

## 根径に着目した水稻根系の形態解析

有馬進<sup>\*1)</sup>・最所一雅<sup>1)</sup>・原田二郎<sup>2)</sup>

(<sup>1)</sup>佐賀大学・<sup>2)</sup>大阪府立大学)

**要旨**：根径に着目した根系形態の解析方法を新たに考案し、水稻品種ヒノヒカリの根系形成経過を調査するとともに、出穂期における40品種の根系形態を比較した。解析に当たっては、まず根系の形態を画像化し、そのデータを用いてパイプモデル理論に基づいた根系の「仮想パイプ」を作成した。次に、その仮想パイプを基にして根径階級毎の根体積分布図を作成し、根体積の分布の中央となる根径値を示す「平均根径指数」を算出した。また、幼穂形成期以降において、同分布図でみた根系が太根群と細根群とに分かれたので、全根体積に占める細根群の体積割合を示す「細根率」、ならびに各根群の根体積分布の中央の根径値を示す「太根根径指数」と「細根根径指数」を指標として利用して解析した。その結果、生育に伴う水稻の根体積の増加パターンが明らかとなり、根径と根体積から見た根系構造を捉えることができた。すなわち、ヒノヒカリの根系は約0.4 mmの根径を境界階級とし、主として冠根からなる太根群と主として側根からなる細根群に二分され、各根群ともに根体積が最も多い特定の根径階級が存在して、それら二つの根径階級および境界となる根径階級は、幼穂形成期以降においてより顕在化することが明らかとなった。また、根体積の根径階級別分布を特徴づける平均根径指数、太根根径指数と細根根径指数、および細根率は、根系の生育に伴う変化や品種間差異を示す指標となると考えられた。

**キーワード**：画像解析，根系，根径，根体積，水稻，パイプモデル，品種間差異。

作物根系の形態の解析方法については、従来から多くの議論がなされてきた（河野・山内 1996，田中 1974，山内 1993）。しかし，森田（1994）が指摘したように，根系を捉える視点が十分に確立されてきたとは言えず，根量・形態・分布及び機能に関するデータを統一的に理解して根系の全体像を描くまでには至っていない。筆者らは，主根型根系を持つダイズの根量と形態を一括して把握するために，根系が樹枝状を示すことに着目して樹木の材積量を推定する樹形のパイプモデル（Shinozaki et al. 1964）の応用を検討した（田中ら 1990，1992）。その際，根径階級別の根体積値を基に高さ一定の架空の円盤を作り，細い根の円盤から順次積み上げて仮想の円柱を作成し，それを根系の「仮想パイプ」と呼び，パイプモデルへの適合性をみた（田中ら 1994）。その結果，ダイズ根系が大きく二つの部分に分けられることを明らかにした。すなわち，茎に連続する主根や肥大した低次位の分枝根などパイプモデルで言うところのパイプ部，ならびに，パイプモデルに当てはまらない細根部である。また，パイプ部と細根部は一定の比率を保ちながらも生育条件に応じて多様に変化することを報告した（有馬ら 2000）。一方，ひげ根型根系を持ついくつかのイネ科作物や雑草類についても根系の「仮想パイプ」を作成したところ，パイプモデルにおけるパイプ部に相当する根がなく，ひげ根型根系は同モデルに当てはまらないことが示唆された（有馬ら 1996）。しかし，ひげ根型根系の「仮想パイプ」の形状は，冠根や側根など根径の異なる根の量を反映しており，根系全体の形態の特徴を示すことができた（有馬・森田 1997）。そこで，本報では，根径の側面から水稻の根系構造を捉える新たな視点を得るために，根径階級別の根量を的確に示すことのできる「仮想

パイプ」を解析手法として用いて根系の形成経過を追い，また，根系形態の品種間差異を解析した。その際，「仮想パイプ」が示す根径階級別の根量分布状態をより把握しやすくするために，根の太さの指標値をいくつか考案して解析に用いた。また，本報では「仮想パイプ」の片断面図を便宜的に「ルートモデル」と呼んで解析に利用した。

水稻根系の形態に関する研究は，今日まで藤井（1961）が明らかにした節の形成に伴う規則的な根の生育パターンに基づいて行われたものが多く，根径に関わる詳細な解析も同様の視点から部分的には進められてきた（川島ら 1973，川島 1988 a, b, c，川田・芝山 1966，川田・副島 1974，川田ら 1977，川田・松井 1979，川田ら 1980，森田ら 1995，1997，佐々木ら 1983，寺島ら 1987）。本報は，これらの既往の研究とは視点を換え，水稻根系を発生要素毎にみた個根の側面からではなく，異なる根径を持つ個根の集合体として概括的に捉えようとしたものである。

### 材料と方法

#### 1. ルートモデルによる根系の发育形態の解析

##### (1) 生育に伴うルートモデルの形状変化の解析（実験1）

1999年6月17日，品種ヒノヒカリの22日苗を，水稻育苗用培土（九州MSC社製）を充填したプラスチックポット（上径18 cm 下径14 cm×高さ17 cm：土壌深15 cm）に，各1本移植して湛水栽培し，移植直後から穂揃期まで10日毎に計9回，各3株ずつ採取した。

施肥は佐賀県の平坦部で栽培されるヒノヒカリに準じて行った。湛水栽培は湛水したコンクリート畔水田においてポットを20 cm×30 cmの間隔で配置し，ポットの土表面が1~2 cmの沈水状態になるように水位を調節した。ま

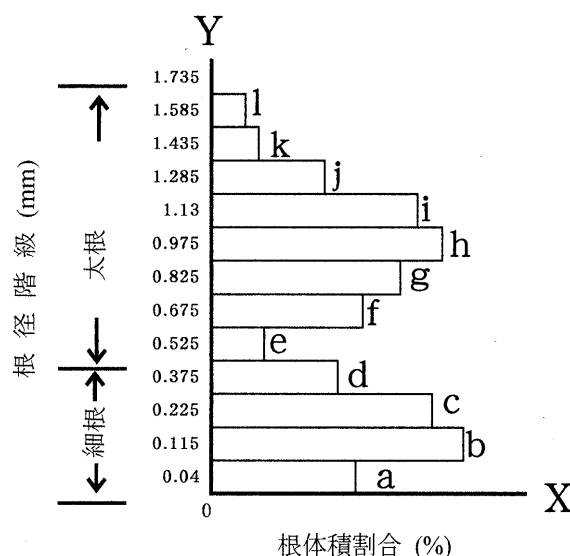
た、水温の過上昇を防止するために、午前9時から午後5時までの8時間に亘り農業用水路の水を掛け流した。

