簡易調査法による水稻根系の品種間比較

三本 弘 乗・田村 晶・鈴木 浩之
大江 真道・大門 弘幸・山口 俊彦

(大阪府立大学農学部)

1996年9月24日受理

要 旨: 水稻の根系形態を、簡易的に調査して評価する方法を考案し、アメリカの品種と日本の品種の根系を、圃場、大型根箱 (20,736 cm³)、小型根箱 (116 cm³)、水耕の栽培条件で比較検討した。各実験とも、プラスチック板を用いて、冠根を垂直な平板状に展開させるようにして育て、写真撮影して根系の画像を得た。画像は株の中心基部からの距離 (5 cm ごと) と、水平面からの角度 (22.5°ごと) で等分した。分割した各部位について、株からの距離と角度との積の値を求め、これを各部位の「位置の値」(PV) とした。さらに、コンピュータで画像解析して各部位の「根面積」(RPA) を求めた。この「根面積」と「位置の値」から、深根性程度を表す「根系の重心」[CRSG: (PV×RPA) の総和/RPA の総和] と、耐ころび型倒伏性程度と関連性が高いと推測される「根系のモーメント」[MRS: (PV×RPA) の総和] を求めた。圃場実験では、分けつ盛期における調査によって、New bonnet を除くアメリカの品種は、日本の品種に比べて、「根系の重心」と「根系のモーメント」の値が大きいことを、容易に明らかにすることができた (CRSG: Lemont>New bonnet≥M-401>M-7≥イシカリ>日本晴>月の光≥中生新千本, MRS: M-401>M-7>Lemont≥日本晴>中生新千本≥月の光≥New bonnet≥イシカリ)。大型根箱実験では、圃場実験と同様の品種の「根系の重心」と「根系モーメント」の値を把握できた。しかし、経費と管理の面から多数の品種は扱えなかった。小型根箱実験と水耕実験では、それらの値を正しく把握することは困難であった。

キーワード: 簡易調査法, 根系, 根面積, 水稻, 耐倒伏性, 根の分布, 品種間差異。

Comparison of Root Systems among Rice Cultivars by Simplified Investigation Methods: Hironori MIMOTO, Akira TAMURA, Hiroyuki SUZUKI, Masamichi OHE, Hiroyuki DAIMON and Toshihiko YAMAGUCHI (College of Agriculture, University of Osaka Prefecture, Sakai 593, Japan)

Abstract: Simplified investigation methods of root systems in Japanese and American rice cultivars were examined using photographic recording methods and image analysis on a personal computer. In order to photograph flat expanded root systems, plastic boards were inserted vertically into the soil and culture boxes before seeding or planting in each experiment. Each root system profile picture was divided into parts every 5cm from the plant and at an angle of 22.5° from the horizontal. The 'center of root system gravity' [CRSG: integrated (PV×RPA)/the sum of RPA] and 'moment of root system' [MRS: integrated (PV×RPA)] were calculated as indicators of root distribution using the 'position value' (PV: the distance×the angle) and the 'root projection area' (RPA) in each part. In field experiments, cultivar differences in root system profiles were revealed easily, and all American cultivars except New bonnet showed a tendency of deep distribution and large root quantity (CRSG: Lemont>New bonnet≥M-401>M-7≥Ishikari>Nipponbare>Tsukinohikari≥Nakateshinsenbon, MRS: M-401>M-7>Lemont≥Nipponbare>Nakateshinsenbon≥Tsukinohikari≥New bonnet≥Ishikari). In large root box experiments, it was possible to obtain the values of CRSG and MRS similar to those obtained in the field experiments; however, it was difficult to evaluate numerous cultivars owing to the high cost of root boxes and troublesome management. In small plastic root boxes and water culture experiments, it was not possible to obtain accurate values for them.

Key words: Cultivar difference, Lodging tolerance, Rice, Root distribution, Root profile, Root projection area, Simplified investigation method.

わが国における水稻の直播栽培の普及において、障害となっている重要な課題の一つとして倒伏の問題があるが、その解決策として、倒伏抵抗性品種の早急な育成による対応が指摘されている^{1,12,19)}。直播栽培されているアメリカ合衆国の品種 (以下、ア

メリカ品種) は、日本の品種 (以下、日本品種) よりも倒伏抵抗性が優り、その理由として、アメリカ品種は日本品種よりも冠根の水平面となす伸長角度が大きく、比較的深層に根量が多く、深根性であることがあげられている^{4,9,10,11,14,15,16,17)}。そのため、品種の根系形態の特性に関心が寄せられている。

根系の調査には塹壕追跡法、モノスリ法、コア・サンプリング法、根箱法等の各種の方法が用い

* 一部は第196回 (1993年10月)、第198回 (1994年8月) および第200回講演会 (1995年11月) において発表。

られてきた⁶⁾。近年では、生育初期の段階の調査に的をしぼって、設備の小型化・簡易化を工夫したり、土壌を用いなくてシードパックを利用した簡易な調査法も試みられている⁸⁾。しかし、多数の品種を対象にして根系形態から倒伏抵抗性を検定する簡易な方法は、未だに確立されていない。

根系形態の調査は、一般に、技術を要して煩雑で、短時間に多くの点数を取り扱うことが困難であるので、調査法を簡易化して効率化する必要がある。そこで、根系の調査に、冠根を壁面に沿わせて生育させて観察する壁面観察法⁹⁾をもとに、根系を写真撮影し、画像解析して根系形態を把握する簡易調査法を考案した。さらに、得られた根系形態を解析して、品種の深根性程度の評価を行うとともに、根系形態から稲株の支持力を推測して、品種の耐ころび型倒伏性程度を評価する方法を考案した。そして、これらの方法によって、圃場、大型根箱、小型根箱および水耕で栽培した日米の品種について比較検討した。

