

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と出液速度による機能評価—

阿部 淳・森田 茂紀

東京大学大学院農学生命科学研究科

要 旨: イネ科作物の体は、茎断片(節間)・葉・根・分げつ芽からなるファイトマーの積み重ね構造として理解できる。この考え方を水稻(イネ, *Oryza sativa* L.)の圃場試験に応用し、稚苗よりもさらに若い2葉期の苗を移植する乳苗移植栽培における根系形成を検討した。栃木県の農家水田において、水稻品種コシヒカリの乳苗移植栽培(乳苗区)と稚苗移植栽培(稚苗区)を対比し、葉数から推定されるファイトマーの数や、茎葉部乾物重や茎直径から推定されるファイトマーの大きさを調べるとともに、根系については、根量と分布および出液速度で評価される生理的活性を調べた。乳苗区のイネは、稚苗区のイネよりもファイトマーの数が多く推移し、ファイトマーの大きさは小さい傾向にあった。根量には両区間に差異がみられなかったが、分布は乳苗区の方がやや浅根性であった。乳苗区では、ファイトマー数に応じて1次根数が多い一方で、ファイトマーが小さいために個々の根も短くなっており、そのため浅根性であった可能性がある。出液速度の測定結果は、乳苗区の方が生育後半の根の活性が高く維持されたことを示しており、乳苗区では生理活性が高い“うわ”根が土壌表層に多く形成されていたと考えられる。

キーワード: イネ (*Oryza sativa* L.), 根系形成, 出液速度, 乳苗, ファイトマー

A Field Experiment on Lowland Rice Plants (*Oryza sativa* L.) Transplanted at the 2-leaf Stage in the Tochigi Prefecture, Japan - Analysis of Morphological Characteristics of the Root System on the Basis of Phytomer Concept and the Evaluation of Physiological Activity of Roots using the Bleeding Sap Rate - : Jun ABE and Shigenori MORITA (Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, Tokyo 113-8657, Japan)

Abstract: The plant body of cereal crops is composed of successive morphological units called phytomers, each of which consists of a stem internode, a leaf, nodal roots and a tiller bud. It has been reported that the number and size of nodal roots should be greatly affected by the number and size of phytomers, respectively. In addition, the bleeding sap rate is often used to evaluate physiological activity of a whole root system without digging up the plants. These two concepts of phytomer formation and bleeding sap rate were used to compare the structure and function of root systems in rice plants (*Oryza sativa* L.) transplanted at the 2- (“nyubyo”) and 4-leaf stages (“chibyo”) in a farmer's paddy field in the Tochigi Prefecture. Transplanting 2-leaf stage seedlings was recently developed to save the time and labor required with transplanting 4-leaf stage seedlings, which is the conventional practice in Japan. The root system of the nyubyo-transplanted rice had a shallower distribution with slower senescence in physiological activity than that of chibyo-transplanted rice during grain filling. Nyubyo-transplanted rice had a larger number of phytomers (i.e., a larger number of leaves) with smaller size (i.e., a smaller dry weight per phytomer and smaller stem diameter) than chibyo-transplanted rice. These phytomers could form numerous, but somewhat small, nodal roots, which may lead to the shallow distribution of active “superficial roots” in the root system of nyubyo-transplanted rice.

Key words: Age of seedlings, Bleeding rate, Phytomer, *Oryza sativa* L., Root system

1. 乳苗移植栽培とは

現在の日本の水稻栽培では、プラスチックトレイの苗箱で約3週間育苗した、第3葉(主茎の不完全葉を第1葉とする)が展開しきった段階の「稚苗」を田植機で移植する稚苗移植栽培が主流である。多年にわたってこの稚苗移植栽培を想定した技術改善が進められて成果を挙げ

てきたが、直播栽培の試みにみられるように育苗や移植でさらに省力化を進められる余地がある。乳苗移植栽培は、従来の稚苗移植栽培の技術体系を利用して、稚苗よりさらに若い、第2葉が展開した段階の「乳苗」を移植する栽培方法である。普通に育苗したのでは苗が小さすぎて移植が難しく、冠水しやすい問題もあるが、