採取稲株については、地上部の諸形質を測定した。根系は除泥して、4%ホルマリンで固定の後、茎部から切り離して2 cm 毎に裁断して根の短材としクリスタルバイオレットで黒紫色に染色した。その後、水道水を5 mm の深さに溜めた透明ガラストレイ (50 cm×33 cm) に浮遊させ、根が重ならないように留意して完全に展開させた。ガラストレイに展開した根の形状は画像処理ソフト (EPSON TWAIN Pro) とイメージスキャナ (EPSON GT-8000, 300 dpi, 256 グレイ階調) を用いて画像データ化した。木村 (1998) が開発した根系用画像解析ソフト (NIH-image 使用) を用いて根径階級別の根体積を求めた。その場合、根径階級幅は、画像解析ソフトの設定に準拠して第1階級が0~0.08 mm, 第2階級が0.081~0.15 mm, 第3階級以上が各0.15 mm 幅とした。それらの値を基にして既報 (田中ら 1994) に準じて作成した「仮想パイプ」の片断面を「ルートモデル」として図示した。さらに、「仮想パイプ」を基に、根系の総根体積に対する根径階級毎の根体積割合 (%) を示した「根径階級別根体積割合」図を作成した。また、同図における根体積の分布の中央値を知るための指標として根径階級別の根体積割合により重み付けした平均根径値を算出し、その値を「平均根径指数」と呼んだ (第1図)。さらに、実際の根径階級別根体積割合の分布が第1図のように約1 mm と約0.15 mm の根径階級に山をもった双頂分布となり、0.4 mm 付近の根径階級がその谷に当たったことから、その谷の根径階級を境として太根群と細根群に分け、太根と細根の両根群についても根体積で重み付けした平均根径値を算出し、それぞれ「太根根径指数」と「細根根径指数」と呼んだ。また、全根体積に占める細根群の体積割合を算出し「細根率」と呼んだ。その場合、谷に当たる根径階級の根体積は太根群に算入した。

なお、画像解析に供した1株当たり根量は、ヒノヒカリの移植後30日目までが1株全根、40日目と50日目が約1/2株、60日目が約1/4株、70日目と80日目が約1/8株であった。1/2~1/8株根量を部分採取する際には、除泥した株を割り開いて分げつ茎構成が偏らないようにランダムに茎を取り出して根を切り離した。解析値は根乾物重を用いて1株当たりに換算した。また、水稻の根系は登熟期でも生長を継続し得る (川田・副島 1974) が、本報では出穂期 (移植後80日目) を根系の完成時期とみなした。

## (2) 冠根軸と側根の根径階級別分布の解析 (実験2)

実験 (1) の「根径階級別根体積割合」 (第1図) では境界階級を便宜的に設定して根系を太根群と細根群に分けたが、実験 (2) では冠根 (茎から発生した1次根軸のみを指す) と側根 (冠根から分枝した2次根ならびにそれ以上の高次根を総称する) を区別して、その根径階級別根体積分布を明らかにすることで、太根群内における冠根と細根



第1図 水稻の根径階級別根体積割合図 (概念図)

- 1) 1株の総根体積を100として各根径階級の根体積割合をa~l (%) で示した。図中の各根径階級の代表値 (数値) は、NIH-imageにより表示された各根径階級幅の中央値とした。また、根群を0.4 mm 付近に現れる双頂分布の谷となる根径階級を境に太根群と細根群に分けた。

- 2) ‘平均根径指数’、‘太根根径指数・細根根径指数’および‘細根率’の算出法: 平均根径指数は、根径階級別根体積割合を基に、各根径階級の中央値と根体積割合 (%) から①式により算出した。太根群と細根群の各平均根径階級値を示めす太根根径指数と細根根径指数および細根率は②式、③式、④式により算出した。

平均根径指数 (mm) =  $(0.04a + 0.115b + \dots + 1.435k + 1.585l) \div 100 \dots \dots \text{①式}$  (但し、 $a+b+\dots+k+l=100$ ),

太根根径指数 (mm) =  $(0.525e + 0.675f + \dots + 1.435k + 1.585l) \div 100 \dots \dots \text{②式}$  (但し、 $e+f+\dots+k+l=100$ ),

細根根径指数 (mm) =  $(0.04a + 0.115b + 0.225c + 0.375d) \div 100 \dots \dots \text{③式}$  (但し、 $a+b+c+d=100$ ),

細根率 (%) =  $(\text{細根体積} : a+b+c+d) \div (\text{全根体積} : a+b+\dots+k+l) \times 100 \dots \dots \text{④式}$ , なお、①~④式中の数字は各根径階級の中央値であり、本文中で用いた「最頻階級」、「境界根径」、「最太根径階級」は、それぞれ、第1図中のh・b, e, lに相当する。

群内における側根の根体積割合 (占有率) を求めることとした。そのために冠根と側根との画像データを分離して解析し、それぞれの根径階級別根体積分布を調査した。

すなわち、2000年6月20日、品種ヒノヒカリの23日苗を、水稻育苗用培土 (九州MSC社製) を充填したプラスチックポット (上径18 cm, 下径14 cm×高さ17 cm: 土壌深15 cm: 底穴直径1.5 cm) に、各1本移植した。水深約5 cmに湛水したプランター (長さ60 cm×幅20 cm×深さ18 cm) に各3ポットずつ入れて野外に設置した。移植直後から出穂期まで10日毎に計8回、各2株ずつの根系を採取した。施肥は佐賀県の平坦部に栽培されるヒノヒカリに準じて行った。水管理については、プランター内に水がなくなった場合に所定量補給した。

採取した根系は、除泥・固定の後、茎部から切り離さず

第1表 根系諸形質の推移 (ヒノヒカリ)。

移植後日数	葉齢	茎数(本)	根長(cm)	根表面積(cm <sup>2</sup> )	根体積(cm <sup>3</sup> )
1	3.6	1	99 (0.02)	5.9 (0.04)	0.04 (0.1)
10	6.2	1	298 (0.1)	13.4 (0.1)	0.09 (0.1)
20	8.1	2	2296 (0.4)	76.9 (1)	0.50 (1)
30	9.7	5	10613 (2)	381.5 (3)	3.59 (4)
40	11.3	14	43679 (8)	1590.7 (11)	16.12 (17)
50	11.9	22	168335 (30)	4916.3 (34)	38.62 (42)
60	13.6	24	312051 (55)	11019.0 (76)	77.24 (83)
70	15.0	24	518379 (92)	13618.5 (94)	90.03 (97)
80	15.0	24	564734 (100)	14502.4 (100)	92.80 (100)