材料と方法

1. 圃場実験

根系形態がすでに検討されている品種^{4,5,11,12,14,15,16,17)}を含め、日本品種の日本晴、中生新千本、月の光、イシカリと、アメリカ品種のM-401, M-7, Lemont, New bonnetの計8品種を用いた。大阪府立大学内の水田において、10 a 当たりN, P₂O₅, K₂Oをそれぞれ8 kg ずつ施用し、耕起・灌水・代掻き・均平後に、鉄板(長さ210 cm, 幅25 cm, 厚さ0.2 cm)を、20 cm 間隔(条間長)で、18 cm の深さまで打ち込みながら、硬質塩化ビニール製の板(以下、塩ビ板:長さ200 cm, 幅20 cm, 厚さ0.2 cm)を、地上に2 cm 出しながら鉄板に添って土壌に垂直に18 cm 挿入した。鉄板は、塩ビ板を挿入後抜き取った。土壌が落ちついた2日後の1994年6月4日に、催芽した種子を、塩ビ板に沿って33.3 cm の株間隔で、1株当たり4粒ずつ播種し、第4葉の抽出時に間引いて1株当たり1個体とした。

分げつ盛期、最高分げつ期、幼穂形成期、出穂期および成熟期に、次のような方法で根系を調査した。すなわち、調査予定株の区画を板枠で囲み、調査の前日に落水しておいた。調査日に塩ビ板までの条間の土壌と塩ビ板を排除し、塩ビ板に沿って展開した根系をもつ土層を、1株ごとに、深さ約20 cm

まで写真撮影した。撮影の際には物差しを置いて層位を明らかにした。また、冠根を鮮明に写しだすため、冠根の表面に付着した粘度を軽く散水して洗い流した。実験は1区1株として3反復した。

根系の写真(85 mm×125 mm)は実物大に拡大複写し、透明フィルムに挟み、油性のペンを用いて人手によりトレースした。それを、次に示すような方法で根系を部位別に分け、イメージスキャナ(Macintosh, Color OneScanner)でパソコン(Macintosh, Color Classic II)に取り込み、コンピュータプログラム(NIH Image 1.47)を用いて、それぞれの部位の冠根の面積、すなわち、根投影面積¹³⁾を測定した。本報告では根投影面積を根面積とした。

根系の部位別分割は、第1図に示したように、株の中心基部を起点にして水平面となす22.5°ごとの角度と、5 cm ごとの距離でおこなった。角度による分割についてはアルファベット(A~D)を、距離による分割についてはアラビア数字(1~4)を付して、各部位を記号(A1~D4)で表した。さらに、Oyanagi ら¹⁸⁾の「根の深さ指数」と森田ら¹¹⁾の「平均伸長角度」を求める際の考え方を参考に、各部位を数値化した。すなわち、分割した各部位の中心について、株の中央基部からの距離と水平面となす角度の積を各部位の「位置の値」とした。たとえば部位A1(角度の中心:11.25°, 距離の中心:2.5 cm)の「位置の値」を $11.25 \times 2.5 = 28.125 (^{\circ} \cdot \text{cm})$ とした。他の部位についても同様の方法によって求め、第1表に示すように係数化して表した。

Oyanagi ら¹⁸⁾による「根の深さ指数」は、根系における根の重心の位置の推定値とみなされるので¹¹⁾、本研究ではこれを「根系の重心」と表した。「根系の重心」は、各部位の「位置の値」に、それぞれの部位の根量(本実験では根面積)を乗じ、それらの総和を、総根量で除した値によって求めた。なお、Oyanagi ら¹⁸⁾は各部位の根量の分布割合から求めているが、得られる値は同じである。求めた「根系の重心」の値は、株の中心基部からの距離と角度の積の値で示されている。

さらに、各部位の「位置の値」に、それぞれの部位の根量を乗じた値は、根系各部位の、下方に働く力のモーメントとみなすことができ、これらの総和を「根系のモーメント」とした。「根系のモーメント」の値は「根系の重心」と総根量(総根面積)の積の値で示されている。

第1図 根系断面における分割部位の名称 (A1～D4)

なお、本報告におけるすべての実験の根面積は、根系における株の中央を垂直な軸とした、左右両側の対称の部位から求めた値の平均値で示しており、すべて0.5株当たり(片側分)で表している。したがって、「根系の重心」の値は、株の片側の根系の重心の位置を示し、「根系のモーメント」の値もそれに準じて表している。

2. 大型根箱実験

出穂期がほぼ同一で、根系形態がすでに検討されている^{14,15,16)} 日本品種の日本晴と、アメリカ品種のM-401を供試した。育苗は、有孔のプラスチック製の容器(長さ22.5 cm, 幅15 cm, 深さ6 cm)に砂利を詰め、表面に砂を敷いて7.5 cm×4.5 cmの播種間隔で催芽種子を1粒ずつ1994年6月8日に播種し、木村氏B液標準濃度²⁾の1/4濃度の液を用いて、天井面のみビニールで覆ったパイプハウス内での砂耕栽培によった。水耕液は、気泡化した空気を常時加えて循環させながら、45分湛水15分落水し、7日ごとに液を更新し、2日ごとにpHを4.5～5.5に調整した。

