水稻における根長密度と収量との関係*

森田 茂 紀・菅 徹 也・山崎 耕 宇

(東京大学農学部)

昭和 62 年 10 月 29 日受理

要 旨：水稻における根系の量および分布と収量との関係について解析を行なった。実験用コンクリート水田において、窒素施肥量あるいは栽植密度を変えた 6 条件下で水稻を栽培した。登熟期にそれぞれの処理区において株下および株条間（相互に隣接する 4 株の中央部分）から、ブリキ製の円筒を用いて根を採取し、ルートスキャナーで根長を測定し、根長密度（単位土壌体積当りの根長）を算出した。根長密度は、土壌表面から深くなるにつれて、少なくなっていた。根長密度を利用して、単位面積当りの土壌中に存在する総根長を推定したところ、約 1 万 km/10 a のオーダーの値が得られた。この単位面積当りの総根長と推定収量との関係を解析した結果、収量水準約 550 kg/10 a までは収量と総根長が対応して増加したが、それ以上の収量水準では総根長は減少していた。土壌中における根の相対的な分布と収量との関係についてみると、600 kg/10 a 以上の高い収量では、根が相対的に下方向に分布していた。以上の結果から、600 kg/10 a 以上の高い収量をあげるためには、単に根量が多いこととは別に、むしろ根が下方向に分布していることが重要であることが推察された。

キーワード：「下層根」、根長、根長密度、収量、水稻、「表層根」、ルートスキャナー。

The Relationship between Root length Density and Yield in Rice Plants : Shigenori MORITA, Tetsuya SUGA and Koou YAMAZAKI (*Faculty of Agriculture, the University of Tokyo, Tokyo 113, Japan*)

Abstract : The relationship between mass or distribution of rice roots and yield were studied. Materials were rice plants cultivated in an experimental paddy field under various conditions in relation to the amount of nitrogen fertilizer and planting density. Soil cores were taken at the site below and between hills at a 30cm depth with a metallic cylinder (diameter : 15cm, length : 40cm). After the roots were washed out using water on a sieve, the length of all the roots were measured with the Comair root length scanner made by Commonwealth Aircraft Corp., Ltd. From these data the root length density at each site and depth was calculated. With these root length densities the total root length per unit area (depth : 30cm) was estimated. The total root length increased with yield up to about 550g/m² but not very much over 600g/m². Then the distribution of roots were analyzed using the root length density. At the yield level over about 600g/m² the proportion of deeper distributed roots was higher. These results indicate that the deeper distribution of roots was important for high rice yield.

Key words : Deeper roots, *Oryza sativa* L., Rice, Root length, Root length density, Root length scanner, Yield.

水稻根の量的形質あるいはその分布の様相と、収量とが密接に関係していることについては、多くの報告がある^{2,3,7,10,13)}。しかし、従来の研究は根系のうちの 1 次根のみを対象としていたり、稲株近傍の根系の一部分のみを取扱っているものがほとんどである。したがって、本来、問題とすべき単位面積当りの土壌中に存在する根量と収量との関係については、十分に検討が加えられているとはいえない。そこで著者らは、種々の条件下で栽培した水稻個体群を対象とし、まず個体群内の部位別ならびに土層別に根長密度（単位土壌体積当りの総根長）を測定し、根量を表示する一つの指標とした。つぎに、この根長密度を利用して、単位面積当りの根長や根系の相対的な分布の様相を推定した。さらに、これら単位面積当りの根長や分布の様相と収量との関係に