各数値は3個体の平均値。( )内の数値は移植後80日目の値を100とした場合の相対値で、本文中では形成率と呼んだ。

にクリスタルバイオレットで黒紫色に染色し、実験(1)で使用した透明ガラストレイに展開させた。その際、茎基部で冠根を切り離して切断部の位置を確認した。根の形状は実験(1)と同様に画像化した。また、根系画像中から冠根の画像のみを抽出するために、根を画像化する際に冠根を確認し、冠根と側根の画像データを区別して処理した。

画像解析に供した1株当たりの根量は、移植30日目までが1株全根、40日目と50日目が約1/2株、60日目が約1/4株、70日目が約1/8株であった。サブサンプリングで株を縦割りして分割する際には、出根しているすべての節位の根が含まれるように留意した。

## 2. ルートモデルからみた根系形態の品種間差異の解析 (実験3)

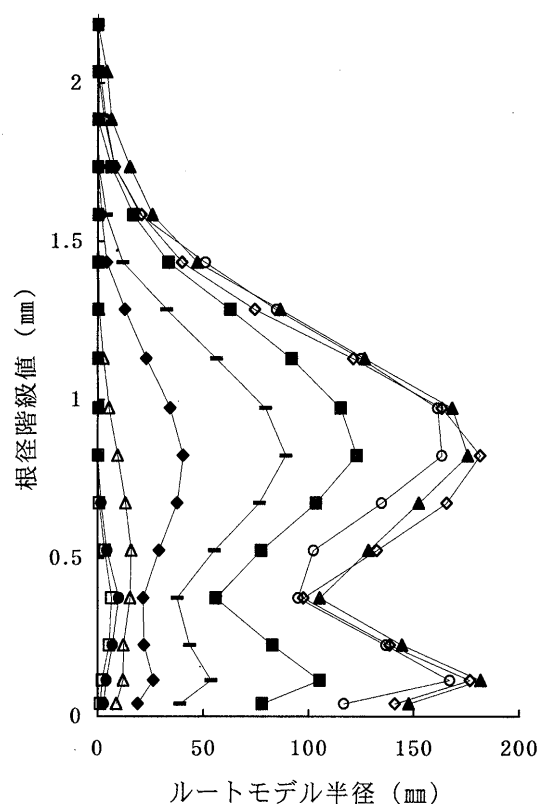
1999年6月4日に任意に選んだ水稻40品種(第4表)の18日苗を、実験(1)と同様の方法でポット栽培し、品種毎に出穂期に3株ずつ採取した。また、採取した稲株の地上部と根系の調査と画像解析は実験(1)と同様に行った。画像解析に供した1株あたりの根量は各品種とも約1/8株であった。解析値は根乾物重を用いて1株当たりに換算した。

## 結 果

### 1. ルートモデルによる根系の発育形態の解析

#### (1) 生育に伴うルートモデルの形状変化 (実験1)

1999年の7月、8月は平年より低温・寡照(注:平成11年度佐賀県気象月報, 佐賀地方気象台)であったために、ヒノヒカリの生育は地上部・根系ともに遅延した。また、根系は、ポット栽培で根域が制限されたために小型となったが、その生長は川島(1988c)の報告とほぼ同様の経過を示した(第1表)。すなわち、穂揃期における根長や根体積など根量を示す形質の値を100%とすると、幼穂形成期以前(移植後40日目)におけるそれぞれの形質はいずれも20%に満たず、幼穂形成期から穂揃期にかけて旺盛



第2図 生育に伴うルートモデルの変化 (ヒノヒカリ)。

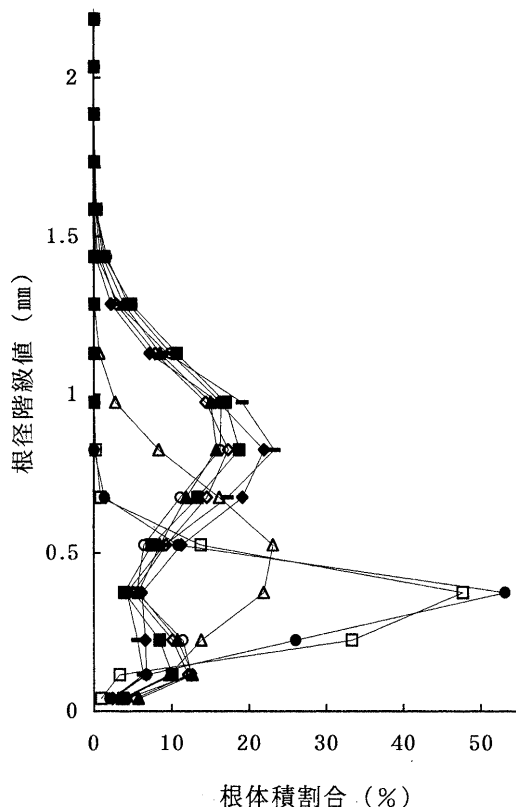
□, 移植後1日目; ●, 10日目; △, 20日目; ◆, 30日目; —, 40日目; ■, 50日目; ○, 60日目; ◇, 70日目; ▲, 80日目。

な増加を示した。その場合、根体積、根表面積、根長の順に早く増加した。

移植時から穂揃期までの9つの時期のルートモデルを重ね、生育に伴う根径階級別の根体積の推移を示した(第2図)。根径階級別に根体積の増加経過をみると、移植後20日目までは0.3~0.5 mmの根径階級を中心として増加し、ルートモデルは単頂型を示したが、分けつ茎の発生とその生長が盛んになった30日目以降80日目までは0.4 mm付近の階級の増加が鈍り、その上下の0.75~0.9 mmと0.15~0.3 mmの2つの根径階級で旺盛な増加がみら

れた。そのため、穂揃期のルートモデルは双頂型を示し、根径からみた根系が太根群と細根群とからなることがわかった（以後、ルートモデルにおける根径階級の山部分を最頻階級、谷部分の根径階級を境界階級と呼ぶ）。なお、ルートモデルにおいて、いずれの時期でも根径階級の最も大きい部分の根体積が他の階級に比べて少ないことから、水稻ではダイズなど主根型根系の「仮想パイプ」（田中ら 1994）で見られるパイプ部に当たる部分が存在しないことが示された。