根箱は、アクリル製の透明板を一面に用いて作製した(内径:横54 cm, 深さ48 cm, 幅8 cm, 内容積20,736 cm³)。1 cmの網目のふるいを通した水田土壌(植壤土)を充填し、深さ20 cmまでの層に、N, P₂O₅, K₂Oを1箱当たり各3 gずつ施用した。苗(葉齢4.1)は、1994年6月23日に、1株当たり1本で、根箱1箱当たり2株ずつとし、株間を27 cm離して(横枠より各13.5 cm離す)透明板に添って移植した。透明板は、黒色シートで覆

第1表 根系断面における分割部位の「位置の値」

部位*	「位置の値」(°・cm)
A 1	A1×1×1= 28.125**
B 1	A1×1×3= 84.375
C 1	A1×1×5= 140.625
D 1	A1×1×7= 196.875
A 2	A1×3×1= 84.375
B 2	A1×3×3= 253.125
C 2	A1×3×5= 421.875
D 2	A1×3×7= 590.625
A 3	A1×5×1= 140.625
B 3	A1×5×3= 421.875
C 3	A1×5×5= 703.125
D 3	A1×5×7= 984.375
A 4	A1×7×1= 196.875
B 4	A1×7×3= 590.625
C 4	A1×7×5= 984.375
D 4	A1×7×7=1378.125

*第1図参照。

**28.125(°・cm)=(A1の距離:2.5 cm×1)×(A1の角度:11.25°×1)(第1図参照)。

って遮光し、さらに根箱の全側面を発泡スチロールで囲んだ。また、根箱は、透明な壁面に添って根系が発達するように、透明板側に15°の傾斜を付けて、育苗場所と同じパイプハウス内に設置し、常時湛水状態に保った。根系の写真は、発泡スチロールと黒色シートをはずして、圃場実験における調査と同じ生育段階に撮影し、同じ方法で画像解析を行った。実験は1株を1区とし、3反復で行った。

3. 小型根箱実験

供試品種として、圃場実験と共通な日本品種の日本晴、中生新千本、月の光(極早生のイシカリは除いた)と、アメリカ品種のM-401, M-7, Lemont, New bonnetを用いた。根箱として、市販の透明なアクリル製のCDケース(内径:横120 mm, 深さ138 mm, 幅7 mm, 内容積116 cm³)を利用した。これに育苗用培土(商品名:くみあい宇部粒状培土, N:P₂O₅:K₂O=0.2:0.2:0.33 g/kg)を140 g充填した。1994年7月26日に、催芽した種子を、1箱に1粒ずつ播種して1区とし、7反復した。栽培はガラス室内で行った。根箱は、根部を黒色シートで覆って遮光し、湛水状態に保った。播種後27日目の、葉齢約8.0の時点で根系を写真撮影し、圃場実験と同じ方法で画像解析を行った。

4. 水耕実験

実験条件の品種 (日本晴と M-401), 苗 (葉齢 4.1), 移植日 (1994 年 6 月 23 日), および実験場所 (パイプハウス内) は, 大型根箱実験と同一条件とした. 移植用の水耕用容器には, 大型のプラスチック製の容器 (内径: 長さ 80 cm, 幅 55 cm, 深さ 49 cm) を用いた. その容器に, 1 箱当たり 6 台の木製の L 字型支持台 (立ち上がり部分: 高さ 6 cm, 長さ 65 cm, 蓋部分: 幅 11 cm, 長さ 65 cm) を載せた (第 2 図). L 字型支持台は, 水耕容器の蓋, 稲株の支持, および根系展開用板の取り付け台の役割をなした.

根系展開用板の資材としては, 幅 54 cm, 長さ 47 cm, 厚さ 0.5 mm の黒色のシート (以下, 黒色シート, 商品名: ハイゼックスシート), および同じ大きさのネット (ネット区) またはマット (マット区) を用いた. ネット (ナイロン製の防風用ネット, 網目: 7.0 mm×8.4 mm) は, 二重の黒色シート (1 枚は固定, 1 枚は取り外し可) の間に挟んで, 支持台の立ち上がり部分の下端に取り付けた. 根系は, 挟まれたネットに絡まりながら平板状に展開した. マット (商品名: エリゾンマットグリーン, 直径 1 mm, 長さ 6 mm, 20 本/cm² の密度の突起を片面に持つゴム状のマット) は, 突起を持つ面に黒色シートを重ね, ネットと同様の方法で支持台に取り付けた. 根系は, マットの表面の突起に絡まりな

第 2 図 水耕用 L 字型支持台の模式図

がら平板状に展開した. これらの根系展開用板は, 水耕用容器内に 15° の傾斜で立てた塩ビ板に添わせて設置した.

苗の移植方法は, 容器壁から 13 cm 離し, 条間長を 28 cm, 株間長を 12 cm とし, 支持台当たり各 2 株を, 1 株当たり 1 本ずつ支持台の立ち上がり部分に紐で結んで取り付けた (第 2 図). この装置の利用によって, 稲株および根系全体を, 水耕用容器から適宜取り出すことができ, さらに黒色シートを外して根系を容易に写真撮影ができた. 水耕液の管理は, 大型根箱実験における育苗条件に準じた. 実験は 1 株を 1 区とし 3 反復で行った. 根系の画像解析は圃場実験に準じたが, 本実験の根系は, 株元の重なり合った一部を除き全根量が画像化された.

