イネの根系形態の解析

—成熟期における品種間比較—*

森田 茂 紀・山田 章 平**・阿部 淳

(東京大学農学部)

1994年7月29日受理

要 旨: 水稻の根系形態における品種間差異について検討し、根系形態を解析する場合の視点を確立することを試みた。材料として供試した品種は、すでに行なった予備的な解析の結果から特徴的な根系形態を有すると考えられるコシヒカリ、土橋1号、IR36、Lemontの4品種である。これら4品種を水田で慣行栽培し、登熟期に株下と株間から根系を採取した。土層別に根を洗い出して、根長と根重を測定した。また、別の個体について1次根数と伸長角度を測定した。これらのデータをもとに、分布の指標として「根の深さ指数」と、根量とを算出した。その結果、この両者を組み合わせることによって、それぞれの品種の根系形態の特徴を定量的に捉えることができた。コシヒカリは根量が少なく浅根性、Lemontは根量が多く深根性、IR36は根量が多く浅根性、土橋1号はこれら3品種の中間型であった。つぎに、この根量および分布の様相を個々の1次根の形態に着目して解析を進めた結果、根量は1次根数および、分枝根を含めた1次根1本当りの総根長である「平均根長」によって、また、「根の深さ指数」は1次根の平均伸長角度と「平均根長」によって、それぞれ規定されていることが分かった。その場合、どの形質が大きく寄与しているかは、品種によって必ずしも同じではなく、例えば、同じように総根長が長い場合でも、IR36は1次根が多いことが、Lemontは「平均根長」が長いことが寄与しており、土橋1号では「平均根長」が、Lemontでは平均伸長角度が分布を規定していることが分かった。

キーワード: 1次根, イネ, 根重, 根長, 根の深さ指数, 根の分布, 品種間差異。

Analysis on Root System Morphology in Rice with Reference to Varietal Differences at Ripening Stage: Shigenori MORITA, Shohei YAMADA and Jun ABE (*Faculty of Agriculture, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan*)

Abstract: The morphology of the rice root system was established by analyzing varietal differences. Four rice varieties, Koshihikari, Dobashi 1, IR36 and Lemont, were grown in an experimental paddy under ordinary condition. Soil monolith were taken from the direct-foot of a hill and from the midpoint among hills at the ripening stage. After washing out roots carefully, the length and the weight of roots at different soil depths were measured. The number and the growth angle of nodal roots were also examined in the same four varieties. With these data, the root amount and the 'root depth index' as an index of root distribution were calculated. The root system morphology of the four varieties were quantitatively characterized with these two indices: Koshihikari has a root system with a small amount and a shallow distribution, Lemont large amount and deep distribution, IR36 large amount and shallow distribution, and Dobashi the moderate of these three other varieties, respectively. Furthermore, it was shown that the root amount was determined by the combination of the number of nodal roots and the 'mean root length' (the mean length of a nodal root including the lateral roots of any order). The 'root depth index', on the other hand, was determined by the combination of the mean growth angle of nodal roots and the 'mean root length'. The contribution of these determining factors differed among cultivars. For instance, the large root amount depended on the large number of nodal roots in IR36 and on the large 'mean root length' in Lemont, respectively. The deep distribution of roots in Dobashi 1 was due to large 'mean root length' whereas to the large mean growth angle in Lemont.

Key words: Nodal roots, *Oryza sativa* L., Root depth index, Root distribution, Root length, Root weight, Varietal differences.

作物の根系は植物体を支持し、養水分を吸収するという重要な役割を果たしており、作物を栽培する場合に行なう主な管理作業は、土壌を介して作物の根系に働きかけている場合が多い³⁹⁾。したがって、適

切な管理作業を行なうためには、根系形態やその形成過程に関する知見が必須のものとなる。以上のような観点から、著者等は水田で栽培したイネ個体群の根系形態について、根量や分布に着目しながら研究を進めている^{10,20,30)}。もちろん、現在までに行なわれてきた研究は少なくないが、根系の形態をどのように把握するかという視点は確立してないといっ

* 大要は第195回講演会(平成5年4月)および第196回講演会(平成5年10月)において発表。

** 現在、ハウス食品。

もよい。そのため、根系形態の品種間差異についての検討も充分とはいえない。しかし、ストレス環境下における稲作を考えた場合、将来は根系に着目した育種が行なわれる可能性もあり、そのためにも根系形態の品種間差異を的確に掴んでおく必要がある。そこで、本研究においてはイネの根系形態における品種間差異の解析を通じて、根系の形態を定量的に把握する方法を確立することを試みた。また、根系の形態がこれを構成している個々の1次根のどのような形態的要因によって規定されているか、という点についても合わせて解析を行なった。

