形態をビジュアルに見ることから始めて, 根系形態を把握する方法について考え, 標準化が必要ことから, 有力候補として改良土壌断面法を改めて提案した. フィールドにおける代表的な根系調査法として, この他にコアサンプリング法とモノリス法とがある. コアサンプリング法については, すでに解説したとおりである. モノリス法は根域が小さい場合には有効であるので (第2図, 第9図), 使い分けられよう (森田・奥田, 1995).

引用文献

- 阿部 淳 1996. 農業に寄与する「根」研究の課題. 農園 71 : 772-776.
 阿部 淳, 森田茂紀 2003. 栃木県農家水田において乳苗移植栽培した水稻の根系調査事例—ファイトマーに基づく形態解析

第9図 モノリス法によるトムロコシの根系調査.

- と出液速度による機能評価—, 根の研究 12 : 9-13.
 Atkinson, C. ed. 1991. Plant Root Growth. Blackwell, London.
 Boehm, W. 1979. Methods of Studying Root Systems. Springer-Verlag, Berlin.

- 陳世鑽 1986. 内蒙古草原植物根系類型. 内蒙古人民出版社, 呼和浩特.
- Hattori, T., Morita, S. 2010. Energy crops for sustainable bioethanol production : which, where and how ? Plant Prod. Sci. 13 : 221–234.
- Hattori, T., Shiotsu, F., Doi, T., Morita, S. 2010. Suppression of tillering in *Erianthus ravennae* (L.) Beauv. Due to drought stress at establishment. Plant Prod. Sci. 13 : 252–255.
- Kamoshita, A., Wade L. J., Ali, M. L., Pathan, M. S., Zhang, J., Sarkarung, S., Nguyen, H. T. 2002. Mapping QTLs for root morphology of a rice population adapted to rainfed lowland conditions. Theor. Appl. Genet. 104 : 880–893.
- Kang, S-Y., Morita, S., Yamazaki, K. 1994. Root growth and distribution in some Japonica-indica hybrid and Japonica type rice cultivars under field conditions. Jap. J. Crop Sci. 63 : 118–124.
- 荻住 昇 1957. 樹木の根の形態と分布. 林業試験場研究報告94 : 1–205.
- 荻住 昇 1963. 樹木根系図説. 誠文堂新光社, 東京.
- 荻住 昇 2010. 最新樹木根系図説. 誠文堂新光社, 東京.
- 加藤 徹 1989. 野菜の生育と根系の分布・機能. バイエム興業, 南国.
- 川田信一郎, 山崎耕宇, 石原 邦, 芝山秀次郎, 頼 光隆 1963. 水稻における根群の形態形成について, とくにその生育段階に茶目した場合の一例. 日作紀 32 : 163–180.
- 川田信一郎, 佐々木修, 山崎耕宇 1977. 水稻冠根および分枝根の基本的な組織ならびに分枝の際における導管連絡について. 日作紀 46 : 543–557.
- 川田信一郎, 森田茂紀, 山崎耕宇 1978. 水稻冠根の根端における導管および篩管の文化の順序について. 日作紀 47 : 101–110.
- Kondo, M., Pablico, P. P., Aragones, D. V., Agbisit, R., Abe, J., Morita, S., Courtois, B. 2003. Genotypic and environmental variations in root morphology in rice genotypes under upland field conditions. Plant Soil 255 : 189–200.
- Kutschera, L. 1960. Wurzelatlas, Mitterleuropaischer Ackerunkraut er und Kulturpflanzen. DLG-Verlag GGMBH, Furankfurt.
- Levillain, J., M' Bou, A. T., Deleporte, P., Saint-André, L., Jourdan, C. 2011. Is the simple auger coring method reliable for below-ground standing biomass estimation in Eucalyptus forest plantations ? Ann. Bot. 108 : 221–230.
- Morita, S., Suga, T., Haruki, Y., Yamazaki, K. 1988. Morphological characters of rice roots estimated with a root length scanner. Jpn. J. Crop Sci. 57 : 371–376.
- Morita, S., Okuda, H., Abe, J. 1993. Spatial distribution and structure of wheat root system. In Korean Society of Crop Sci. ed. Low-input Sustainable Crop Production Systems in Asia. Seoul. 399–404.
- 森田茂紀, 奥田浩之 1995. 圃場で栽培したコムギの種子根および節根の伸長および分枝根形成. 日作紀 64 : 14–18.
- 森田茂紀, 山田章平, 阿部 淳 1995. イネの根系形態の解析－成熟期における品種間比較－. 日作紀 64 : 58–65.
- 森田茂紀, 豊田正範 1998. メキシコ合衆国バハ、カリフォルニア州の沙漠地域で点滴灌漑を用いて栽培したトウガラシおよびメロンの収穫期における根系の形態. 日作紀 67 : 353–357.
- 森田茂紀, 阿部 淳 1999. 植物の根に関する研究の課題. 日作紀 68 : 453–462.