次に、根系がどのような太さの根で成り立ち、また、その根体積の構成割合が生育に伴ってどう変化するかを詳しく



第3図 根径階級別根体積割合の変化（ヒノヒカリ）。

□, 移植後1日目; ●, 10日目; △, 20日目; ◆, 30日目;  
—, 40日目; ■, 50日目; ○, 60日目; ◇, 70日目; ▲, 80日目。

くみるために、10日毎の根径階級別の根体積割合を重ねたところ（第3図）、最も太い根径階級は、藤井（1961）が節位別冠根の根径について示したように、移植時から順次増大する方向に変化し、約1.5 mmに達した。移植後1日目と10日目は、0.3~0.45 mmの太さの根が根体積の約50%を占め、20日目には1 mm前後のやや太い根と0.15 mm以下の微細な根の発生・増加により根径幅が広がり、最頻階級の根体積割合は約20%まで急減した。移植後30日目以降は、太い冠根の発生により0.75~0.9 mmを最頻階級として太根群が増加し、やや遅れて0.3 mm以下の微細根の発達に伴って細根群の増加が加速したことにより、根径構成の様相が単頂型から双頂型へと一変した。また、その後穂揃期までは、双頂型の根径構成を維持しながら太根群の割合が漸減し、細根群の割合が漸増した。また、0.4 mm前後が境界階級となった太根群と細根群の根体積の割合の変化を知るために算出した細根率（細根群体積/総根体積：%）は、移植後30日から穂揃期までに約15%から約30%まで増加した（第2表）。

太根根径指数は、0.8 mm前後で推移し、幼穂形成前期までは増加し、出穂期にかけてやや減少した。一方、細根根径指数も移植後30日目から0.14 mmとなった。これらの指数値の推移は太根群と細根群の最頻階級の動きにほぼ一致しており、生育後半は両根群の根体積が増減しても変化が小さかった。したがって、これら二つの指数値は、分けつ期以降の根系形態を特徴づける根径値であった。さらに、根系全体の根径階級別の分布状態を総合した指標となる平均根径指数は、生育初期から播種後40日目（幼穂形成期直前）まで増加し、その後徐々に低下して穂揃期に約0.63 mmとなった。このような平均根径指数の推移は、生育前半における冠根の発根と伸長や、生育後半における細根群の増加を反映したものであった。

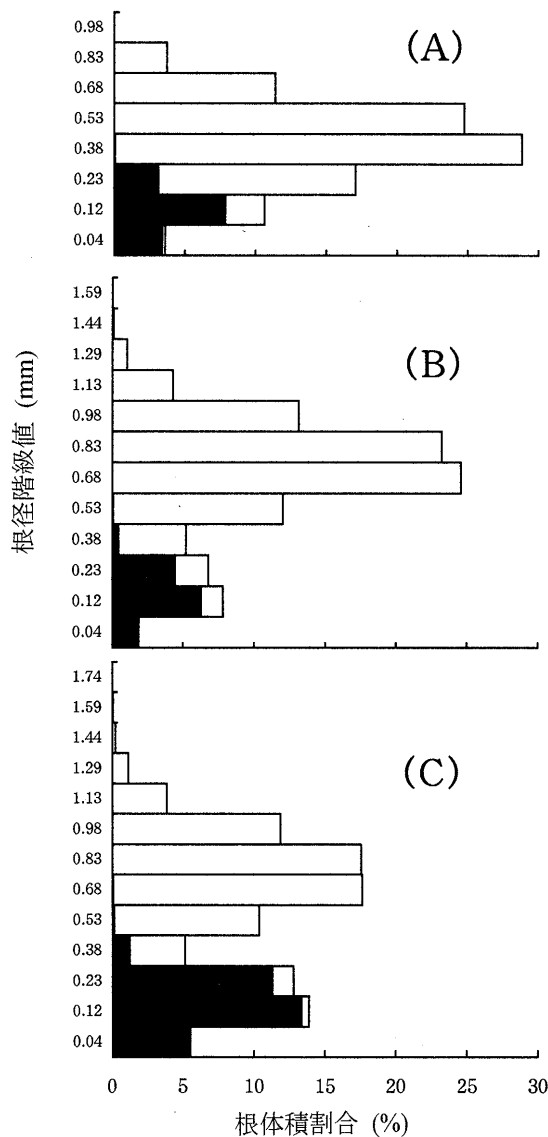
## (2) 太根群と細根群における冠根と側根の量的割合（実験2）

移植後10日目、30日目、70日目の3つの時期について、冠根と側根の各根径階級別の根体積分布割合を第4図に示した。1の（1）で述べたのと同様に、根径階級別の

第2表 生育に伴う根系形態の指標値の変化（ヒノヒカリ）。

移植後日数	平均根径指数(mm)	細根根径指数(mm)	太根根径指数(mm)	細根率(%)
1	0.339 ± 0.002	—	—	—
10	0.337 ± 0.003	—	—	—
20	0.488 ± 0.026	—	—	—
30	0.686 ± 0.006	0.149 ± 0.004	0.787 ± 0.006	15.7 ± 0.9
40	0.732 ± 0.041	0.146 ± 0.001	0.827 ± 0.026	14.2 ± 3.0
50	0.705 ± 0.017	0.143 ± 0.001	0.866 ± 0.010	22.3 ± 2.0
60	0.661 ± 0.036	0.148 ± 0.001	0.861 ± 0.035	28.1 ± 1.5
70	0.631 ± 0.030	0.141 ± 0.001	0.816 ± 0.029	27.5 ± 1.8
80	0.634 ± 0.031	0.141 ± 0.003	0.836 ± 0.015	29.1 ± 3.1

平均値±標準偏差。各指標の内容と算出方法は第1図の説明を参照。各指数の単位はmm。



第4図 生育に伴う冠根と側根の根体積割合の変化 (ヒノヒカリ)。  
□, 冠根; ■, 側根。(A), 移植後10日目; (B), 移植後30日目; (C), 移植後70日目。

