

# 水資源の効率的活用を目指した高生産性陸稲栽培システムの確立

加藤 洋一郎（東京大学大学院農学生命科学研究科附属農場）

akko@fm.a.u-tokyo.ac.jp

水資源を効率的に利用する高生産性陸稲栽培システムの確立のため、潜在的な生産性（多収性）および土壌乾燥下の収量安定性（耐乾性）に関する一連の研究に取り組んだ。その結果、陸稲栽培においても集約的な管理によって慣行の灌漑水稲栽培並みの高い生産力が得られること、陸稲栽培用の品種改良において多収性を上げる余地が充分にあることを示した。また、この栽培システムにおける収量安定のためにイネが具備すべき性質として、脱水回避性が重要であることを明らかにした。

## はじめに

全世界で使用される水資源のうち、およそ 70%は農業用水にあてられている。しかし近年、都市部における水資源の需要増大や気候変動の影響により、農業に利用可能な水資源が不足する危険性が懸念されている。とりわけアジア地域では水資源の 45%が稲作に用いられており、水資源環境の持続性に配慮した新しい稲作技術の確立は緊急課題である。このため、現在、水資源を有効に使いながら高収量を達成する稲作技術の開発が、中国や東南・南アジアを中心に進められている。その中でも、灌漑用水量の節減を極限まで追求した技術として高生産性陸稲栽培システムが注目されている。これは“エアロビックライス”とも呼ばれ、施肥や灌漑を適宜行うものの、代掻きや湛水をせず、畑条件の土壌でイネを栽培するため、灌漑水稲栽培システムと比較して灌漑用水量を大幅に減らすことができる。日本でも、水田圃場における灌漑設備が未発達であった 40-50 年前には、高生産性陸稲栽培システムに関する研究が数多く行われた。

しかし、イネは他の主要作物に比較して土壌乾燥に弱いため、畑条件において高位安定生産を達成することは容易ではない。したがって、高生産性陸稲栽培システムの確立には、一時的な土壌乾燥に遭遇しても収量を維持する多収性品種あるいは栽培管理法の開発が重要である。ところが稲作における水管理に関する近年の研究は、水資源の投入節約に対する収量低下の割合に関する評価が中心であり、高生産性陸稲栽培における生育特性はほとんど解明されていない状況にあった。そこでまず、高生産性陸稲栽培システムにおける生産力の評価をおこない、次に多収性と耐乾性の両立に向けた研究に取り組むこととした。

## 高生産性陸稲栽培システムの生産力評価

まず始めに、高生産性陸稲栽培システム、すなわち給水量（降水量と灌漑水量の総和）および施肥量レベルが比較的高い畑条件、および慣行の灌漑水稲栽培システムにおいてイネの生産力の比較を行った (1, 2)。その結果、高生産性陸稲栽培でも、標準的な日本型水稲品種である日本晴の収量は  $6 \text{ t ha}^{-1}$  を超え、灌漑水稲栽培のそれに匹敵すること、節水効率の指標である水生産性（単位給水量あたりの生産性）は灌漑水稲栽培 ( $0.1\text{-}0.4 \text{ kg m}^{-3}$ ) に対して高生産性陸稲栽培 ( $0.5\text{-}0.7 \text{ kg m}^{-3}$ ) では 2 倍近いことを示した。そこでさらに、インド型改良水稲品種を含む多収性品種を供試したところ、多収性インド型水稲品種タカナリの収量は高生産性陸稲栽培でも  $10 \text{ t ha}^{-1}$  を超

え(第1表)、今後の高生産性陸稲栽培用の品種改良において多収性を上げる余地が充分にあることが示された(3)。

しかし、高生産性陸稲栽培では、イネ収量は給水量の影響を受けており、生産性を損なわずに農業用水利用の節約を進めるには、品種改良によって耐乾性を向上させていくことが必要と考えられた。とくに生殖生長初期の給水量の変動によって総穎花数および収量が大きく影響を受けていたため(2)、高生産性陸稲栽培システム下の耐乾性向上のためには、生殖生長初期の一時的な土壤乾燥に対する穂形成の応答の遺伝的変異に着目すべきであると考えられた。

### 高生産性陸稲栽培システムの生産安定性

生殖生長初期の土壤乾燥がイネ1穂穎花数を抑制する事実は既に知られていたが、穂の形態形質への影響、また、その品種間差異に関する知見はほとんど存在しなかった。そこで、穎花の分化や出穂前退化(発育停止)といった穂形質に着目し、土壤乾燥が1穂穎花数へ及ぼす影響について圃場試験およびポット試験によって検討した(4)。その結果、土

壤乾燥に対する穂形質の応答について、1) 幼穂分化期前後(出穂30-35日前)の土壤乾燥に対しては、枝梗・穎花はほとんど退化しないが、これらの分化は抑制されやすいこと、2) 減数分裂期前後(出穂10-20日前)の土壤乾燥に対しては、2次以上の高次の枝梗が退化しやすいこと、3) これらの退化は軽度の土壤乾燥でも生じることが示された。圃場試験では土壤乾燥に対する1穂穎花数の減少に品種間差異が認められ、それには植物体内の水分状態が関与していた(第2表)。このことから、高生産性陸稲栽培システム下の耐乾性向上における脱水回避性(体内水分状態を高く維持する性質)の重要性が示唆された。