結 果

1. 圃場実験

供試した 8 品種の最高分げつ期 (7 月 17 日, その他の生育時期のデータは省略) における根系をみると, 総根面積の大きい品種は M-401, M-7, 中間的な品種は日本晴, 中生新千本, 月の光, 小さい品種は Lemont, イシカリ, New bonnet であった (第 2 表). 総根面積を部位別に分けて品種間差異をみると (第 3 図), 株に近く, かつ, 小さい角度の部位 (A1) では, イシカリを除く中生新千本, 日本晴, 月の光の各日本品種はアメリカ品種よりも大きかった. 株から離れ, かつ, 角度が大きい部位 (C3, D3) では, New bonnet 以外のアメリカ品種が大きかった.

「根系の重心」の値は, 必ずしも統計的に有意ではないが, $\text{Lemont} > \text{New bonnet} \geq \text{M-401} > \text{M-7} \geq \text{イシカリ} > \text{日本晴} > \text{月の光} \geq \text{中生新千本}$ の順に大きかった (第 2 表). それらの値を 3 階級に分けると, 上位に Lemont, 中位に New bonnet, M-401, M-7, 下位に日本の 4 品種が位置し, アメリカ品種は, 日本品種よりも「根系の重心」の値が大きく, 深根性であることが判った. 根面積の値が著しく小さかった New bonnet や Lemont も, 「根系の重心」は著しく大きい値を示した.

「根系のモーメント」の値についても, 必ずしも統計的に有意ではないが, $\text{M-401} > \text{M-7} > \text{Lemont} \geq \text{日本晴} > \text{中生新千本} \geq \text{月の光} \geq \text{New bonnet} \geq \text{イシカリ}$ の順に大きかった (第 2 表). それらの値を 3 階級に分けると, 上位に M-401, M-7, 中位に Lemont, 下位に日本の 4 品種と New bon-

第2表 圃場実験における総根面積、「根系の重心」および「根系のモーメント」の品種間差異

品 種	総根面積 (cm ² /0.5株)	「根系の重心」 (°・cm)	「根系のモーメント」 (°・cm・cm ² /0.5株)
日本晴	34.5 c	322 abc	11078 ab
中生新千本	32.9 bc	298 a	9795 a
月の光	32.2 bc	302 ab	9614 a
イシカリ	26.3 ab	343 bcd	8986 a
M-401	42.4 d	372 d	15874 c
M-7	38.7 cd	349 cd	13535 bc
Lemont	27.3 ab	430	11656 ab
New bonnet	25.0 a	376 d	9388 a

「根系の重心」= (「位置の値」×根面積) の総和/総根面積, 株の中央で2等分した根系の片側における重心の位置を示す。「位置の値」は第1表参照。

「根系のモーメント」= (「位置の値」×根面積) の総和。

根系断面の調査範囲: 株の中央基部から15 cmまで(部位A1~D3: 第1図参照)。

調査時期: 最高分げつ期(播種後43日目)。

表中の同一英小文字を付した品種間には, Duncan の new multiple range test により, 5%水準で有意差が認められないことを示す。

net が位置した。アメリカ品種は, 根面積の最も小さかった New bonnet を除き, 「根系のモーメント」の値は, 日本品種よりもいずれも大きく, 株元から離れた大きい角度の部位の根量(根面積)が多いことが判った。

2. 大型根箱実験

大型根箱実験における, 7月8日(分げつ盛期)と8月4日(幼穂形成期)(その間とその後の調査時期のデータは省略)の部位別面積を第4図に示した。M-401は, 日本晴に比較して各調査時期のほとんどの部位において大きかった。品種間差異の部位による違いの特徴をみると, 株の中央基部に近い部位1(0~5 cm)では, 生育各時期のいずれの角度(A~D)においても, 品種間差異は小さかったが, 生育が進むにつれて, また, 角度がB, C, Dと大きくなるにつれてその差が拡大し, とくに, 8月4日(幼穂形成期)の角度Dにおいて顕著な差異を示し, M-401は日本晴よりも大きい値を示した。

供試した2品種の角度別の根系形態について, 生育初期(分げつ盛期: 7月8日)と生育中期(幼穂形成期: 8月4日)における相関をみると, 根面積($r=0.9598^{***}$), 「根系の重心」($r=0.9813^{***}$), および「根系のモーメント」($r=0.9841^{***}$)は, それぞれ有意性の高い正の相関を示した。

3. 小型根箱実験

小型根箱を用いて, 圃場実験と共通な7品種を供試し, 生育初期(播種後27日目, 葉齢8.0)に,

株の中央基部からの5 cmの範囲の根系を画像解析し, 品種の総根面積, 「根系の重心」および「根系のモーメント」の値を求め(第3表), 比較対照の圃場実験の値と比較した。なお, 比較に用いた圃場実験の値は, 根系の特徴が明確にみられる播種後43日目の, 株の中央基部から15 cmの範囲の根系から求めた値(第2表)である。

その結果, 小型根箱実験における品種の総根面積の大小の順位は, 必ずしも統計的に有意ではないが, $M-401 > \text{中生新千本} > M-7 \geq \text{日本晴} \geq \text{Lemont} \geq \text{月の光} \geq \text{New bonnet}$ の順位となった。圃場実験で, 品種の総根面積の大小の順位が, 中位の値であった中生新千本は上位となり, その他にも品種の順位に変動があった。しかし, 品種の総根面積の値は, 圃場実験と小型根箱実験との間に, 有意な正の相関($r=0.7632^*$)が認められた。