ついて解析を行なった。

材料と方法

1. 材料の栽培

材料として用いたのは、1984 年に東京大学農学部構内の実験用コンクリート水田で移植栽培した水稻品種無芒愛国である。水田は、1.5 m×1.8 m、あるいは 1.5 m×1.5 m、深さが約 95 cm で、約 25 cm の礫および砂の上に、深さ約 70 cm の千葉県印旛郡在の水田土壌を充填したものである。なお、土壌表面から約 20 cm までの部分を耕起しているが、耕盤は必ずしも明らかではない。6 月 9 日に第 6 葉抽出前後の苗を 1 株 3 本植えて水田に移植し、常時湛水状態で栽培した。減水深は、ほとんどない。本実験では、根量あるいは収量の変異を大きくするために、窒素施肥量や栽植密度を変えた合計 6 処理区を設けた。処理条件の違いは、第 1 表に示したとおりである。いずれの場合も、すべての肥料は土壌表

* 大要は、第 182 回講演会（昭和 61 年 10 月）において発表。

第1表 各処理区の栽植密度および施肥条件.

処理区名	A 区	B 区	C 区	D 区	E 区	F 区
栽植密度 (株/m ²)	22.7	11.1	22.7	44.4	22.7	22.7
施 N (kg/10a)	0	8	8	8	16	24
P ₂ O ₅ (kg/10a)	8	8	8	8	8	8
肥 K ₂ O (kg/10a)	8	8	8	8	8	8

面から約 20 cm までの部分に均一に施肥した。ここでは、6 処理区を、結果からみた推定収量の低いものから高いものへ、順次、A、B、C、D、E、F 区と呼ぶことにする。それぞれ A：無窒素区、B：疎植区、C：対照区、D：密植区、E：窒素 2 倍区、F：窒素 3 倍区に対応する。

2. 材料の採取

材料の採取は、登熟期に行なった。まず、処理区画の周縁部を除くすべての株の茎数・草丈を測定し、個体群の中で株の茎葉部が平均的な生育を示す領域を選定した。選定領域において、第1図に示したように、株を中心とした株下部位、および隣接する4株間の中央部にあたる株条間部位からそれぞれ2点の根系を採取した。根系の採取に当っては、ブリキ製の円筒（直径 15 cm、長さ 40 cm）を採取部位の土壤中に鉛直方向に挿入し、根系を円筒状の土塊（直径 15 cm、長さ 30 cm）ごと掘取するという方法を用いた。掘取った円柱状の土塊は、土壌表面からの深さ別に、0～5、5～10、10～20、20～30 cm の4層に包丁で輪切りにした（以下、この輪切りにした土塊を層別土塊と呼ぶ）。各層別土塊ごとに土壌を注意深く水で洗い流した後、根系をホルマリン・酢酸・アルコール（FAA）で固定した。

3. 根長密度の算出

以上のようにして採取した材料について、以下の手順で根長密度を算出した。すなわち、まず、それぞれの層別土塊に含まれていた根の長さをルートスキャナー（Commonwealth Aircraft Corp., Ltd. 製造の Comair Root Scanner）¹¹⁾を用いて測定した。この根長を当該層別土塊の体積（深さ 0～5 および 5～10 cm の層の場合は 884 cm³、深さ 10～20 および 20～30 cm の層の場合は 1767 cm³）で割り、反復（株下 2、株条間 2）を単純平均して単位土壌体積中に含まれる根長、すなわち根長密度とした。さらに、各処理区の株下および株条間のそれぞれの根長密度を平均して各土層別の根長密度、また各土層別の根長密度を平均して各処理区の根長密度とした。

第1図 根長密度の測定部位および「表層根」・「下層根」の位置を示す模式図。

4. 単位面積当りの根長の推定

上記のようにして得られた根長密度のデータから、10 a 当りの土壌中に存在する総根長を推定した。まず、各処理区の土層別の平均根長密度に、深さ 0～5、5～10 cm の場合は 10 a (=10⁷cm²)×5 cm、また深さ 10～20、20～30 cm の場合は 10 a×10 cm をそれぞれ乗じて、10 a 当りの土層別根長とした。さらに、0～30 cm の各土層における根長を加え合わせたものを 10 a 当りの総根長とした。