根体積分布は、移植後10日目では、冠根が細いことと側根が未発達であるために冠根が大半を占める単頂型を示した。また、双頂型に移行した直後の移植後30日目では、細根群にもかなりの割合で冠根が存在した。しかし、出穂期(移植後70日目)では太根群は冠根により、細根群も側根により、それぞれ大部分が占められた。その場合、第4図では太根群と細根群の境界階級を中心としてその上下の約0.5 mmに及ぶ根径階級において、冠根と側根の根体積の分布の重なりが確認できた。そのために第1図に示した方法で算出した太根根径指数は、大部分の冠根と境界階級より太い側根の分布の中心となる根径階級を、また、細根根径指数は、大部分の側根と境界階級以下の細い冠根の分布の中心となる根径階級を示すことが分かった。そこで、生育に伴う冠根と側根の根径の分布階級、太根群内の冠根の占有率および細根群内の側根の占有率を第3表に示した。太根群は双頂型に移行した初期から冠根の根体積が100%に近い割合で占有したのに対し、細根群では側根の割合が約75%から徐々に高まって最終的に93%に達した。したがって、出穂期における太根根径指数と細根根径指数は、それぞれ冠根と側根のみの根径階級別の根体積分布のほぼ中央の根径値を示すことができた。

## 2. 根系形態の品種間差異 (実験3)

穂揃期における各供試品種の地上部ならびに根系の生育量には大きな差異が認められた。すなわち、1株の地上部乾物重については35.5 gから89.3 g、根体積については36.8 cm<sup>3</sup> (紫高野坊主) から180.5 cm<sup>3</sup> (Star Bonnet) の開きが生じた(第4表)。ルートモデルは、すべての品種でヒノヒカリとほぼ同様の双頂型を呈したが、その形状の細部に品種間差異が認められた。その事例として4品種のルートモデルを示した(第5図)。それぞれの形状の相違点は、最も太い根が含まれる最上位の根径階級をはじめとして太根群と細根群の各最頻階級に認められた。

第3表 冠根と側根の太根群と細根群における根体積占有率 (ヒノヒカリ)。

移植後日数	冠根		側根	
	根径範囲(mm)	占有率 <sup>1)</sup> (%)	根径範囲(mm)	占有率 <sup>2)</sup> (%)
1	0~0.90	99	0~0.30	—
10	0~0.90	89	0~0.45	—
20	0~1.51	99	0~0.60	74
30	0~1.81	99	0~0.90	76
40	0~1.66	98	0~0.90	84
50	0~1.66	97	0~1.05	86
60	0~1.66	97	0~0.90	91
70	0~1.66	98	0~1.05	93

1) 太根群における冠根の占有率, 2) 細根群における側根の占有率。ルートモデルは移植後30日目以降に双頂型となった。各数値は2個体の平均値。

第4表 水稻品種の根体積と根の太さに関する指標値。

品種名*	平均根径指数 (mm)	細根根径指数 (mm)	太根根径指数 (mm)	細根率 (%)	根体積 (cm)	根長/根重比 (m/g)	地上部乾重 (g)
Aurinaldola	0.896	0.216	1.221	37.5	136.6	641	75.6
Lemont	0.895	0.232	1.354	41.0	125.3	854	48.3
Star Bonnet	0.874	0.257	1.225	36.3	180.5	524	75.6
Rohtjan	0.784	0.203	1.220	33.0	123.7	540	75.6
雄町	0.731	0.150	0.899	22.6	144.0	679	70.7
Jave-14	0.714	0.148	0.896	24.3	146.0	721	78.1
寿	0.709	0.143	0.915	26.7	93.9	909	58.6
千秋楽	0.704	0.146	0.920	28.4	79.4	865	47.9
亀治	0.697	0.150	0.892	26.3	138.0	731	77.5
Danahira	0.675	0.151	0.913	31.3	135.1	635	84.6
奥羽331号	0.660	0.139	0.870	29.5	79.8	1052	43.9
宝	0.649	0.145	0.825	25.9	128.0	743	66.3
レイメイ	0.647	0.134	0.860	30.3	77.0	1095	39.2
Dvdh-rai	0.645	0.143	0.861	30.0	127.0	960	88.3
新青矮1号	0.642	0.159	0.902	28.9	114.2	1127	53.7
Bansen 26	0.638	0.148	0.874	32.7	147.7	715	80.8
ヒノヒカリ	0.634	0.141	0.836	29.1	92.8	950	55.8
農林37号	0.633	0.144	0.824	28.0	126.8	891	82.3
Tetep	0.632	0.146	0.809	26.7	96.1	672	89.3
太白	0.632	0.137	0.908	35.9	98.4	1189	65.0
北陸147号	0.631	0.145	0.871	33.1	119.5	908	70.6
朝日	0.627	0.147	0.813	29.1	114.8	874	65.9
青稈黄	0.626	0.141	0.896	35.7	105.4	1083	57.8
旭	0.625	0.142	0.819	29.2	111.8	894	51.0
Nerovialene	0.619	0.143	0.843	32.1	148.9	1002	58.7
IR24	0.616	0.169	0.937	40.1	125.4	884	62.8
日本晴	0.610	0.147	0.844	33.6	97.3	923	50.7
アケボノ	0.607	0.145	0.778	27.2	118.7	698	69.7
農林6号	0.606	0.146	0.806	30.2	101.6	902	42.9
石川12号	0.603	0.144	0.846	34.8	86.6	1108	59.1
マンリョウ	0.599	0.148	0.816	32.5	119.4	1028	50.1
13-13	0.599	0.137	0.825	32.9	123.8	956	66.0
撰一	0.591	0.145	0.774	29.2	116.2	827	63.4
キヌヒカリ	0.575	0.135	0.789	32.7	88.2	1182	58.0
清水もち	0.566	0.141	0.775	33.2	74.5	1031	51.5
統一	0.551	0.146	0.790	37.1	97.4	1044	62.8
Had sadri	0.548	0.143	0.813	39.5	113.0	989	50.8
農林8号	0.546	0.140	0.770	35.6	77.1	1043	56.3
矮稻C	0.505	0.137	0.712	36.0	51.1	1205	57.9
紫高野坊主	0.503	0.108	0.617	20.6	36.8	719	35.5
LSD(0.01)	0.080	0.015	0.073	7.4	31.6	196	13.8

※：品種は平均根径指数の高いものから順に並べた。各指標の内容と算出方法は第1図の説明を参照。数値は3個体の平均値。

Lemont は供試品種中では平均根径指数、太根根径指数が高い品種であり、最上位根径階級が2 mmを超えており、太根群の最頻階級ならびに太根群と細根群の境界階級も0.7 mm前後と太かった。また、供試品種中で最も細い根系の品種となった紫高野坊主は、細根群の最頻階級以外の全ての階級値が他品種より下回り、根系全体が一様に細い根であることが示された(第5図A)。一方、太根群と細根群の量的割合にも品種間差異が認められ、IR 24では太根群に対する細根群の根量の割合が、他の品種より多かった(第5図B)。