2003年2月21日受付

*連絡先 〒113-8657 東京都文京区弥生 東京大学大学院農学生命科学研究科
Fax: 03-5841-5070 E-mail: abejun@cup.u-tokyo.ac.jp

まず暗黒高温条件下で草丈を伸ばしてから光に当てて硬化・緑化することで機械移植が可能となる。育苗が1週間で済み、直播栽培より従来の稚苗移植に近いため導入に際しての技術的リスクが小さいといった利点がある(姫田 1994a, b, 丸山 1997)。

乳苗の根については、育苗期や移植・活着期についての研究は進んでいた(Hoshikawa *et al.* 1995, 斎藤ら 1995, 山本ら 1995, 1996a, 1996b)が、栽培管理をより適切なものに改善するために必要な、本田における根系形成についての知見は少なかった(武市ら 1995, 熊谷ら 2000)。そこで著者らは、実際に乳苗移植栽培を行なっている農家の協力を得て、乳苗移植水稻の本田における根系形成を2年間調査したので(森田ら 1995, 1996a, 1996b, 阿部ら 2003)、その成果を紹介したい。

2. ファイトマーと出液速度に着目した根系調査

この乳苗移植水稻の根系調査に当って、著者らはそれまでに考案してきた以下の2つの研究手法の応用を試みた。

(1) ファイトマーに基づく根系の発育形態学的解析

植物の体はファイトマーという形態的な基本単位の積み重ね構造として理解できるが、特にイネ科作物では、茎を構成する1つの節間に葉・分げつ芽・節根(不定根)がセットとなったファイトマー構造(第1図)が明瞭である(Nemoto *et al.* 1995)。とりわけイネでは、葉と根の出現が同調しており(藤井 1961)、あるファイトマーの葉が出葉する際に3つ下側のファイトマーから節根が出現するという規則性が認められる(川田ら 1963)。さらに、節根形成の場がファイトマーの主体となる茎であるため、茎直径などに代表されるファイトマーの大きさが、葉のみならず節根のサイズ(例えば1次根直径)にも影響を及ぼすことが知られている(根本・山崎 1989)。このため、環境の影響を受けつつも、イネの1次根数は株全体のファイトマー数に、また、個根の大きさはファイトマーの大きさに強く規定されることになる(森田ら 1997c, Abe *et al.* 1998, 阿部ら 2000)。

乳苗移植したイネのファイトマーの数は、稚苗移植の場合とは異なることが予想された。これは、移植時の苗の生育段階が違うために、穂の形成開始までに各茎に形成されるファイトマーの数が違う可能性があることと、早くに空間的ゆとりのある本田に若い生育段階の苗を移植することで下位節の分げつが発達し茎数が増

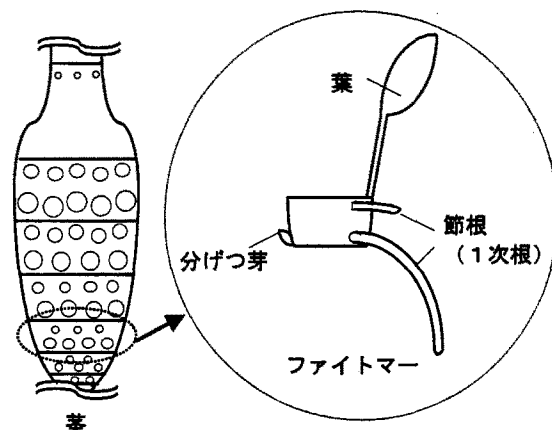
え、最終的な全ファイトマー数が増加する可能性があるためである。また、稚苗用の田植機を乳苗移植に利用した場合は、1株に植え付けられる苗数が多くなり、結果として株当りのファイトマー数が増大することもある。さらに、ファイトマーの数が異なる場合には、それに対応してファイトマーの大きさも変化する可能性がある。したがって、乳苗移植栽培は、ファイトマーという概念に基づいてイネ根系を発育形態学的に解析する手法を実際の栽培現場に応用する好個の事例である。