材料と方法

材料として供試したイネは、東京大学農学部附属農場（東京都田無市在）において栽培したコシヒカリ、土橋1号、IR36、およびLemontの4品種であった。著者等のグループが進めているイネにおける形態的多様性に関する検討の結果^{41,42)}を参考にして、特徴的な4品種を選定した。元肥として1 ha当たりN, P, Kが、それぞれ50 kg, 75 kg, 66.7 kgとなるように化成肥料を与え、1992年6月5日、栽植間隔：株間15 cm, 条間30 cm, 植付本数：1株1個体で移植した。追肥は行なわず、その他の管理作業は慣行にしたがった。

材料の採取は、登熟期に行なった（コシヒカリ：9月22日、土橋1号・Lemont：9月29日、IR36：10月6日）。まず生育調査を行ない、標準的な生育を示した株およびその周囲から、以下のような手順で根系の採取を行なった。すなわち、株を中心とした部位（以下、株下と呼ぶ）と、隣接する4株の中央部（以下、株間と呼ぶ）において、ステンレス製の円筒を土壌中に鉛直方向に挿入して、根系を含む円柱状の土壌モノリス（直径15 cm, 長さ20 cm）を採取した。これらの土壌モノリスを、包丁で土壌表面から5 cmずつの4層に分け、各土層から根を丁寧に洗い出し、ゴミや土壌粒子などを取り除き、ルートスキャナーで根長を測定した。その後、80°Cで24時間乾燥させ、根重を測定した。

以上のような手順で測定した土層中の根長および根重を土壌体積(884 cm³)で割って、根長密度(cm/cm³)および根重密度(mg/cm³)を算出した。株下と株間の各土層における根長密度・根重密度の平均値を平均根長密度・平均根重密度とし、これらの値を用いて各土層における根長および根重を推定した。また、土壌表面から深さ20 cmまでの各土層の

根長・根重の総和をそれぞれ単位面積当たりの総根長(km/m²)・総根重(g/m²)とした^{20,30)}。

また、以上のようにして推定した各土層における根長および根重を用いて、根量の分布様式の指標となる「根の深さ指数」⁴⁴⁾を算出した。この「根の深さ指数」は、根量の垂直分布における重心の深さの推定値といてよく、この値が大きいほど深根性、すなわち根系の分布が深く、反対に小さいほど浅根性、すなわち根系の分布が浅いことを意味している。本研究においては、根長を基にした「根の深さ指数1」および根重を基にした「根の深さ指数2」の両者について検討した。具体的には、それぞれ次のようにして算出した。

「根の深さ指数1」= (2.5 cm × (0–5 cmの土層における根長の%) + 7.5 cm × (5–10 cmの土層における根長の%) + 12.5 cm × (10–15 cmの土層における根長の%) + 17.5 cm × (15–20 cmの土層における根長の%)) / (0–20 cmの根長の%)

「根の深さ指数2」= (2.5 cm × (0–5 cmの土層における根重の%) + 7.5 cm × (5–10 cmの土層における根重の%) + 12.5 cm × (10–15 cmの土層における根重の%) + 17.5 cm × (15–20 cmの土層における根重の%)) / (0–20 cmの根重の%)

以上の他、1次根の数および伸長方向を調査するための材料として、各品種3株を、ステンレス製の円筒（直径15 cm, 長さ30 cm）を用いて株下から採取した。土壌を水で丁寧に洗い流した後、植物体全体を70%アルコールで固定、保存した。その後、他株の根やゴミなどを取り除き、1次根を株際から切り取り、切断された全ての1次根の数を記録し、長さを測定した。また株の基部が半球形を呈していると考え、周長の測定値から株の半径を測定した。円筒によって切断された1次根は、その切断根長と株の半径とから伸長角度（1次根の伸長方向が水平面となす角度）を算出した^{26,28)}。根端が存在するか、あるいは材料の採取や洗い出しおよび準備や測定の過程で脱落したと考えられる根は、伸長角度の計算を行なわず、1次根数のみに含めた。なお、1次根の切断根長に株の半径を加える補正を行なった後も円筒の半径に達しないものは、伸長角度は算出できなかった。これらの1次根の内、根長が5 cm以上のものは伸長角度を0°とした。また、根端のある、長さ20

第1表 各品種の茎葉部および根系の生育*.