5. 収量の推定および根系との関係

各処理区から、茎葉部の生育が平均的な値を示す数株から穂を採取し、籾数および籾重を測定した。これらの測定値と栽植密度から、10 a 当りの推定総籾数および推定総籾重を算出した。さらに 10 a 当りの推定総籾重に 0.8 を乗じたものを、10 a 当りの推定玄米収量とした（以下、単に収量という）。

以上のようにして求めた穂の形質、収量などと根の量やその分布との関係について検討を加えた。

結 果

1. 根長密度の測定

まず、各処理区のそれぞれの土層における根長密度（株下と株条間の平均）を算出したところ（第2

第2表 各処理区における根系の量的形質および収量。

		処 理 区 名*					
		A 区	B 区	C 区	D 区	E 区	F 区
根長密度	0~5 cm (cm/cm ³)	4.4	7.3	7.6	7.5	4.2	6.8
	5~10 cm (cm/cm ³)	6.6	8.0	8.0	8.8	6.2	7.0
	10~20 cm (cm/cm ³)	2.3	2.6	3.1	4.1	2.4	2.6
	20~30 cm (cm/cm ³)	1.1	1.4	1.4	1.4	1.1	1.5
層別根長	0~5 cm (10 ³ km/10a)	2.2	3.7	3.8	3.8	2.1	3.4
	5~10 cm (10 ³ km/10a)	3.3	4.0	4.0	4.4	3.1	3.5
	10~20 cm (10 ³ km/10a)	2.3	2.6	3.1	4.1	2.4	2.6
	20~30 cm (10 ³ km/10a)	1.1	1.4	1.4	1.4	1.1	1.5
総根長 (10 ³ km/10a)		8.8	11.6	12.3	13.7	8.7	11.0
「下層根」/「表層根」比		0.45	0.70	0.45	0.37	0.45	0.95
推定粒数 (10 ⁵ 粒/10a)		190	252	300	314	393	451
推定収量 (kg/10a)		354	437	490	551	599	697
粒数/総根長 (粒/m)		2.2	2.2	2.4	2.3	4.5	4.1
収量/総根長 (mg/m)		40	38	40	40	69	63

* 第1表参照。

第2図 深さによる根長密度の推移 (C区の場合)。

第3図 収量と総根長との関係。

A: A区, B: B区, C: C区, D: D区, E: E区, F: F区 (第1表参照)。

表), その値は $1.1 \sim 8.8 \text{ cm/cm}^3$ の範囲にあった。これを深さ別にみると, 処理の如何にかかわらず, 「 $0 \sim 5 \text{ cm} \approx 5 \sim 10 \text{ cm} > 10 \sim 20 \text{ cm} > 20 \sim 30 \text{ cm}$ 」という傾向が認められた (第2図)。すなわち, 各処理区を通じて, 根長密度は土壌表層部を除き, 深くなるにつれて少なくなっていた。

2. 単位面積当りの総根長の推定

つぎに, 上記のようにして算出した平均根長密度にそれぞれ該当する土壌体積を掛けて, 10 a 当りの各層の根長を推定した。各層の根長を合計して得られる 10 a 当りの総根長は, $8,700 \sim 13,700 \text{ km/10 a}$ の範囲にあった (第2表)。すなわち, 処理区による変異は多少あるものの, 10 a 当りの総根長は, 1 万 km 前後のオーダーであると推定された。

3. 収量の推定

調査を行なった株の粒数および粒重と栽植密度とから, 各処理区における 10 a 当りの総粒数および玄米収量を推定した (第2表)。その結果, 推定粒数は $190 \sim 451 \times 10^5 / 10 \text{ a}$, また, 推定玄米収量は $354 \sim 697 \text{ kg/10 a}$ の範囲にあった。