(2) 出液速度を指標とした根系の生理的活性の評価

出液速度は、茎葉部を切除した切株の切断面から根圧によって単位時間に押し出されてくる木部液の量で、根系全体の生理的活性の指標になりうると考えられる。根系を掘り出さずに比較的簡単に測定できるという点で、とくにフィールドにおける調査方法として優れている(森田・阿部 1999)。今回の圃場調査では、主に出穂期以降の根系の老化にともなう出液速度の低下に、乳苗移植と稚苗移植とで差異がみられるかどうかを調査し、葉色との関連を検討したほか、出液中のサイトカイニン活性も調べた。

3. 調査水田の耕種概要と調査方法

1995年と1996年の2年間にわたり、栃木県河内郡南河内町の農家水田において機械移植栽培した水稻品種コシヒカリについて調査を行なった。同一の水田に乳苗と稚苗を移植したが、1995年の1株当りの植え付け苗数は乳苗区6.7、稚苗区3.4であった。1996年は植え付け苗数の影響を除いて乳苗と稚苗の根系形成を比較するため、1995年と同様の乳苗区(≒6.7個体/株)と慣行稚苗区(≒3.4個体/株)のほか、植え付け個体数を乳苗とほぼ同じにした稚苗区



第1図. イネのファイトマーの構造概念図。
Nemoto *et al.* 1995 より改変。

(≈ 6.7 個体/株)を設けた。おおむね稚苗移植栽培の慣行に従って栽培したが、前年にすぎ込んだ生ワラ由来の地力窒素を活かして窒素施肥を少なくし、7月上旬まで深水管理を行なった。これらの栽培管理は、乳苗区と稚苗区の両区ですべて同じに行なった。

ファイトマー数は葉数から推定した。第1図に示したように、1つのファイトマーには1枚の葉が形成されるため(Nemoto *et al.* 1995)、ある時点のファイトマー数はそれまでに出現した全葉数と同じである。そこで、移植直後にすべての葉に印をつけて計数し、以後2週間ごとに新たに出現した葉(=前回までの印のない葉)に印をつけながら計数し、それを累計することでファイトマー数を推定した。ファイトマーの大きさは、茎葉部の総乾物重をファイトマー数で割って評価する方法(森田ら 1997b)のほか、株の基部における周長と茎数とから茎直径を推定する方法(森田ら 1989, 森田ら 1997a)で評価した。

根系の形態は、円筒モノリス法(森田・阿部 2001)により調査した。すなわち、株を中心にした部位と隣接する4株の中央部位の2箇所、直径15cmのステンレス製円筒を土壌中に鉛直に挿入し、根を含む長さ25cmの円柱状の土壌モノリスを掘り取って、土壌表面から5cmごとの土層に切り分け丁寧に根を洗いだした。採取した根は、ルートスキャナーを用いて分枝根を含む総根長を測定した後、乾物重を測定した。こうして求めた深さ別の根長・乾物重から、根量の指標として単位面積当りの根長と根重を、また根の垂直分布の指標として根の深さ指数(Oyanagi *et al.* 1993)を算出した。

出液速度は、田水面より上で茎葉部を切除し、切株の切断面に脱脂綿を当てて、その脱脂綿の重量の増分により測定した(森田・阿部 1999)。サイトカイニン活性は共同研究者の折谷隆志(富山県立大学教授)が生物検定法(Letham 1963, Manos and Goldthwaite 1976)で評価した。

4. ファイトマーの数と大きさからみた根系形成

1995年の株当たりの茎数は、全生育期間を通して乳苗区が稚苗区より多かったが(森田ら 1995)、1996年に設定した乳苗区と同じ植え付け苗数の稚苗区の茎数には有意な差がなかったことから(森田ら 1996b)、乳苗区で茎数が多いのは主に移植時の植え付け苗数が多いためと考えられる。株当たりのファイトマー数は茎数を反映して、生育期間を通して乳苗区が稚苗区より多く、ファイトマーの大きさは乾物重で評