各品種のルートモデルの形状を比較するために、根径階級別の根体積割合を基に算出した各指標を第4表に示した。まず、太根根径指数は最小0.617 mm(紫高野坊主)から最大1.35 mm(Lemont)までに約0.7 mmの大きな開きがあり、AurinaldolaやLemontなど外国稲で1 mm以上の極太の冠根を持つ品種群、0.8 mm台の平均的な太さの冠根を持つ日本稲品種群や0.7 mm前後の細い冠根の品種群など、供試品種がいくつかの品種群に分かれるこ

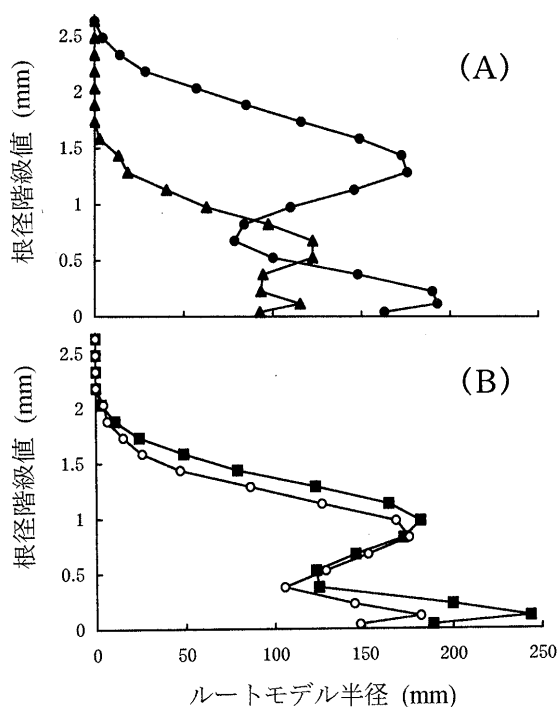
とを示した。一方、細根根径指数は0.108 mm(紫高野坊主)から0.257 mm(Star Bonnet)までの狭い範囲で変異し、太根根径指数が最も高かった品種群が0.2 mmを上回り、それら以外の大半の品種で0.14 mm付近となった。このように太根根径指数と細根根径指数には、有意な品種差異が認められた。平均根径指数は、最細の0.503 mm(紫高野坊主)から最太の0.896 mm(Aurinaldola)まで0.39 mmの開きをみせて、供試品種が極細品種から極太品種までに分けられることを示した。細根群と太根群との体積割合を示した細根率には、21%(紫高野坊主)~41%(Lemont)の変異が認められ、細根の割合に品種間差異があることが分かった。最後に、根長/根重比(m/g)は、524(Star Bonnet)~1205(矮稲C)までと2倍以上の差異が認められた。

各指標と諸形質の関係をみたところ(第5表)、平均根径指数、太根根径指数、細根根径指数の三者間には正の相関関係が認められた。細根率と平均根径指数との間には相関関係が認められなかったが、細根根径指数および太根根径指数との間には、それぞれ有意な正の相関関係が認められた。このことは、細根群の根体積割合の高い品種では比較的太い側根が多いことを示し、それらの側根の母根となる冠根も太いことを示した。根体積は、いずれの指数との間にも有意な正の相関関係があったが、細根率とは関係が認められなかった。一方、根系を構成するすべての根の平均的な太さの指標とされている根長/根重比は、各指数と有意な負の相関関係を示した。また、根長/根重比は細根率と有意な正の相関関係を示した。なお、地上部重は各指標と有意な関係を示さなかった。

## 考 察

### 1. ルートモデルからみた根系の発育形態

水稻体は構造的に要素の積み重ねにより成り立っていると考えられるため、根系の発育形態は、本来「ファイトマーモデル」を利用して解析されるのが望ましい(林・澁澤1994, 森田 2000)。本報でもひげ根型的水稻根系の「仮想パイプ」に明確なパイプ部分が存在しないことを再確認したが、このことは水稻根系がパイプモデルに適合していない証であり本報での議論の基点である。したがって、ここでは「仮想パイプ」が水稻根系の発育形態のどのような情報を提供し得るかということが論点になる。



第5図 ルートモデルの形状比較例。

(A) 根径が大きく異なる事例, ●, Lemont; ▲, 紫高野坊主。(B) 太根群に対して細根群の根量が大きく異なる事例, ■, IR 24, ○, ヒノヒカリ。

第5表 各品種の根系形質と指標との相関係数。

	細根根径指数	太根根径指数	細根率	根体積	根長/根重比	地上部乾重
平均根径指数	0.847 **	0.931 **	0.115	0.590 **	-0.564 **	0.309
細根根径指数	—	0.919 **	0.452 **	0.565 **	-0.483 **	0.251
太根根径指数	—	—	0.414 **	0.532 **	-0.421 **	0.231
細根率	—	—	—	0.080	0.317 *	-0.083

\*\*, \* はそれぞれ1%, 5%水準で有意であることを示す。

周知の通り、水稻の根系形成が下位要素から上位要素へと順次進行するために、これまでの根系形成に関する研究の多くは、要素別に变化する個根に焦点を当て、その形態、生理活性、機能、分布、根量などを詳細に解析してきた(藤井 1961, 原田ら 1988 b, 川田 1982, 川島 1988 a, b, c, 河野ら 1972, 森田ら 1997, 王ら 1997)。一方、本報では、要素別の個根の詳細を示すのではなく、根の形態解析の際にこれまで論じられたことの少ない根体積に着目して根系全体の形成経過を追跡することによって、新たな側面から根系形成パターンをみた。その結果、ヒノヒカリの根系を構成する根は、根径約 0.4 mm を境として太根群と細根群とに二分され、各根群が特定の最頻階級を中心にその根体積を増加させ、両根群の境界階級及び各根群の最頻階級がいずれも変化が少ないことが示された。従前より冠根と側根の境界根径値は知られていたものの、本報のように冠根と側根とを区別した上で根系の量的な成立経過を明確に示すことのできた報告例は見られない。また、水稻根系に関する「太根群と細根群」という根径を基準とする分類と「冠根と側根」という発育形態の違いを基準とする分類が、ほぼ対応した形で把握できる可能性を示した。