品 種	有効茎数 (本/株)	止葉葉位	総根長 (km/m ²)	総根重 (g/m ²)	根の深さ指 数 1 (cm)	根の深さ指 数 2 (cm)	1 次根数 (本/株)	1 次根の平均 伸長角度(°)	平均根長 (m)
コシヒカリ	11	14	15.6 ^b ±1.37	91.4 ^a ±14.37	7.69 ^b ±0.61	6.97 ^{ab} ±0.76	358.3 ^b ±9.02	31.2 ^b ±0.94	1.96 ^a ±0.20
土橋 1 号	7	16	17.4 ^{ab} ±1.42	99.0 ^a ±15.39	7.96 ^{ab} ±0.49	7.46 ^a ±0.79	333.7 ^b ±48.75	29.7 ^b ±2.77	2.37 ^a ±0.34
IR 36	19	17	18.2 ^a ±0.93	111.4 ^a ±10.53	7.26 ^b ±0.54	5.69 ^b ±0.42	657.0 ^a ±114.50	32.9 ^b ±1.68	1.26 ^b ±0.14
Lemont	9	14	18.4 ^a ±1.17	111.6 ^a ±15.57	8.99 ^a ±0.68	8.18 ^a ±0.79	372.7 ^b ±41.19	38.2 ^a ±3.69	2.23 ^a ±0.11

* 調査対象とした各 3 株の平均値と標準偏差を示す。ただし、有効茎数と止葉葉位については、各品種栽培区画内での平均的な値を示した。平均値の右肩の記号はダンカンの多重検定の結果を示したもので、同じ記号は品種間に 5%水準で有意な差がないことを示す。

cm 以上の根については算出された伸長角度と 90°との平均値を伸長角度とした。平均伸長角度は、以下のようにして算出した。

平均伸長角度 = 0° × (補正後も伸長角度を推定できなかった 1 次根の%) + 5° × (伸長角度の推定値が 0–10°の 1 次根の%) + 15° × (伸長角度の推定値が 10–20°の 1 次根の%) + 25° × (伸長角度の推定値が 20–30°の 1 次根の%) + 35° × (伸長角度の推定値が 30–40°の 1 次根の%) + 45° × (伸長角度の推定値が 40–50°の 1 次根の%) + 55° × (伸長角度の推定値が 50–60°の 1 次根の%) + 65° × (伸長角度の推定値が 60–70°の 1 次根の%) + 80° × (伸長角度の推定値が 70–90°の 1 次根の%)

以上のようにしてそれぞれの株について伸長角度の平均値を算出し、3 株の平均値をそれぞれの品種の平均伸長角度とした。

さらに、上記の手順で推定した単位面積当たりの根長と栽植密度とから、1 株当たりの総根長を算出した。この 1 株当たりの総根長を 1 次根数で割ったものを「平均根長」とした。すなわち、「平均根長」とは、すべての分枝根を含めた 1 次根 1 本当たりの総長の平均値を意味しており、この値を 1 次根 1 本当たりの「サイズ」の指標として用いた。

結 果

1. 根量およびその分布における品種間差異

登熟期における根量およびその分布には、明らかな品種間差異が認められた。根量についてみると、土壌表面から深さ 20 cm までに分布する単位面積当たりの総根長は、IR36 および Lemont が最も大

きく、ついで土橋 1 号で、コシヒカリが最も少なかった。単位面積当たりの総根重も全く同様の傾向を示し、IR36 および Lemont が最も大きく、ついで土橋 1 号、コシヒカリが最も少なかった (第 1 表)。

つぎに、深さ別の根量の分布割合についてみると、やはり品種の特徴が認められた。すなわち、根長・根重いずれの場合も、IR36 は表層近くに多くの根が分布しており、深くなるにしたがって根量が急激に減少しているのに対して、Lemont では深くなっても根量の減少は比較的少なかった。コシヒカリおよび土橋 1 号の根系は、IR36 と Lemont の中間的な様相を呈した (第 1 図)。

そこで、根量の垂直分布様式を定量的に比較するために、「根の深さ指数」を指標にして検討を続けた。根長を基に算出した「根の深さ指数 1」は、Lemont が最も大きく、本研究で供試した 4 品種の中で最も深根性であることが分かった。ついで、土橋 1 号、コシヒカリの順に小さくなり、IR36 が最も小さく、4 品種中で最も浅根性であることが分かった。根重を基に算出した「根の深さ指数 2」に着目して検討を行なった結果も、同様のものであった (第 1 表)。