価した場合も茎直径で評価した場合も、乳苗区の方が稚苗区よりも小さかった(第1表; 森田ら 1995, 1996a, 1996b, 阿部ら 2003)。ちなみに収量は、1995年は乳苗区の方が高く、1996年は稚苗区の方が高かった。1996年の収量構成要素についてみたところ、穂数は乳苗区が多いのに対して、幼穂形成直前のファイトマーの大きさを反映すると考えられる穂重や1穂初数は稚苗区の方が大きかった(折谷ら 1997)。

根系についてみると、出穂期における乳苗区と稚苗区の根量には有意な差はなかったが、根の分布には違いが認められ、生育期間全体を通じて乳苗区の方が根の深さ指数が小さく浅根性であった(第1表; 森田ら 1996a, 阿部ら 2003)。まだ事例研究の数が非常に少ないので一般的な結論を導くことは困難であるが、株周辺の根重を調べた武市ら(1995)も、乳苗区では深層の根が少ないと報告しており、乳苗移植栽培の根系が浅根性である可能性は高いといえる。水稻の移植栽培では一般に、植え付け苗数が多いと根系が浅根性になる(寺島ら 1985, 原田ら 1986)。1996年の調査における根の深さ指数は、乳苗区<稚苗区(乳苗区と同等の植え付け苗数)<慣行稚苗区(乳苗区より小さい植え付け苗数)の順であったことから、乳苗区の根系が浅根性であることの原因の一部は、植え付け苗数の違いと考えられる(森田ら 1996b)。

異なる品種を同一条件で栽培した結果(森田ら 1997b)や、本研究と同じコシヒカリを異なる条件で栽培した結果(阿部ら 2000)を参考

第1表. 出穂期における茎葉部および根系の生育状況(1995年)。

形質	乳苗区	稚苗区
ファイトマーの数(株当たり)	230	174
ファイトマーの大きさ		
1ファイトマー当りの地上部乾物重(mg)	220	270
平均茎直径(mm)	7.7	8.7
根量(水田単位面積当り)		
総根長(km/m ²)	19.6	19.8
総根重(g/m ²)	165	153
根の深さ指数 ^a		
根長の分布から算出した指数(cm)	7.2	7.8
根重の分布から算出した指数(cm)	6.0	6.9
1次根数 ^b	645	526
「平均根長」(m) ^c	1.8	2.2

阿部ら(2003)より改変した。

- 単位はいずれも地表面からの深度(cm)
- 1株当たり(1996年のデータ)
- 1995年の総根長および1996年の1次根数から算出した、1次根1本当りの分枝根も含めた根長。

にすると、乳苗区ではファイトマー数が多いことに対応して1次根が多く、ファイトマーが小さいことに対応して個根のサイズが小さいことが予想できる。1996年に乳苗区と稚苗区の1次根数と総根長を1次根数で除した「平均根長」について検討した結果は、この予想とよく符号するものであった(第1表)。また、「平均根長」は分枝根を含む長さであるが、1次根の根軸の長さと同様の大小傾向を示すと考えると、乳苗区の根系では比較的短い1次根が多いということになり、乳苗区の根系が浅根性であることと矛盾しない。根系分布を規定しているもう一つの重要な要因である1次根の伸長角度についてはデータがないが、1次根の基部直径と伸長方向の関係(山崎ら1981)や、茎直径と1次根の直径との関係(根本・山崎1989)についての従来の知見に照らし合わせると、乳苗区で平均茎直径が小さかったことは、乳苗区の方が1次根の直径が小さく、1次根が土壌表面となす伸長角度が相対的に小さいことを示唆しており、乳苗区が浅根性であることと符合する。

以上のように、本田における乳苗区の根系形成の特徴は、ファイトマーの数と大きさから茎葉部の生育との関連でかなり理解できることが分かった。水田における個体群レベルにおいても、根量とその分布の様相を含む根系形態の形成を、ファイトマーの数と大きさから解析できることを示す例といえる。