「根系の重心」の値は, M-401が著しく高い値を示したが, その他の品種間の差異は小さかった。統計的に有意ではないが, 品種の「根系の重心」の値の大小の順位は, 圃場実験と全く同様の傾向を示し, アメリカ品種は日本品種よりも値がやや大きかった(第3表)。各品種の「根系の重心」の値について, 圃場実験との間の相関をみると, 7品種全体では有意な正の相関は認められなかったが($r=0.6031$ ns), 相関図において特異な分布傾向を示したM-401を除外すると, 有意性の高い正の相関が認められた($r=0.9675^{**}$)。

「根系のモーメント」の値についても同様で, 各

第3図 圃場実験における根系断面の部位別根面積の品種間差異

調査時期: 最高分けつ期 (播種後43日目)。A1~A3, C1~C3, D1~D3は根系断面の部位 (第1図参照)。図中のバーは、3反復の標準誤差。

品種の値の大小の順位は、圃場実験とはやや異なる傾向の品種がみられた。しかし、アメリカ品種のM-401とM-7は値が大きく、New bonnetと月の光は値が小さく、これらの品種の値の大小の順位に

ついては、圃場実験と同様の傾向となった。大きく異なったのは中生新千本で、他の品種に比較して値が大きく、上位の順位となった (第3表)。品種ごとの「根系のモーメント」の値について、圃場実験

第4図 大型根箱における根系断面の部位別根面積の品種間差異

□ : 日本晴, ▨ : M-401. 7月8日: 分けつ盛期 (播種後30日目). 8月4日: 幼穂形成期 (播種後57日目). A1~D1, A2~D2, A3~D3, A4~D4, A5~D5 は根系断面の部位 (第1図参照). 図中のバーは, 3反復の標準誤差.

第3表 小型根箱実験における総根面積, 「根系の重心」および「根系のモーメント」の品種間差異

品 種	総根面積 (cm²/0.5株)	「根系の重心」* (°・cm)	「根系のモーメント」** (°・cm・cm²/0.5株)
日本晴	5.1 ab***	165 a	840 ab
中生新千本	6.1 bc	162 a	980 bc
月の光	4.4 a	163 a	709 a
M-401	6.7 c	178 b	1103 c
M-7	5.3 ab	166 ab	879 ab
Lemont	4.8 a	169 ab	808 ab
New bonnet	4.3 a	167 ab	713 a

*, **, ***: 第2表の注参照.

根系断面の調査範囲: 株の中央基部から5cmまで(部位A1~D1: 第1図参照).
調査時期: 葉齢8.0 (播種後27日目).

との間の相関をみると, 7品種全体では有意な相関は認められなかったが ($r=0.7306$ ns), 相関図において特異な分布傾向を示した中生新千本を除くと, 有意性の高い正の相関が認められた ($r=0.9664^{**}$).

4. 水耕実験

各部位の根面積は, 異なる根絡み用資材のネット区およびマット区ともに, M-401が日本晴よりも

大きい傾向を示した (第5図).

部位ごとの根面積の品種間差異の特徴をみると, 株の中央基部に近い1の部位 (0~5cm) では, いずれの角度 (A~D) でも, 根面積の品種間差異は小さかったが, 株から離れた2以上 (5cm~) の部位では, 大きい角度のCおよびDにおいてM-401が顕著に大きくなり, 深根性品種の特徴を示した.

第5図 水耕実験における根系断面の部位別根面積の品種間差異

ネット：根絡み用ナイロンネット（網目：7.0 mm×8.4 mm）。マット：根絡み用ゴム状板（表面に小突起：長さ；6 mm，直径；1 mm，密度；20 本/cm²）。□：日本晴，▨：M-401。

調査時期：分けつ盛期（播種後30日目）。A1～D5，A2～D2，A3～D3，A4～D4，A5～D5は根系断面の部位（第1図参照）。図中のバーは，3反復の標準誤差。

部位ごとの根面積の品種間差異について，圃場実験と比較してみると，圃場実験では，小さい角度の部位（A1～A3）では日本晴が大きく，大きい角度の部位（C1～C3，D1～D3）ではM-401が大きかったが（第3図），水耕実験では，小さい角度（A）の部位も含めて，ほとんどの部位でM-401が大きくなり，水耕実験と圃場実験で，品種の部位ごとの根の生長反応が異なる傾向を示すことがわかった。

さらに，根面積について，大型根箱実験における同一調査時期（7月8日）の，同一部位間の値（第4図）と比較検討した。その結果，日本晴，M-401とも，水耕実験の根面積は，大型根箱実験の根面積よりも，小さい角度のA1，A2，B1，B2の各部位では小さく，大きい角度のD2～D5部位では大きくなり，とくに根絡み程度のゆるいネットでその傾向が顕著となり，水耕条件は土耕条件よりも冠根の伸

長角度を大きくする傾向がみられた。

水耕実験の根面積は，大型根箱実験のような壁面部に添って展開させた一部の根系の画像ではなく，総ての冠根を写した根系の画像（重なり合った一部は省かれる）から求められた値で，総根面積は，比較対照の大型根箱実験における同一調査時期（7月8日）の値（第4図）よりも著しく大きい値となった。

M-401の根面積は，ネット区およびマット区ともに，各部位で日本晴よりも大きかったので，「根系の重心」の値と「根系のモーメント」の値も，それぞれM-401が大きい値となった（データは省略）。