以上のように、成熟期におけるイネの根系形態には品種間差異が認められた。この根系形態における品種間差異は、総根長あるいは総根重といった根量と、「根の深さ指数」を指標とした根量の垂直分布との組合せによって定量的に把握することができた。これらの指標に着目して比較検討した結果、根量と分布における特徴は、品種によって様々な組合せがあることが明らかとなった。すなわち、本研究の 4 品種については、コシヒカリは根量が少なく浅根性、Lemont は根量が多く深根性、IR36 は根量が多く浅根性であるのに対して、土橋 1 号はこれらの 3 品種

第1図 土層別の根量の分布割合。A, 根長; B, 根重; ●, コシヒカリ; ■, 土橋1号; ◆, IR36; ▲, Lemont.

の中間的な様相を呈していることが分かった。

2. 根系形態を規定する形態的諸要因

引き続き, 以上の解析で明らかとなった根系形態の品種間差異が, どのような形態的要因によって規定されているかについて, 検討を行なった。着目した形質は, 根系を構成している1次根の数, すべての分枝根を含めた1次根1本当たりの総根長(「平均根長」), 1次根の伸長角度の3つの要因であった(第1表)。

1次根の数は, 土橋1号, コシヒカリ, Lemontの順で少しずつ多くなっていたのに対して, IR36では1次根数が非常に多く, 他の3品種の約2倍ほどであった。1次根のサイズの指標である「平均根長」は土橋1号とLemontで大きく, コシヒカリ, IR36の順で小さくなっていった。1次根の平均伸長角度は, 土橋1号, コシヒカリ, IR36, Lemontの順で徐々に大きくなっていった。

各形質間の単相関係数について検討したところ, 総根長と1次根数や「平均根長」との間の相関係数はいずれも5%水準で有意ではなかった。また, 「根の深さ指数1」と平均伸長角度および「平均根長」との間の相関係数も, 両者とも5%水準で有意ではなかった(第2表)。このように, 根量および分布のいずれも, 1つの形質では説明できないことが分かった。そこで, 重回帰式を算出したところ, 「根の深さ指数1」の場合は決定係数が非常に高く ($r^2 =$

第2表 根量および分布を規定する形質^{#1}。

根系の特徴を示す形質	規定要因と予想される1次根の形質との関係		重回帰式による予測値との関係	
根量	1次根数	「平均根長」	左の2形質による重回帰 ^{#2}	
	相関係数	相関係数	相関係数	決定係数
総根長	0.436 ^{NS}	-0.164 ^{NS}	0.908 ^{NS}	0.825
総根重	0.583 ^{NS}	-0.361 ^{NS}	0.838 ^{NS}	0.702
分布	平均伸長角度	「平均根長」	左の2形質による重回帰 ^{#3}	
	相関係数	相関係数	相関係数	決定係数
根の深さ指数1	0.714 ^{NS}	0.700 ^{NS}	0.999 ^{**}	0.999
根の深さ指数2	0.383 ^{NS}	0.922 ^{NS}	0.998 ^{**}	0.992

#1 品種ごとの平均値をもとに算出した各形質間の相関係数および重回帰式による予測値と実測値との関係を示した。NS, 5%水準で有意な相関がない; *, 5%水準で有意な相関; **, 1%水準で有意な相関。品種数が少ないため ($n=4$; $df=2$) 統計的な意義は小さいが, 形質間の関連の程度を検討する参考として示した。

#2 重回帰式は, [総根長] = $0.0184 \times [1次根数] + 4.79 \times [平均根長]$ および [総根重] = $0.119 \times [1次根数] + 26.9 \times [平均根長]$, $n=4$; $df=2$ 。

#3 重回帰式は, [根の深さ指数1] = $0.152 \times [平均伸長角度] + 1.06 \times [平均根長] + 0.924$ および [根の深さ指数2] = $0.113 \times [平均伸長角度] + 1.93 \times [平均根長] - 0.406$, $n=4$; $df=2$ 。

0.997), 平均伸長角度と「平均根長」とで説明できることが分かった. 総根長の場合には, 総根長を1次根数で割って「平均根長」を算出しているの、重回帰式自体あまり意味がないが, 1次根数あるいは「平均根長」のいずれか単独で説明するよりはよい結果が得られた.