5. 出液速度で評価した根の活性

登熟期における出液速度は乳苗区・稚苗区ともに経時的に減少したが、乳苗区の低下はやや緩やかで、成熟期の出液速度は乳苗区の方が比較的高くなる傾向を示した(森田ら1995, 1996b)。すなわち、登熟期の乳苗区における根の生理活性は、稚苗区より高く維持されていたと考えられ、このことは、葉色(SPAD値)で評価した下葉の枯れ上がり、稚苗区より乳苗区の方が緩やかであったことと呼応している(森田ら1995)。また、出液中のサイトカイニン活性は、生育中期から稚苗区に比べて乳苗区で高くなり始め、穂肥後3日目では乳苗区の活性が著しく高かった(折谷ら1997)。

以上の調査結果を考え合わせると、乳苗区の根系は生育後期における生理活性が相対的に高かったものと考えられる。水稻の生育後期における根の活力と光合成速度の関連を示唆する報告もあることから(Jiang *et al.* 1994a, b)、今後の技術改善次第で乳苗移植栽培の収量レベルをさらに向上させることができる可能性がある。

なお、乳苗区の表層に分布した根のかなりの部分は、いわゆる“うわ”根(川田ら1963)と考えられる。この“うわ”根は一般に分枝根がよく発達することが知られているが(川田・副島1974)、分枝根の発達した根では出液速度が高いという報告がある(山崎・阿部1987)。したがって、生育後期の乳苗区において根系が比較的高い生理活性を維持していることは、根系の形態と密接に関連している可能性がある。

謝辞

本稿の基礎となった研究においては、生育・根系調査ならびに出液速度の測定は東京大学大学院生(当時)の萩沢芳和氏と共同で行ない、サイトカイニンの分析は富山県立大学の折谷隆志教授が担当した。現地調査を行なうにあたり、調査全体に係る調整で新日化興産の奥詰治道氏に、水稻の栽培管理で館野道雄氏およびご家族に、それぞれ大変お世話になった。以上の方々に、心よりお礼申し上げる。なお、ここで取り扱った内容は、日本作物学会および同関東支部会で報告し(森田ら1995, 1996a, 1996b)、「農業および園芸」の2003年4月号に発表した内容(阿部ら2003)を再構成したものであることとお断りしておきたい。

引用文献

- Abe, J., S. Morita and Y. Hagiwara 1998. Developmental models to describe the relationships between shoot and root growth in rice. In Box, J. E. ed. Root Demographics and Their Efficiencies in Sustainable Agriculture, Grasslands and Forest Ecosystems. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. pp. 523-531.
- 阿部淳・森田茂紀・萩沢芳和 2000. ポット栽培したイネの登熟期におけるファイトマーの数・大きさと根量の関係。根の研究 9:131-134.
- 阿部淳・折谷隆志・森田茂紀・萩沢芳和 2003. 水稻の乳苗移植栽培における本田の根系形成 - 栃木県の農家水田における調査事例 -。農業および園芸 78 (印刷中)。
- 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。佐賀大学農学部彙報。12:1-117.
- 原田二郎・前田忠信・山崎耕宇 1986. 植付苗数を異にする水稻 1 次根の伸長方向別分布。日本作物学会紀事 55 (別1):62-63.
- 姫田正美 1994a. 水稻の乳苗移植栽培技術 [1] - その研究成果と今後の課題 -。農業および園芸 69:679-683.
- 姫田正美 1994b. 水稻の乳苗移植栽培技術 [2] - その研究成果と今後の課題 -。農業および園芸