4. 収量と総根長との関係

上記のようにして求めた根長あるいは根長密度と収量との関係について解析を行なった。まず収量と総根長との関係についてみたところ, 両者の間の関係は単純なものではなかった (第3図)。すなわち, A区, B区, C区およびD区においては, 収量が約 350 kg/10 a から約 550 kg/10 a に増加しているのに対応して, 総根長もほぼ比例的に約 $9,000 \text{ km/10}$

a から約 14,000 km/10 a に増加していた。しかし、収量が約 600 kg/10 a の E 区および約 700 kg/10 a の F 区では異なる傾向が認められ、総根長がかえって短くなっていた。このように、収量と総根長との間に比例的な対応関係が認められるのは、一定の収量レベルまでであった。

5. 根長の分布と収量との関係

そこでつぎに、根長の土壌中における相対的な分布の様相と収量との関係について検討を加えた（第 2 表および第 4 図）。その際、根長の相対的分布の様相を示すものとして、「下層根」/「表層根」比という指標を考えた。この指標は、株下の 10～30 cm における根長密度を、株条間の 0～10 cm における根長密度で割った値である（第 1 図参照）。「下層根」/「表層根」比が大きいということは、下方向に伸長する根が相対的に多く、土壌中の比較的深い部分に分布する根の割合が高いこと、を意味するものとみてよい。

この「下層根」/「表層根」比と収量との関係についてみたところ、収量が約 600 kg/10 a までは、B 水田が若干異なる傾向を示したものの、収量の如何にかかわらず「下層根」/「表層根」比は比較的低い値を示した。しかし、さらに収量が高い F 水田においては他の水田に比較して「下層根」/「表層根」比が大きく、「表層根」に比べて「下層根」の割合が高くなっていた（第 4 図）。

6. 単位根長当りの粒数・収量

最後に、単位根長当りの粒数や収量について検討を行なった。まず、単位根長当りの粒数をみたところ（第 2 表）、収量が約 550 kg/10 a 以下の A 区、B 区、C 区および D 区においては、収量の如何にかかわらず、根長 1 m に対応する粒数は約 2 粒/m とほぼ一定の値を示した。しかし、収量が約 600 kg/10 a 以上の E 区および F 区においては、根長 1 m 当りの粒数は約 4 粒/m と高い値となっていた。また、単位根長当りの収量についても、同様の傾向が認められた（第 2 表）。すなわち、収量が約 550 kg/10 a 以下の A 区、B 区、C 区、D 区においては、根長 1 m 当りの収量は約 40 mg/m であった。しかし、収量が約 600 kg/10 a 以上の E 区および F 区においては、根長 1 m 当りの収量は約 60～70 mg/m と高い値になっていた。

考 察

1. 根長密度および単位面積当りの根量

第 4 図 収量と「下層根」/「表層根」比との関係。
A：A 区，B：B 区，C：C 区，D：D 区，
E：E 区，F：F 区（第 1 表参照）。

水稻における根量と収量との関係について研究していく場合には、単位面積当りの根量と収量との比較を行なう必要がある。しかし、従来の研究をみると、根系については株を対象としていたり、根系の一部分のみを対象としているものがほとんどで^{2,3,7,10,13}，したがって、単位面積当りの根量と収量との関係が十分に解析されてきたとはいえない。

本研究においては、単位面積当りの土壌中に存在する根量を推定するために根長密度を利用した。根長密度は、単位体積当りの土壌中の根長（単位は普通、cm/cm³）を示すものであり、畑作物では根系の発達を定量的に把握するために利用されることが多い¹⁾。しかし、イネにおいて根長密度を測定した事例は、きわめて少ない^{4,5,6)}。しかも、畑作物およびイネのいずれの場合も、単位面積当りの所定の深さまでの土壌中に存在する根量を推定するために根長密度を利用するという考え方はほとんどない。