以上のように, 根系形態を規定する可能性がある1次根の形態や生育特性にも, 明らかな品種間差異が認められた. その場合, どの要因が最も特徴的であるかは品種によって異なっていることも明らかとなった. 結果1. の項で記載, 整理したそれぞれの品種の根系形態の特徴が, 根系を構成する1次根の生育特性からどのように理解できるかについては, 考察の項で検討したい.

考 察

イネの根系の量および分布に関しては少なくない研究が行われてきており³²⁾, 多くの事例を総合することによって一般的な傾向が明らかになりつつある. ただし, 根系の形態をどのように把握し, 解析していくかという視点が確立していなかったため, 必ずしも全体を統一的に理解できていなかったところに限界があったことも否定できない^{39,40)}.

その点, 本研究では単位面積当たり(供試した4品種の栽植密度および植付け本数が同じなので, 1株当たりあるいは1個体当たりと同じことになる)の総根量(根長・根重)とその分布の様相に着目することによって, それぞれの品種における根系形態の特徴を定量的に把握することができた. その結果をごく簡単に整理すると, コシヒカリは根量が少なく浅根性, Lemont は根量が多く深根性, IR36 は根量が多く浅根性, 土橋1号は以上3品種の中間的な様相を呈していた. 根量とその分布の様相を組み合わせることによって根系形態を定量化して比較する方法が確立できたといえる.

さらに, 本研究では根量およびその分布の様相における品種間差異の問題を, 根系を構成する個々の1次根の形態や生育特性に還元して理解することもできた. その結果を一言で表現すれば, 根量は1次根の数と「平均根長」とによって, また, 分布の様相は1次根の平均伸長角度と「平均根長」とによって, それぞれ規定されるということである.

まず, 根量の場合, 1次根数と「平均根長」の2つの形質に規定されると考えられたが, この2形質の寄与の程度には品種間で相違がみられた. 例えば,

IR36 で総根長が長いのは主として1次根の数が多いためであるのに対して, Lemont の総根長が長いのは1次根の数が若干多いこともあるものの, 「平均根長」が長いことが大きな理由と考えられる.

一方, 「根の深さ指数」で評価された根量の分布は, 1次根の平均伸長角度と「平均根長」の2つの形質に規定されていた. すなわち, Lemont が深根性なのは平均伸長角度が大きいことと, 「平均根長」が長いことの両者によるものと考えられる. 土橋1号が平均伸長角度は小さいにも係らず深根性なのは, 「平均根長」が長いためであり, 反対に, 平均伸長角度が比較的大きいIR36が浅根性なのは, 「平均根長」が短いためであると推察される.

以上の解析結果は, 根系形態を規定する形態的な要因として, 1次根の数, 1次根の長さおよび分枝程度, 1次根の伸長方向の3者が重要であることを示している. このことは, 各形質間の単相関係数や「根の深さ指数」や総根量の重回帰式に関する検討の結果が示すところでもある.

従来, 1次根の数および(根軸の)長さは, 測定が比較的容易であるため, 根系形態を研究する場合によく注目されてきた^{5,6,15,18,19,21,22,45,46,51)}. しかし, 根長測定機器であるルートスキャナーが普及するまでは, 根系全体の分枝根の長さを測定することは現実的でなく, 部分的な測定に基づいて全体を推定するような研究が若干あるにすぎなかった^{3,11,12,13)}. 分枝根は根重からみるとごくわずかにすぎないが, 根の数, 長さ, 表面積などにおいて占める割合は非常に高い^{3,4,7,13)} ために, 養水分吸収の機能を考える場合には, 分枝根を含めた測定が是非とも必要である. ルートスキャナーにも検出限界があり²⁹⁾, トウモロコシ³⁴⁾ やコムギ³⁵⁾ ではほぼすべての分枝根を測定することができるが, イネの細い分枝根は測定できない⁹⁾ という点に注意する必要がある. しかし, ルートスキャナーの普及に伴って, 分枝根を含む総根長を取扱うことができるようになったことは, 意義深い. 今回の研究の結果, 重要性が認識された「平均根長」は1次根の種類や部位によって, あるいは品種によって分枝程度に大きな差がなければ, 根軸の長さといいかえてもよいことになるが, 同一品種でも生育に伴って分枝程度が増加することはほぼ確実である^{29,47)} し, 品種間差異が認められる可能性もある^{2,3,29)} ので, 今後の研究が必要である. なお, 「平均根長」が大きかったLemontと土橋1号では, 他の2品種に比較して直径の大きい1次根が