本報の手法により、冠根のみ、あるいは側根のみの形態や諸量を解析することも可能であり、その必要性も高い。冠根の太さは、冠根長、2 次根の分枝程度などの根の形態を示す諸形質と関連し(森田 2000)、根量とも関係する(姜ら 1989) 形質であり、品種(長井・廣田 1958) および栽培条件(小倉 1956, 長井・俣野 1965) により変化する。また、地上部の支持力や冠根の伸長角度とも密接な関係にある(寺島ら 1987, 森田ら 1987, 山崎ら 1981)。これらの研究における冠根の太さは、冠根基部の一定部位の根径を測定したものである。一方、本報で作成したルートモデルの太根群が提供する冠根の情報は、すべての要素から出根した冠根の根径範囲を含み、それらの根径階級別根量を明らかにした。したがって、得られた情報は、冠根の伸長形状の特徴を示したものであり、冠根を根軸に沿った根径の推移により A, B, C の 3 つの型に分類した川田ら(1980)の研究と類似した冠根の形態解析を可能にするものである。また、ルートモデルでは、根体積を解析の主な対象とした関係上、これまでの根長を主とした解析法に比較して太い根ほどその存在が強調されているために、冠根の形態解析に適していると考えられる。なお、要素別の冠根の形態をみたい場合には、要素根毎にルートモデルを作成して解析に供することもできる。

一方、側根には、前述のように太い側根と細い側根の 2 種類あるが、側根における直径の大小は、側根の組織構造の差異に対応したものであり、冠根の根径や維管束数との間にも密接な関係が認められている(川田ら 1979)。また、側根群は主に養水分吸収を担うとされているために、側根群の根径階級別構成を詳細に把握することは形態と機

能の両面において重要である。著者らが実体顕微鏡下で根径分布を実測して作成したルートモデルでは、側根群内に複数のピークが生じることを観察したが(有馬ら 1996)、それらのピークと 2 次根・3 次根などの根の種類との対応関係を明示して解析を深めたいところである。そのためには、調査の測定・演算精度を向上させて根径階級幅の狭い詳細なルートモデルを作成する必要がある。

## 2. 根系形態の品種間差異

水稻根系の形態や機能の品種間差異をとりあげた研究(三本ら 1997, 長井・廣田 1958, 尾形・松江 1996, 寺島ら 1987) は必ずしも多くはない。今後益々重要性を増してくる水稻の多収栽培や各種ストレス条件下での水稻栽培を実現するためには、多くの品種の根系特性に関する情報の収集が望まれる。本報では、水稻品種のルートモデルと各指標により、冠根、側根、および根系全体でみた根の太さを比較検討したところ、それぞれに明確な品種間差異が認められ、本法が根径に関する品種間比較を可能とすることが示された。また、根径だけでなく根体積や根表面積を利用した品種比較も行えることから、従来の根径のみを対象とした調査に比べてより詳細で多面的な解析を可能にすると考えられた。

第 4 表に示した各品種の指標値からは、概して根の太い品種は根体積が多く、細根群の発達も良好である傾向が示唆された。また、供試品種中では外国稲に太い根のものが多かった。その際、根系形質に関わる指標間での比較検討を行ったが、本報で考案した各指数は、根系の平均的な根の太さの指標とされている根長/根重比と有意な相関関係を示し、根長/根重比と同様に根の太さの指標となることが示唆された。なお、これまでに行われた根の太さの比較検討においては、そのほとんどが冠根を対象にしたもの(長井・廣田 1958, 尾形・松江 1996, 寺島ら 1987) であるが、それらの報告では冠根基部の限られた部位が測定されているにすぎない。そのために、本報で得られた平均根径指数や太根・細根根径指数を用いてそれらとの比較検討はできないが、冠根軸が先端に向かって細ることを考慮すると、既往の研究における冠根の根径の情報を、ルートモデルの太根群の最上部の根径階級に限って比較することは可能かもしれない。

細根群と太根群の根体積比率を示した細根率は、品種間で 20% 程度の変動があり、1 株の総根体積と関係なく独立した動きをすることが示唆された。このことは、根系の形成過程において冠根の発生とそれに引き続き順次発生する分枝根の発育形態が品種間で異なることを示唆するものである。日印交雑品種と日本型品種では、冠根と側根の両者の発達程度の違いから幼穂形成期以降の根系の発達に差異があること(原田ら 1988 a, b) や、根量の増加戦略が品種によって異なること(原田ら 1994) が示されているが、この細根群と太根群の関係を示す細根率を検討に加えるこ



とでより詳しい考察が可能となるであろう。一方、細根率は、栽培条件の差異に伴う太根群と細根群の量的変動によっても大きく変化することが予測されるため、根系形態の可塑性(河野・山内 1996)の品種間差異の比較指標にもなり得ると考えられた。

以上のように、本報では、水稻根系の画像データを基にして根系形態の解析手法を検討したが、ここで示したルートモデルや根径階級別の根体積割合は、根径に焦点を当てて根系構造を解析する場合の有用な情報を提供するものであり、根系育種(佐藤 1997)の基礎資料にもなり得ると考えられる。今後は、画像から得られる根長、根表面積、根体積の基本的な形態的データに加えて根色(有馬・森田 1997)などの根の生理活性に関連するような項目をも取り込んだ解析手法の開発が望まれる。