水耕実験における2品種の，各角度ごとの根面積，「根系の重心」および「根系のモーメント」の値について，大型根箱実験における同一生育時期

の、各角度ごとのそれらの値との相関をみた結果、根面積（ネット： $r=0.7586^*$ ，マット： $r=0.8481^{**}$ ），「根系の重心」（ネット： $r=0.8720^{**}$ ，マット： $r=0.9210^{**}$ ），「根系のモーメント」（ネット： $r=0.8868^{**}$ ，マット： $r=0.9512^{***}$ ）は、いずれも有意な正の相関が認められた。しかし、株からの距離ごとに求めた、同様に値についてのそれらの間の相関は認められなかった。

考 察

1. 根系形態の評価法と品種の耐倒伏性

直播栽培に適する耐ころび型倒伏性の強い品種は、押し倒し抵抗値が大きいことが明らかにされている^{15,16,17)}。一般に、アメリカ品種は押し倒し抵抗値が日本品種よりも著しく大きく、押し倒し抵抗値の大きい品種の根系は、小さい品種に比べて株の直下方向の深い層にまで分布し、いわゆる深根性で、しかも、根量が多いことを寺島ら^{15,16,17)}は明らかにしている。

本研究における深根性の程度は、Oyanagi ら¹⁸⁾、森田ら¹¹⁾の報告をもとに「根系の重心」を求めて検討した。

深根性で根量の多い品種は、耐ころび型倒伏性の強い品種であり¹⁴⁾、耐ころび型倒伏性は、根系による稲株の支持力が関与するとされている^{4,14)}。しかし、これまでに、稲株の支持力を表す方法については明らかにされていない。本研究では、稲株の支持力は、根系の下方に働く力のモーメントによって表されると考えて、その推定値を求め、これを「根系のモーメント」とみなすことを考案した。

圃場、根箱、水耕の各実験条件で、8品種の「根系の重心」と「根系のモーメント」の値を求めて、それらの関連性を明らかにするとともに、従来の報告と照合しながら、「根系の重心」の値によって深根性程度を、「根系のモーメント」の値によって耐ころび型倒伏性程度の推定が可能かどうかについて検討した。

圃場実験において、アメリカの4品種は日本の4品種に比較して、根系は深い層にまで分布し、「根系の重心」の値が日本品種よりも総て大で、従来の報告^{4,14,16)}と同様に、アメリカ品種は深根性であることを、本方法によっても明らかにすることができた。

「根系のモーメント」も、New bonnetを除き、アメリカ品種は日本品種よりもいずれも大きい値を

示した。寺島ら¹⁵⁾は、穂ぞろい期に品種の押し倒し抵抗値を調査し、アメリカ品種は、日本品種に比べてその値がいずれも大で、M-401は、供試した18品種の中で最大であり、日本晴の約4倍、Lemontは約2倍であったと報告している。本圃場実験における最高分げつ期の「根系のモーメント」の値も、M-401は供試した8品種の中で最大で、日本晴よりも43%高い値を示した。Lemontも日本晴より5%高い値を示した。

小型根箱実験でも、生育初期に冠根の生長がとくに良好であった品種を除くと、「根系の重心」と「根系のモーメント」の値の大小の品種の順位は、圃場実験と全く同じ傾向となった。大型根箱実験と水耕実験では、日本晴とM-401だけの品種比較ではあるが、根系における各部位の根量、「根系の重心」、および「根系のモーメント」の値は、両実験とも圃場実験と同様にM-401が著しく大きく、圃場実験における品種の大小の順位にみられた結果と一致した。

以上のとおり、品種の耐倒伏性と密接な関連があるとみられる「根系の重心」と「根系のモーメント」の値を、考案した方法によって推定することができ、これらの値について、品種の相対的な順位付けをおこなうことができた。

「根系の重心」の値は、理論的にいって深根性程度を表しているといえる。さらに、本研究における結果と、従来の品種の深根性に関する報告^{4,11,14,16)}との矛盾も認められなかったので、本方法によって求めた「根系の重心」の値で、品種の深根性程度を評価できると推測した。

「根系のモーメント」によって耐ころび型倒伏性程度を評価できるかどうかについては、本研究では、耐ころび型倒伏性程度の測定をしていないので断定的なことはいえない。しかし、寺島ら¹⁵⁾の報告における、本実験と共通な3品種（日本晴、Lemont、M-401）の耐ころび型倒伏性程度の評価と、本実験における評価を比較した結果、一致する傾向を認めたので、本方法で求めた「根系のモーメント」の値によって、耐ころび型倒伏性程度を評価できる可能性は大きいと推測した。今後、圃場で多数の品種を用いて「根系のモーメント」の値と、耐ころび型倒伏性程度との関係を、実証的に明らかにする必要がある。

「根系の重心」の値と「根系のモーメント」の値との関連性をみると、「根系の重心」の値が最大で

あった Lemont は、根量が少なかったために、8 品種の中で中位の値となり、「根系の重心」の値が中位であった M-401 は、深い層に根量が多かったために最大の値となった。Lemont について「根系の重心」の値が大きかった New bonnet は、根量が著しく少なかったため、「根系のモーメント」の値は日本品種よりも劣り、それぞれ順位の逆転がみられた。したがって、品種の「根系の重心」と「根系のモーメント」の値は、必ずしも同一傾向を示すものではないことがわかった。