多かった。両者の関係は今後検討すべき課題の一つである。

1次根の伸長方向は、一部の研究者によって古くから注目されていた^{23,49,50)}が、取り扱いが困難なこともあって、定量的な検討は進んでいなかった。最近になって、単純で、しかもある程度の誤差範囲で個々の1次根の伸長方向を推定する方法が開発、改良される過程で研究が進み^{16,24,25,26,27,28,33,54)}、“葉ざし”法を用いた実験的な研究^{17,36)}も行なわれてきた。モデル研究^{31,37,48)}や統計的な検討¹⁾が並行して進んだため、1次根の伸長方向に関して異なる根系を比較したり、特定の根系を評価できるようになったし、個々の1次根の伸長方向と根系全体の形態を関連づけて考察することができるようになった。これらの研究の発展を踏まえて、1次根の伸長方向が根系形態を規定する重要な要因であることは、すでに指摘したところである⁴³⁾。これに加えて、本研究において1次根の伸長方向の他に、根系の分布を規定している要因としての「平均根長」が初めて明らかにされたことは、大きな成果の一つである。

なお、本研究で着目した3つの要因、すなわち、1次根の数、1次根のすべての分枝根を含む総根長の平均(「平均根長」)、および1次根の伸長角度のそれぞれが、根系全体の形態形成にどれくらい寄与しているかは、さらに研究事例を増やしながら検討を進めていく必要がある。

ところで、本研究において解析の対象としたイネ4品種は、以下のような経緯で選定したものである。すなわち、イネの形態的な多様性について検討する過程で、イネの体が形態的な単位(ファイトマー)の積み重ね構造として理解できるという考え方¹⁴⁾にたち、品種間で対応する同一位置のファイトマーの形態に着目して多変量解析を行なった。その結果、ファイトマー単位でみたイネの形態に品種間差異が認められると同時に、これらの差異に基づく品種の分類と、従来の来歴や生態的条件に基づいた分類とがほぼ対応することが分かってきた^{41,42)}。そこで、以上の成果を踏まえて、ファイトマー単位の形態が特徴的な4品種を選定し、成熟期における完成した根系形態について解析した結果、同様に品種間差異が認められた。この事実は、ファイトマー単位の根の形態と根系全体の特徴とが関連している可能性を示唆するものといえる。これに関連して、例えばIR36で1次根数が非常に多いことは、1個体当たりの茎数が多い⁵³⁾と考えられるが、同時に主茎の止葉

葉位が他の品種より高いことから、個体全体のファイトマー数や1次根が出現したファイトマー数が多い⁵⁴⁾ため、1次根数が多いと考えられる。また、生育に伴い、茎軸に沿ってファイトマーの大きさが大きくなることにも注意する必要がある。例えば、韓国産の日印交雑イネ品種と日本型イネ品種を圃場で同一条件下で栽培した場合、日印交雑イネ品種の方が日本型イネより成熟期の根量が多いことを既に報告した¹⁰⁾。また、“葉ざし”法⁵²⁾を用いて、異なる位置の(異なる生育時期に形成された)ファイトマーにおける1次根の生育を比較すると、生育に伴って根量、とくに1次根の数の増加が日印交雑イネ品種で著しいことも明らかにした⁸⁾。このような事実を参考にして、生育に伴うファイトマーの数および大きさの推移に着目して、現在、根系の形成過程の検討を進めている³⁸⁾。ファイトマーの形態と根系全体の関係について考察するには必ずしもデータが充分ではないので、引き続き研究を進めたいと考えている^{39,40)}。

謝辞 材料として利用したイネの種子は、農業研究センター(当時)の丸山清明氏より供与頂いたものである。また、材料の育成にあたっては、東京大学農学部附属多摩農場の松崎昭夫教授ならびに町田康寛技官に全面的にお世話になった。さらに、根系採取には東京大学農学部の根本圭介博士ならびに大学院学生の中川淳也氏の協力を得た。ここに記して感謝の意を表する次第である。