**謝辞:**本研究を遂行するに当たり、東北大学の木村和彦博士には根系の画像解析法に関するご教授を賜った。また、九州農業試験場の山下正隆博士には貴重なご助言と調査機器の面でご支援を賜った。ここに記して感謝の意を表します。

## 引用文献

- 有馬進・田中弘子・河室恵一 1996. ルートモデルによる各種作物の根系構造の解析. 日作紀 65(別1): 210—211.
- 有馬進・森田康紀 1997. ルートモデルによる根系構造の解析とその応用例. 日作紀 66(別2): 273—274.
- 有馬進・原田二郎・浅沼修一・三原実 2000. パイプモデルからみたダイズ根系の生育特性. 日作紀 69: 95—101.
- 藤井義典 1961. 稲麦における根の生育の規則性に関する研究. 佐賀大学農学彙報 12: 1—117.
- 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.
- 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. 日作紀 57(別2): 89—90.
- 原田二郎・姜始龍・山崎耕宇 1994. 日印交雑稲における根系の形成. 第1報 1次根の形成数と伸長方向. 日作紀 63: 423—429.
- 林孝洋・澁澤栄 1994. 形態モデル, ファイトテクノロジー研究会編, ファイトテクノロジー—植物生産工学—. 朝倉書店, 東京. 96—98.
- 姜始龍・原田二郎・山崎耕宇 1989. 水稻における1次根ならびに分枝根の形態的諸性質間の相互関係. 日作紀 58(別2): 251—252.
- 川島長治・石原邦・小倉忠治 1973. 異なる生育段階に発根した水稻冠根の発育について. 日作紀 42: 197—206.
- 川島長治 1988a. 水稻の根系形成に関する研究. 第1報 主根における分枝根の生育. 日作紀 57: 8—18.
- 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.
- 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.
- 川田信一郎・芝山秀次郎 1966. 水稻冠根における2次根の分枝の様相. 日作紀 35: 59—70.
- 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.
- 川田信一郎・佐々木修・山崎耕宇 1977. 水稻の冠根および分枝根の基本的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: 569—579.
- 川田信一郎・松井重雄 1979. “葉ざし”法によって生育させた水稻冠根の直径等に及ぼす諸要因の影響. 日作紀 48: 131—138.
- 川田信一郎・森田茂紀・山崎耕宇 1979. 水稻冠根における導管および篩管の数について. 日作紀 48: 502—509.
- 川田信一郎・佐々木修・山崎耕宇 1980. 水稻根における分枝の様相, とくに冠根の直径と分枝との関係について. 日作紀 49: 103—111.
- 川田信一郎 1982. 水稻の根—その生態に関する形態形成論的研究—論文集. 農文協, 東京. 1—613.
- 木村和彦 1998. 画像解析による根長と根の直径の測定—その1. 実践編. 根の研究 7: 8—11.
- 河野恭廣・井桁正宏・山田記正 1972. 水稻種子根における側根群の発育生理学的研究. 日作紀 41: 192—204.
- 河野恭廣・山内章 1996. 根系の構造と可塑性. 山内章編, 植物根系の理想型. 博友社, 東京. 156—169.
- 三本弘乗・田村晶・鈴木浩之・大江真道・大門弘幸・山口俊彦 1997. 簡易調査法による水稻根系の品種間比較. 日作紀 66: 559—570.
- 森田茂紀・根本圭介・山崎耕宇 1987. 水稻1次根の直径と伸長方向との関係—種々の栽培条件における場合—. 日作関東支部報 2: 33—34.
- 森田茂紀 1994. 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—1035.
- 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・萩沢芳和・阿部淳 1997. ファイトマーの数と大きさに着目したイネの根系形成の解析—ポット試験による根量の品種間差の解析例—. 日作紀 66: 195—201.
- 森田茂紀 2000. 根の発育学. 東京大学出版会, 東京. 70—125.
- 長井保・廣田秀憲 1958. 根の特性からみた栽培品種. 日作紀 27: 217—220.
- 長井保・俣野敏子 1965. 水稻における側根発生に関する研究. (1) 栄養欠除条件における側根発生について. 日作紀 34: 256—259.
- 尾形武文・松江勇次 1996. 北部九州における水稻湛水直播栽培に関する研究. 第2報 幼苗期の冠根の太さによる耐倒伏性の評価方法. 日作紀 65: 502—508.
- 小倉忠治 1956. 陸稲に関する研究. 第4報 種子根の内部形態について. 日作紀 25: 154—156.
- 佐々木修・山崎耕宇・川田信一郎 1983. 水稻冠根の伸長に伴う直径の変動と2次根の出現密度との関係. 日作紀 52: 1—6.
- 佐藤雅志 1997. 植物の根に関する諸問題 [42] 栽培イネにみられる根系の遺伝的変異と栽培環境. 農及園 72: 57—61.
- Shinozaki, K., K. Yoda, K. Hozumi and T. Kira 1964. A quantitative analysis of plant form—the pipe model theory—I Basic analyses. Jpn. J. Ecol. 14: 97—105.
- 田中典幸 1974. 作物の根に関する研究. 日作紀 43: 291—316.
- 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.
- 田中典幸・原田二郎・有馬進・吉村映美 1992. パイプモデル理論に基づくダイズ根系の通導組織の量的解析. 日作九支報 59: 62—63.
- 田中典幸・三原実・有馬進・原田二郎 1994. ダイズ根系構造のパイプモデル適合性とその範囲. 日作紀 63: 63—67.
- 寺島一男・平岡博幸・西山岩男 1987. 稲における根の品種間差異. 第1報 冠根の形態の品種間差異. 日作紀 56: 521—529.

- 王余龍・新田洋司・姚友礼・山本由徳 1997. 水稻の根の生育に及ぼす窒素の施用時期および施用濃度の影響. 日作紀 66:588—595.
- 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.
- 山内章 1993. 植物の根に関する諸問題 [2]. 作物根系の構造とそれを構成する根の種類 (2). 農及園 68:937—942.

**Morphological Analysis of the Rice Root System Based on Root Diameter :** Susumu ARIMA<sup>\*,1)</sup>, Kazumasa SAISHO<sup>1)</sup> and Jiro HARADA<sup>2)</sup> (<sup>1)</sup>*Fac. of Agr., Saga Univ., 840-8502 Saga, Japan ;* <sup>2)</sup>*Osaka Pref. Univ.*)

**Abstract :** A new method of root-system analysis was designed based on root diameter. Using this method the formation of the root system in the rice cultivar, Hinohikari, was examined and the root system of 40 cultivars at the full heading stage compared. The morphology of the root system was visualized and analyzed based on the pipe model theory. Next, a distribution chart of the root volume was drawn for each the root-diameter classes based on the ideal pipe theory, and the “mean root-diameter index” which is the root diameter at the distribution peak of the root volume was calculated. In the distribution chart of root volume, the groups of thick and fine roots were distinguishable with a boundary at about 0.4 mm. Then, the “fine root ratio”, which is the ratio of the volume of fine roots to that of all roots, the “thick root index”, which is the root diameter at the peak of root-volume distribution in the thick root group, and the “fine root index” which is the root diameter at the root-volume distribution peak of the fine root group, were calculated. The results clearly showed a pattern of increase with the increase in root volume of rice and clarified the structure of the root system based on root thickness and root volume. The root system was classified into two groups, the thick root group mainly consisting of crown roots and the fine root group mainly consisting of lateral roots. Each group had a peculiar distribution peak of root volume, and the two groups were distinguished from each other more clearly after the panicle formation stage. The “mean root-diameter index”, “thick root index”, “fine root index” and “fine root ratio” were suggested to be good indicators of growth of the root system and of varietal difference in morphology of the root system.

**Key words :** Image analysis, *Oryza sativa* L., Pipe model, Root diameter, Root system, Root volume, Varietal difference.