- 69:791-796.
- Hoshikawa, K., R. Sasaki and K. Hasebe 1995. Development and rooting capacity of rice nursing seedlings grown under different raising conditions. *Japanese Journal of Crop Science*. 64:328-332.
- Jiang, D.A., T. Hirasawa and K. Ishihara 1994a. Depression of photosynthesis in rice plant with low root activity following soluble starch application to the soil. *Japanese Journal of Crop Science*. 63:531-538.
- Jiang, D.A., T. Hirasawa and K. Ishihara 1994b. The difference of diurnal changes in photosynthesis in rice plants with different root activities induced by soluble starch application to the soil. *Japanese Journal of Crop Science*. 63:539-545.
- 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着目した場合の一例. *日本作物学会紀事* 32:163-180.
- 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. *日本作物学会紀事* 43:354-374.
- 熊谷千冬・小山淳・吉田修一 2000. 水稻乳苗移植栽培の本田生育と根系形成. *根の研究* 9:202.
- Latham, D.S. 1963. Regulations of cell division in plant tissues. *New Zealand Journal of Botany* 1:336-350.
- Manos, P.J. and J. Goldwaite 1976. An improved cytokinin bioassay using cultured soybean hypocotyl sections. *Plant Physiology* 57:984-987.
- 丸山幸夫 1997. 稲作低コスト化技術の現状と課題. *農業および園芸* 72:108-112.
- 森田茂紀・根本圭介・胡東旭・春木康・山崎耕宇 1989. 水稻における茎直径の簡便な推定方法. *日本作物学会紀事* 58:143-144.
- 森田茂紀・萩沢芳和・阿部淳 1995. 乳苗移植栽培した水稻の出穂期以降における活力の評価—葉の枯れ上りと出液速度—. *日本作物学会関東支部会報* 10:27-28.
- 森田茂紀・萩沢芳和・阿部淳 1996a. 水稻の乳苗および稚苗移植栽培における出穂期の根系形態の比較. *日本作物学会紀事* 65(別1):216-217.
- 森田茂紀・萩沢芳和・阿部淳 1996b. 水稻の乳苗および稚苗移植栽培における根系の形態と機能に関する事例研究. *日本作物学会関東支部会報* 11:18-19.
- 森田茂紀・萩沢芳和・阿部淳 1997a. 稲株の周長と茎数を利用したファイトマーの大きさの簡易推定. *根の研究* 6:46.
- 森田茂紀・萩沢芳和・阿部淳 1997c. 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異の解析—. *日本作物学会紀事* 66:195-201.
- 森田茂紀・阿部淳 1999. 出液速度の測定・評価方法. *根の研究* 8:117-119.
- 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. *根の研究* 10:13-18.
- 根本圭介・山崎耕宇 1989. 水稻1次根の直径および数と茎の直径との関係、とくに異なる品種についてみた場合. *日本作物学会紀事* 58:440-441.
- Nemoto, K., S. Morita and T. Baba 1995. Shoot and root development in rice related to the phyllochron. *Crop Science* 35:24-29.
- 折谷隆志・森田茂紀・萩沢芳和・阿部淳 1997. 農家水田において移植栽培した水稻の乳苗および稚苗の収量、出液速度および出液中のサイトカイニン濃度. *日本作物学会紀事* 66(別1):213-217.
- 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. *Japanese Journal of Crop Science*. 62:565-570.
- 斎藤満保・後藤雄佐・松森一浩・山本由徳 1995. 乳苗の出芽器内緑化育苗法と機械移植適応性. *日本作物学会紀事* 64:734-739.
- 武市啓志・山本普太・近藤真二・馬淵敏夫 1995. 水稻乳苗移植栽培における深水管理の影響(予報). *日作四国支部紀事* 32:24-25.
- 寺島一男・平岡博幸・西山岩男 1985. 一株当たり植付本数の違いが水稻根の形態に及ぼす影響. *日本作物学会紀事* 54(別2):6-7.
- 山本由徳・池尻明彦・新田洋司 1995. 葉齢を異にする水稻苗の活着、初期生育および出穂特性. *日本作物学会紀事* 64:556-564.
- 山本由徳・池尻明彦・新田洋司 1996a. 水稻無緑化乳苗の生育に及ぼす育苗温度の影響. *日本作物学会紀事* 65:487-494.
- 山本由徳・池尻明彦・新田洋司 1996b. 水稻乳苗の苗素質と活着、初期生育に及ぼす育苗期間の光条件の影響. *日本作物学会紀事* 65:495-501.
- 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の関係. *日本作物学会紀事* 50:452-456.
- 山崎耕宇・阿部淳 1987. 水稻根の形態と出液速度との関係. *日本作物学会紀事* 56(別1):176-177.