引用文献

1. Abe, J., K. Nemoto, D.-X. Hu and S. Morita 1990. A nonparametric test on difference in growth direction of rice primary roots. *Jpn. J. Crop Sci.* 59: 572—575.
2. 阿部 淳・山本真也・森田茂紀・秋田重誠 1994. 土壌水分条件がイネの分枝根の発達に及ぼす影響. *日作紀* 63(別1): 200—201.
3. 原田二郎・姜始龍・山崎耕宇 1988a. 日印交雑稲における分枝根の形成量. *日作紀* 57(別2): 83—84.
4. 原田二郎・姜始龍・山崎耕宇 1988b. 水稻根の表面積および体積の推定とその品種間差異についての試算. *日作紀* 57(別2): 89—90.
5. 稲田勝美 1967. 水稻根の生理的特性に関する研究、とくに生育段階ならびに根の age の観点において. *農技研報* D16: 19—156.
6. 岩槻信治・石黒 迅 1936. 水稻の根の伸長量に就いて. *農及園* 11: 2187—2196.
7. 姜始龍・原田二郎・山崎耕宇 1990. 分枝・“表面積係数”および“体積係数”によって評価した水稻根の分枝程度. *日作紀* 59(別2): 205—206.
8. 姜始龍・森田茂紀・山崎耕宇 1991. 日印交雑稲およ