なお、本実験において「根系のモーメント」が最大の値を示し、寺島ら¹⁵⁾の報告において、耐ころび型倒伏性程度が最強と推定した M-401 は、出穂後に、葉鞘と稈の基部に腐敗状の病徴がみられ（病原の解明に至らず）、挫折抵抗の著しい低下をみた。また、寺島ら¹⁵⁾は、台風の際に Lemont が倒伏しなかったのに M-401 が全面倒伏したことを報告している。耐倒伏性遺伝子の導入は、単に根系特性のみで判断されるものでないことは当然である。

2. 根系形態の調査適期

耐倒伏性を検定する目的で根系形態を調査しようとする場合には、栽培管理と調査の効率からみて、根系の品種間差異が把握できる、なるだけ早い生育段階での調査が望ましい。

水田での土壌モノスリによる調査で、株下 0~25 cm における根長密度と根重密度では、幼穂分化期頃には品種間差異は認められず、登熟期に至って差異を認めたとする Kang らの報告⁵⁾がある。しかし、芳賀ら⁴⁾は、根箱によって播種後 55 日目における根の発生根角度についての品種間差異を明らかにしている。鯨⁷⁾も、根箱によって播種後 33 日目における根系の品種間差異を明確にしており、生育の早い段階での根系調査の可能性が示唆される。

大型根箱による経時的な根系調査において、品種別・角度別の根量、「根系の重心」および「根系のモーメント」は、生育初期の 7 月 8 日（播種後 30 日目：分げつ盛期）の値と、生育中期の 8 月 4 日（播種後 57 日目：幼穂形成期）の値との間に、それぞれ有意性の高い正の相関が認められた。したがって、「根系のモーメント」の値によって、耐ころび型倒伏性程度を推測できると仮定すれば、分げつ盛期頃の、比較的早い生育段階に「根系のモーメント」を求めて、耐ころび型倒伏性程度の品種間差異を明らかにすることが可能と推測された。

根系形態の調査適期は、調査の精度と難易度か

ら、根色と根量も関連する。一般的に、根は生育が進むと着色したり変色したりする。秋落土壌を用いた根箱実験では、移植後 10 日目で根の黒変がみられたとする報告³⁾がある。本研究における圃場実験と大型根箱実験では、出穂期頃から根の黒変化がはじまり、登熟中期には著しく黒変化が進み、写真による根の判定が困難であった。また、生育が進むにつれて根量が多くなり、根のトレースに時間を多く要するようになる。

圃場と大型根箱の両実験の経時的な調査結果から、「根系の重心」と「根系のモーメント」の値の品種間差異を求める調査の適期は、分げつ盛期～最高分げつ期頃と判断した。

3. 生育条件と根系形態

大型根箱と水耕の各実験結果の根系形態について、つぎのとおり比較して検討した。なお、小型根箱実験は生育条件が大きく異なるので、比較による考察は省略した。

大型根箱実験における品種の根系形態は、分げつ初期から圃場実験に準ずる傾向を示した。しかし、根箱に詰めた土壌の緊密性が圃場よりも小さく、鋤床層も無いため、冠根の生長は生育初期から良好で、圃場実験よりも深く広がり、小さい角度（A、B）の部位よりも大きい角度（C、D）の離れた部位（2~5）で根量が多くなり、圃場実験よりも深根性の傾向がより大きくなった。

水耕実験における M-401 と日本晴の両品種の根の伸長角度は、根絡みネットおよび根絡みマットの両区とも、大型根箱実験におけるよりもさらに大きくなった。すなわち、小さい角度の部位（A、B）よりも大きい角度の部位（D）で、両品種の根面積がそれぞれ著しく大きくなり、とくに、根絡み程度のゆるいネットでその傾向が強くあらわれた（第 5 図）。もっとも、品種の各角度ごとの根面積、「根系の重心」および「根系のモーメント」は、大型根箱実験におけるそれらの値と高い正の相関関係が認められたので、水耕実験においても、品種の根系の特徴はそれぞれ表されているものとは思われる。しかし、耐ころび型倒伏性の検定のための品種の「根系のモーメント」の値の正確な評価は、水耕条件では困難で、圃場実験か、大型根箱実験によらざるをえないと思われる。

実験条件の違いによる冠根の角度の増大程度の大きい順位は、水耕のネット > 水耕のマット >> 大型根箱 > 圃場の順となり、根圏の物理的な条件が、根系

形態に大きく影響したと思われるが、冠根の伸長角度の変化の原因については明らかにすることはできなかった。

4. 根系形態調査の効率性と問題点

圃場での写真撮影による本調査方法では、特別な作業としては、播種前に土壌中に塩ビ板を打ち込んでおくことと、写真撮影時に塩ビ板間（条間）の土壌を排除する作業があるが、これらの作業は技術を要しない単純作業である。したがって、圃場実験における技術的な問題としては写真を鮮明に撮ることだけである。土壌の排除がすめば、多数の品種の根系を短時間に撮影して記録することができ、塩ビ板の打ち込みと写真撮影による本方法は、圃場における根系調査法としてきわめて効率的であるといえる。しかし、本方法では、本来3次元に展開する根系を、板の挿入により壁面に沿って2次元の平板状に強制的に展開させた後、調査しているという壁面法⁶⁾による問題は残されている。

さらに、根系の分割方法や「位置の値」の求め方には、次のような問題がある。すなわち、一定の角度と距離で分割した場合に、分割部位の面積は距離によって異なるので、角度ごとの部位間の比較はできるが、距離ごとの部位間の比較はできない。