本研究においては、株下（株を中心とした部分）および株条間（相互に隣接する 4 株の中心部分）から根系の一部分を採取し、得られた根長密度を利用して単位面積当りの土壌中に存在する根量を推定した。推定に用いた各土層の平均根長密度は、株下と株条間のそれぞれの土層の根長密度の単純平均である。このような算出方法の妥当性については、今後検討する余地が残されていることはいうまでもない。しかし、実際の水田から一定の体積の土壌を掘取り、根を洗い出して、その長さを測定するということは、時間、労力、周囲の株への影響、反復などを考慮した場合、現実問題として著しい困難を伴う。したがって、なんらかの方法で根系の一部分を

採取して、その測定結果から、根系全体の長さを推定せざるをえない。

今回試みたように株を中心とした株下、および個々の株から最も離れた株条間という2地点を選定すること(第1図)は、作業が比較的容易であり、限られた試料から根系の全体像を推定するためには、当をえた方法といえよう。しかも地上部の生育を考慮して採取地点の選定を行なっている点で、結果の信頼性も相対的に高いと考えられる。少なくとも同じ方法で採取および測定を行なった結果について、比較を行なうことに大きな問題はないと考えられる。

なお、上記の方法で推定した単位面積当りの根量が実際の根系の量をどの程度反映しているかについては、さらに検討すべき問題がある。例えば、実際の農家水田などにおいて水稻根系を観察すると、深さ30 cm以下にも根が分布しているが、その量は極めて少ない場合がほとんどである。したがって、すべての根が深さ30 cmまでに存在していると仮定しても、量的な推定として大きな問題はないと考えられる。また土壌から根系を洗い出す過程で、根の流亡を極力少なくする努力を払ったが、分枝根などの細い根がどの程度流亡しているかは、必ずしも明らかではない。さらに、本研究ではルートスキャナーを用いて1次根だけでなく、分枝根も含めて根系を構成するすべての根について長さを測定したが、ルートスキャナーによる測定値が実際の値に比較して過小評価されている可能性もある¹¹⁾。しかし、一例としてではあるが、水稻の総根長を具体的な推定値として初めて提示しえたこと、および以下で考察するように、根量と収量とを同じ面積当りの量として詳細に比較しうようになったことは意義あるものと考えられる。

2. 単位面積当りの根長と収量との関係

根長と収量との関係についてみると、すでにのべたように、収量が約550 kg/10 aまでは収量の増加に対応して総根長が増えていたが、収量約600 kg/10 a以上では、むしろ減少していた(第2表)。このことは、ある程度以上の高い収量を期待する場合には単に根長だけでは解決できない問題のあることを示唆している。

この点についてさらに根長の相対的な分布に着目して解析を進めたところ、収量約550 kg/10 aまでに比較して、収量約600 kg/10 a以上では、「表層根」(株条間の0~10 cmの部分の根)に比べて

「下層根」(株下の10~30 cmの部分の根)の割合が相対的に高いこと、が明らかとなった(第4図)。以上の結果は、約600 kg/10 a以上の多収をあげるためには、単に根長が多いということだけでなく、むしろ根がどのように分布しているかということが重要であり、さらにいえば「下層根」が大きな役割を果たしていることを示すものと考えられる。

「下層根」の重要性については、「うわ根」の量と収量との関係に関する解析結果⁷⁾や、1次根の伸長方向と収量との関係に関する解析結果¹⁰⁾からもすでに推察されていたところである。本研究において収量550~600 kg/10 aを境に、「表層根」と「下層根」との分布の様相が異なることが明らかになったことは、「下層根」の重要性を直接示すものであって、従来の推察を裏づけるものといえよう。