- び日本稲における1次根の生育と導管の量. 日作紀 60(別2): 237—238.
9. Kang, S-Y, S. Morita and K. Yamazaki 1993. Comparisons of three methods for estimating root length in rice. In Korean Society of Crop Science ed., Low-Input Sustainable Crop Production Systems. KSCC, Korea. 441—449.
10. Kang, S-Y, S. Morita and K. Yamazaki 1994. Root growth and distribution in some japonica-indica hybrid and japonica type rice cultivars under field conditions. Jpn. J. Crop Sci. 63: 118—124.
11. 川島長治 1988a. 水稻の根系形成に関する研究. 第1報 主稈における分枝根の生育. 日作紀 57: 8—18.
12. 川島長治 1988b. 水稻の根系形成に関する研究. 第2報 分げつにおける分枝根の生育. 日作紀 57: 19—25.
13. 川島長治 1988c. 水稻の根系形成に関する研究. 第3報 根の数, 長さ, 体積, 表面積の推移. 日作紀 57: 26—36.
14. 川田信一郎・山崎耕字・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着目した場合の一例. 日作紀 32: 163—180.
15. 川田信一郎・副島増夫 1974. 水稻における“うわ根”の形成過程, とくに生育段階に着目した場合の一例. 日作紀 43: 354—374.
16. 川田信一郎・片野 学 1976. 水稻冠根の土壌における伸長方向について. 日作紀 45: 471—483.
17. 川田信一郎・片野 学・山崎耕字 1980. 水稻冠根の伸長方向角度および屈地性について. 日作紀 49: 301—310.
18. 木戸三夫・武舎武夫 1954. 通気と水稻の生育特に根の形態及び呼吸との関係. 日作紀 23: 16—20.
19. 小松良行 1959. 水稻の出葉および節間伸長と根の発育との関係について. 日作紀 28: 20—21.
20. 間脇正博・森田茂紀・菅 徹也・岩田忠寿・山崎耕字 1990. 幼穂形成期から出穂期にかけての遮光処理が水稻の根系の形成および収量に及ぼす影響. 第1報 根長密度に着目した場合. 日作紀 59: 89—94.
21. 森 敏夫 1954. 水稻根の生態的特性に関する研究. 東北大学農研彙報 8: 265—282.
22. 森 敏夫 1956. 乾田と湿田に於ける水稻根系の比較. 日作紀 25: 42.
23. 森本 勇 1940. 陸稻の根に就いて. 日作紀 12: 233—242.
24. 森田茂紀・山崎耕字・川田信一郎 1983a. 水稻冠根の伸長方向と組織構造との関係. 日作紀 52: 551—554.
25. 森田茂紀・山崎耕字・川田信一郎 1983b. 水稻冠根の伸長方向と通導機能との関係. 日作紀 52: 562—566.
26. 森田茂紀・岩淵 輝・山崎耕字 1986. 水稻1次根の伸長方向と粒重との関係—窒素施用量を変えた場合—. 日作紀 55: 520—525.
27. 森田茂紀・根本圭介・山崎耕字 1987. 水稻1次根の直径と伸長方向との関係—種々の条件における場合—. 日作関東支部報 2: 33—34.
28. 森田茂紀・岩淵 輝・山崎耕字 1987. 水稻茎葉部の生育と1次根の伸長方向との関係. 日作紀 56: 530—535.
29. Morita, S., T. Suga, Y. Haruki and K. Yamazaki 1988. Morphological characters of rice roots estimated with a root length scanner. Jpn. J. Crop Sci. 57: 371—376.
30. 森田茂紀・菅 徹也・山崎耕字 1988. 水稻における根長密度と収量との関係. 日作紀 57: 438—443.
31. Morita, S., T. Suga and K. Nemoto 1988. Analysis on root system morphology using the root length density model. II. Examples of analysis on rice root systems. Jpn. J. Crop Sci. 57: 755—758.
32. 森田茂紀・山崎耕字 1990. 根系. 松尾孝嶺編 稲学大成 第一巻 形態編. 農文協, 東京. 120—142.
33. 森田茂紀 1992. 水稻の1次根の伸長方向—1次根の出現位置に着目した解析例—. 日作紀 61(別1): 242—243.
34. Morita, S., S. Thongpae, J. Abe, T. Nakamoto and K. Yamazaki 1992. Root branching in maize. I. “Branching index” and methods for measuring root length. Jpn. J. Crop Sci. 61: 101—106.
35. Morita, S. and H. Okuda 1992. Root system development of wheat with special reference to branching. Abstracts of the First International Crop Science Congress, 14—22 July 1992, Iowa State Center, Ames, Iowa, USA. 74.
36. 森田茂紀・山崎耕字 1992. 光条件が水稻1次根の伸長方向に及ぼす影響. 日作紀 61: 689—690.
37. 森田茂紀・根本圭介 1993. 水稻1次根の空間的分布を評価するための方法. 日作紀 62: 359—362.
38. 森田茂紀・山田章平・阿部 淳 1994. 形態学的視点から見たイネの多様性. 第7報 根系形態における品種間差異の形成過程. 日作紀 63(別1): 214—215.
39. 森田茂紀 1994a. 植物の根に関する諸問題 [13]—水稻の根系形成を考える場合の視点 (1)—. 農及園 69: 933—938.
40. 森田茂紀 1994b. 植物の根に関する諸問題 [14]—水稻の根系形成を考える場合の視点 (2)—. 農及園 69: 1031—1036.
41. 根本圭介・山田章平・中川淳也・阿部 淳・森田茂紀 1992. 形態学的視点から見たイネの多様性. 第2報 要素の形態に着目した品種の位置づけ. 日作紀 61(別2): 163—164.
42. 根本圭介・中川淳也 1994. 形態学的視点から見たイネの多様性. 第5報 ファイトマーの形態の品種間差異. 日作紀 63(別1): 210—211.
43. Oyanagi, A., T. Nakamoto and S. Morita 1993. The gravitropic response of roots and the shaping of the root system in cereal plants. Environ. Exp. Bot. 33: 141—158.
44. Oyanagi, A., T. Nakamoto and M. Wada 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.
45. 佐藤健吉 1937. 水稻の根の発育に就て. 朝鮮総督府農試彙報 9: 357—378.
46. 佐藤健吉 1938. 水稻の根の発育に及ぼす肥料の影響. 朝鮮総督府農試彙報 9: 475—492.
47. 菅 徹也・山崎耕宇 1988. 水稻の生育に伴う根の量的形質の変化および根量と葉の量との生長相関. 日作紀 57: 671—677.
48. Suga, T., K. Nemoto, J. Abe and S. Morita 1988. Analysis on root system morphology using the root length density model. I. The model. Jpn. J. Crop Sci. 57: 749—754.
49. 丁 主一 1993. 水稻の根に関する研究 (第1報). 農及園 8: 109—118.
50. 丁 主一 1937. 水稻の根に関する研究 (第2報). 農及園 12: 830—838.
51. 山川 寛・岸川英利 1957. 暖地における水稻の栽培時期に関する研究. III. 地下部の発達, 水田土壌の温度及び酸化還元電位に及ぼす栽培時期の影響. 佐賀大農彙報 5: 41—96.
52. 山崎耕宇 1978. 水稻冠根の生育を観察するための“葉ざし”法について. 日作紀 47: 440—441.
53. 山崎耕宇・片野 学・川田信一郎 1980. 水稻1株の根群を構成する伸長した冠根数と穂数との関係. 日作紀 49: 317—322.
54. 山崎耕宇・森田茂紀・川田信一郎 1981. 水稻冠根の伸長方向と直径との関係. 日作紀 50: 452—456.