また、「根系のモーメント」を求める場合に、角度の値を距離の値と同等に扱って良いかという問題がある。本実験のように5 cmと22.5°で分割し、その値で評価すると、角度の値は距離の値の4.5倍($22.5/5=4.5$)の高い比率で「根系のモーメント」の値に影響することになる。また、例えばA1とB1、A3とC1の「位置の値」を同等に評価して「根系のモーメント」を求めても良いかという問題もある。「根系のモーメント」に係わるこれらの問題は、角度の評価の問題であるといえる。今後、多数の品種を用いて実証的に検討し、「根系のモーメント」の値によって耐ころび型倒伏性程度を正確に求められるような、角度の評価法を明らかにする必要がある。

水耕法や根箱法では、根系形態を圃場と全く同じようには再現できないという問題はあるが、効率性からみた場合には、次のような特徴があげられる。

すなわち、大型根箱法と水耕法は、土壌の排除作業がなく、写真撮影がいつでも可能で、同一個体を経時的に追跡できるという長所があり、調査作業も楽であった。しかし、大型根箱法では、根箱が大きく重いために（本実験の大型根箱の重量は土壌と水

を含めて約40 kg）取り扱いが困難であり、根箱にかかる経費も大きく、多数の品種の検定には不向きであった。また、水耕法では、大型の水耕槽が必要であり、培養液の更新やpHの調整などの管理が煩雑であるなどの問題があった。

小型根箱法は、市販のアクリルケースを利用しているため、安価で、取り扱いはきわめて容易であった。この小ケースを用いて「根系の重心」や「根系のモーメント」の値を求めることは、前述のとおり困難であったが、品種の根系形態を、生育初期の根の伸長角度や、根の太さによって比較するような場合には^{4,7,8,12,14)}、本方法がきわめて効率的であると思われる。

また、写真をもとに根面積を求める際に、パソコンを用いてイメージスキャナーによって根の部位を画像化する方法があるが¹³⁾、現段階では人手によるトレースの方が効率的であったため、本研究ではその方法によった。人手によるトレースには精度の問題があるが、水稻において、最高分げつ期頃の早い生育段階では、一次根が主体であり、比較的容易にトレースが可能で、誤差の程度は、品種間差異を越えないと推測した。

なお、深根性程度と根量の多少によって品種の選抜をする場合には、必ずしも「根系の重心」や「根系のモーメント」の値を算出する必要はなく、本方法によって求めた写真によって達観的に評価して、容易に品種選抜が可能と思われる。

引用文献

1. 秋田重誠 1990. アメリカ合衆国の稲作を支える技術と研究 (4). 農業技術 45: 509—511.
2. 馬場 起・高橋保夫 1957. 水耕法及び砂耕法. 戸荻義次ら編, 作物試験法. 農業技術協会, 東京. 147—185.
3. 土井彌太郎・山県 恂 1957. 透明合成樹脂ポットによる水稻の栽培実験 (続報). 山口大農学術報告 8: 713—723.
4. 芳賀光司・香村敏郎・高松美智則・朱宮昭男・釈 一郎 1977. 水稻直播用品種の育成に関する研究. 第1報 湛水直播における稲品種の耐ころび型倒伏性. 愛知農総試研報 A9: 13—23.
5. 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 condition. Jpn. J. Crop Sci. 63: 118—124.
6. 河野恭廣 1990. 土壌要因と形態. 松尾孝嶺 他編, 稲学大成. 第1巻 形態編. 農文協, 東京. 425—438.
7. 鯨 幸夫 1987. 生育初期における水稻根系の品種間差異. 日作紀 56 (別2): 59—60.

8. ——— 1991. シードバックを利用した作物の根系形態調査法—生育初期における水稻根系の品種間差異—. 北陸作物学会報告 26:31—34.
9. 三本弘乗・鈴木浩之 1993. 水稻の直播における好適特性の品種間差異. 第1報 生育初期の引き抜き抵抗力和根の生育. 日作紀 62 (別2):35—36.
10. ———・——— 1994. 水耕法による水稻品種の根の生育比較. 日作紀 63 (別2):153—154.
11. 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.
12. 滝田 正・櫛渕欽也 1983 直播栽培適応型水稻品種育成における根の太さの選抜の意義と選抜法. 農研センター研報 1:1—8.
13. 巽 二郎 1995. フラクタル解析による根系分布パターンの定量的評価. 日作紀 64:50:57.
14. 寺島一男・秋田重誠・尾形武文・西村 実 1990. 稲における根の形態と機能. 第7報 ころび型倒伏抵抗性の遺伝子源の評価について. 日作紀 59 (別1):258—259.
15. ———・———・酒井長雄 1992. 直播水稻の耐倒伏性に関与する生理生態学的形質. 第1報 押し倒し抵抗測定による耐ころび型倒伏性の品種間比較. 日作紀 61:380—387.
16. ———・尾形武文・秋田重誠 1994. ————. 第2報 耐ころび型倒伏性品種の根の生育特性. 日作紀 63:34—41.
17. ———・秋田重誠・酒井長雄 1995. ————. 一. 第3報 根の土壌中分布特性と耐ころび型倒伏性との関係. 日作紀 64:243—250.
18. Oyanagi, A., T. Nakamoto and M. Wada 1993. Relationship between root growth angle of seedlings and vertical distribution of roots in the field in wheat cultivars. Jpn. J. Crop Sci. 62:565—570.
19. 山本隆一 1990. 水稻直播栽培用品種開発の道標. 農業技術 45:385—391.