- 森田茂紀 2000. 根の発育学. 根の発育学. 東京大学出版会, 東京.
- 森田茂紀, 阿部 淳 2001. 水田における根量の測定と評価－円筒モノリス法－. 農業および園芸 76 : 605–611.
- Morita, S., Sakaigaichi, T., Abe, J., Kobayashi, K., Okada, M., Shimono, H., Yamakawa, Y., Kim, H-Y., Hasegawa, T. 2005. Structure and function of rice root system under FACE condition. J. Agr. Meteorol. 60 : 961–964.
- 森田茂紀, 阿部 淳, Lux, A. 2005. 植物機能形態学における蛍光顕微鏡の利用. 日作紀 74 : 459–461.
- 森田茂紀, 阿部 淳 2010. 国際根研究学会の歩みと第7回シンポジウム. 農園 85 : 102–106.
- 中元朋実, 坂本晴一, 下田和雄, 松崎昭夫 1989. アワ, キビ, トウジンビエおよびトウモロコシの根系の比較研究. 日作紀 58 : 530–534.
- Nakamoto, T. 1989. Development of rooting zone in corn plant. Jap. J. Crop Sci. 58 : 648–652.
- Nakamoto, T., Matsuzai, A., Shomoda, K. 1992. Root spatial distribution of field-grown maize and millets. Jap. J. Crop Sci. 61 : 304–309.
- Oyanagi, A., Nakamoto, T., Wada, M. 1993. Relationships between root growth angle of seedlings and vertical distribution of roots in the field in wheat cultivars. Jpn. J. Crop Sci. 62 : 565–570.
- Ra, K., Shiotsu, F., Abe, J., Morita, S. 2012. Biomass yield and nitrogen use efficiency of cellulosic energy crops for ethanol production. Biomass Bioenerg. 37 : 330–334.
- Schuurman, J. J., Goedewaagen, M. A. J. 1971. Methods for the Examination of Root Systems and Roots, methods in use at the Institute for Soil Fertility for eco-morphological root investigations. 2nd ed. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen. 36–39.
- 清水建美 1995. 日本草本植物根系図説. 平凡社, 東京.
- 下田代智英, 稲永 忍, 森田茂紀 2003. 根系形態の測定と評価. 森田茂紀編 根のデザイン－根が作る食糧と環境－. 養賢堂, 東京. 18–30.
- Shiotsu, F., Abe, J., Ra, K., Gau, M., Morita, S. 2012. Root distribution of perennial energy crop *Erianthus*. Abstracts of the 8th ISRR Symposium. Dundee, Scotland. 28.
- 諏訪紀夫 1977. 定量形態学－生物学者のための stereology. 岩波書店.
- van Noordwijk, M., Brouwer, G., Meijboom, F., do Rosario, M., Oliveira, G., Bengough, A. G. 2000. Trench profile techniques and core break methods. In Smit, A. L., Bengough, A. G., Engels, C., Van Noordwijk, M., Pellerin, S., van de Geijn, S. C. eds. Root Methods : A Handbook. Springer-Verlag, Berlin. 211–233.
- Wang, H., Inukai, Y., Yamauchi, A. 2006. Root development and nutrient uptake. Crit. Rev. Plant Sci. 25 : 279–301.
- Weaver, J. E., Jean, F. C., Crist, J. W. 1922. Development and Activities of Roots of Crop Plants, a study in crop ecology.

- Carnegie Institute, Washington.
- Weaver, J. E. 1926. Root Development of Field Crops. McGraw-Hill, New York.
- Yamauchi, A., Y. Kono, Tatsumi, J. 1987. Quantitative analysis on roots system structures of upland rice and maize. Jap. J. Crop Sci. 56 : 608-617.
- Yamauchi, A., Pardales Jr, J. R., Kono, Y. 1996. Root system structure and its relation to stress tolerance. In Ito, O. et al. ed. Dynamics of Roots and Nitrogen in Cropping Systems of Semi-arid Tropics. Japan International Research Center for Agricultural Sciences, Tsukuba. 211-233.
- 山崎耕宇, 婦山長憲 1982. トウモロコシ根系を構成する1次根の外部形態およびその伸長方向. 日作紀 51 : 584-590.