ここで、「下層根」の果たす役割について若干の考察を加えておきたい。著者らはすでに、水稻1次根の伸長方向が直径あるいは通導機能と密接に関係していることを指摘しており^{8,9,12)}、太くて通導機能の高い根は下方向に伸長し、反対に細くて通導機能の低い根は横方向に伸長するという傾向を認めている。本研究における「下層根」は、下方向に伸長する太い1次根およびこれに形成される分枝根に相当するものと考えられる。したがって、「下層根」の割合が相対的に高いということは、「太くて通導機能の高い1次根」が比較的多くなることに対応しており、これが高い収量と結びついているものと推察される。事実、本研究とほぼ共通の材料を用いて、1次根の伸長方向と籾重との関係を解析した結果によれば、単位面積当りの推定収量が高いことと太い1次根が下方向に伸長していることがほぼ対応していた¹⁰⁾。以上の諸知見を総合して模式化すると、一般的な傾向として、「下方向に伸長する1次根⇔太い1次根⇔通導機能の高い1次根⇔高い収量」という対応関係が描かれるのではなかろうか。今後の研究は単に根の長さにとどまらず、その分布、直径、あるいはさらに機能へと解析の対象を広げていくことが必要であろう。

なお、根の直径の重要性は他のデータからも示唆されるところである。すなわち、根長1 m当りの籾数、収量をみると、収量約550 kg/10 aまでは、それぞれほぼ約2粒/m、約40 mg/mであったが、収量約600 kg/10 a以上では、それぞれおよそ約4粒/m、60~70 mg/mであった(第2表)。このことは、収量600 kg/10 a以上では、単位根長当りの

穂の量的形質（粒数、粒量）が大であり、逆にいえば、単位長さ当りの根の機能が高いことを意味している。収量約 600 kg/10 a 以上で「下層根」の割合が高いこと、また、ほぼ同じ材料を解析した結果、下方向に伸長する 1 次根の割合が高かったり、A 区に比較して F 区の方が 1 次根の平均値径が大きかったこと¹⁰⁾を考えあわせると、根の直径が大ききことと根の機能が高いことが対応しており、これが多収に結びついていると考えられる。

謝辞 材料の栽培および根系の採取にあたっては、村瀬吉郎氏（現名古屋大学医学部）に御協力いただいた。ここに記して厚くお礼申し上げる。

引用文献

1. Gregory, P.J., M. McGowan, P.V. Biscoe and B. Hunter 1978. Water relations of winter wheat. 1. Growth of the root system. *J. Agric. Sci.* 91: 91—102.
2. 原田二郎・山崎耕宇・中元朋実・三宅 晃・梅田泰一郎 1984. 農家水田に生育した水稻の 1 次根数と収量構成要素との関係. 第 1 報 株および個体に着目した場合. 日作紀 53: 307—312.
3. ———・———・梅田泰一郎・三宅 晃・中元朋実 1984. 農家水田に生育した水稻の 1 次根数と収量構成要素との関係. 第 2 報 茎および“要素”に着目した場合. 日作紀 53: 313—319.
4. International Rice Research Institute 1978. Annual report for 1977. Los Baños, Laguna, Philippines. 100—101.
5. ——— 1979. Annual report for 1978. Los Baños, Laguna, Philippines. 100—102.
6. ——— 1980. Annual report for 1979. Los Baños, Laguna, Philippines. 335—338.
7. 川田信一郎・副島増夫・山崎耕宇 1978. 水稻における“うわ根”の形成量と玄米収量との関係. 日作紀 47: 617—628.
8. 森田茂紀・山崎耕宇・川田信一郎 1983. 水稻冠根の伸長方向と組織構造との関係. 日作紀 52: 551—554.
9. ———・———・——— 1983. 水稻冠根の伸長方向と通導機能との関係. 日作紀 52: 562—566.
10. ———・岩淵 輝・山崎耕宇 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.
11. Morita, S., T. Suga, Y. Haruki and K. Yamazaki 1988. Morphological characters of rice roots estimated with a Root Length Scanner. *Japan. Jour. Crop Sci.* 57: 371—376.
12. 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.
13. ———・原田二郎 1984. 農家水田に生育した水稻の 1 次根数と収量構成要素との関係. 第 3 報 水田間の差異について. 日作紀 53: 320—325.