### 畑条件における脱水回避性、収量形成と深根発達の関係

脱水回避性に関与する植物体の特性として深根発達量に着目し、生殖生長初期の土壤乾燥下のイネ品種の深根形成と水分利用について検討した。高生産性陸稲栽培においてイネ根系分布を調査したところ、土壤深層における根長の品種間の順位は湿润下でも土壤乾燥下でも同様であることが認められた(5)。そして、深根形成に関与する形態要因として冠根の伸長角度や太さの重要性が示唆された(6)。また、土壤表層が乾燥するにつれてイネが土壤深層の水分に依存していくこと、深根発達量が土壤乾燥下の水分利用量に関係することが示唆された(7)。

次に、土壤乾燥下の収量形成における深根の意義を検証するため、遮根シートを用いた根域制限処理および表層と下層を砂利で仕切る“上げ床”処理を行い、深根発達量の異なる品種の生

第1表. 高生産性陸稲栽培システムおよび慣行湛水水田栽培システムにおける多収性品種の収量および水生産性(2007・2008年)。

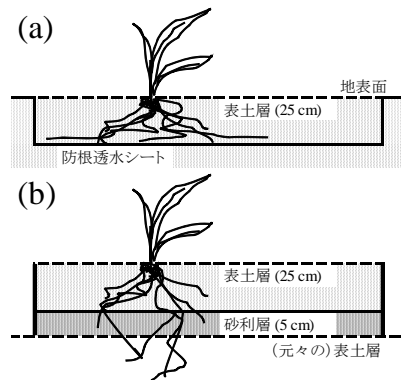
	精籾収量 (t ha <sup>-1</sup> )				水生産性 (kg m <sup>-3</sup> )			
	東大農場 (東京都)		京大農場 (大阪府)		東大農場 (東京都)		京大農場 (大阪府)	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008
高生産性陸稲栽培								
タカナリ	6.6	10.6	11.4	11.3	0.65	0.82	1.25	0.86
アキヒカリ	7.4	8.7	6.6	7.3	0.89	0.72	0.84	0.64
IRAT109	7.9	9.0	7.2	9.4	0.90	0.75	0.89	0.82
Lemont	8.1	9.0	7.7	9.8	0.91	0.71	0.85	0.81
LSD (5%)	0.5	0.7	0.8	1.9	0.05	0.06	0.09	NS
平均	7.5	9.3	8.2	9.4	0.84	0.75	0.96	0.78
湛水水田栽培								
タカナリ	9.7	11.0	10.8	11.5	0.28	0.34	-	0.73
アキヒカリ	7.5	8.0	7.4	7.3	0.22	0.26	-	0.49
IRAT109	7.3	6.8	7.5	7.4	0.21	0.22	-	0.50
Lemont	7.0	6.8	6.4	7.0	0.20	0.21	-	0.45
LSD (5%)	0.6	0.7	0.7	0.6	0.02	0.02	-	0.04
平均	7.9	8.2	8.0	8.3	0.23	0.26	-	0.54

第2表. 高生産性陸稲栽培システム(常時灌漑区、土壤乾燥区)におけるイネ5品種の主茎の穂形質。

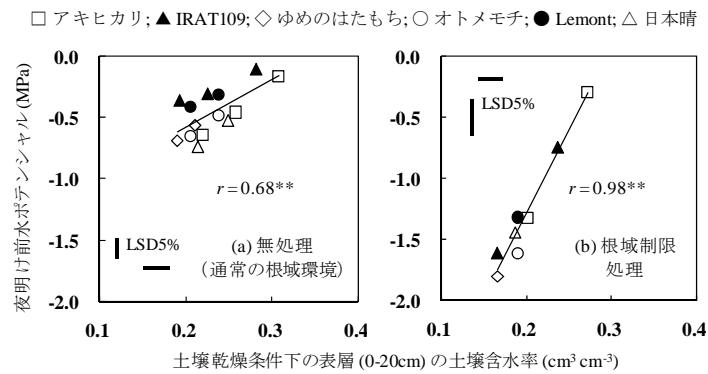
	1穂 生存 穎花数	相対 値 (%)	分化 1次 枝梗数	分化 2次 枝梗数	1次 枝梗 退化 (%)	2次 枝梗 退化 (%)
常時灌漑区						
IRAT109	230	(100)	17.8	45	0	18
Lemont	288	(100)	17.3	57	1	6
ゆめのはたもち	174	(100)	11.8	37	0	13
オトメモチ	174	(100)	13.9	34	0	11
アキヒカリ	173	(100)	14.3	31	0	3
LSD (5%)	43		1.7	7	NS	7
生殖成長初期土壤乾燥区						
IRAT109	167	(72)	16.6	42	9	39
Lemont	184	(64)	16.1	46	3	34
ゆめのはたもち	65	(38)	10.7	32	38	66
オトメモチ	63	(36)	12.0	30	28	76
アキヒカリ	57	(33)	13.1	28	38	77
LSD (5%)	30		1.1	6	9	19

育を比較した（第1図）。根域制限処理では土壤乾燥下の体内水分状態には茎葉部の生育量、すなわち蒸散量の違いがもたらす表層の土壤水分量の差異が植物体の水分状態に強く関係していたが、無処理ではこれに加えて深根発達量も関係することが示された（第2図）。また、“上げ床”処理では土壤表層が無処理に比べ乾燥しやすく、根の浅い水稻品種の穂重は他の品種より著しく小さくなった（第3図）。これらの結果は、畑条件下の脱水回避性と生産安定性の向上において深根発達の重要性を示すものと考えられた（8）。

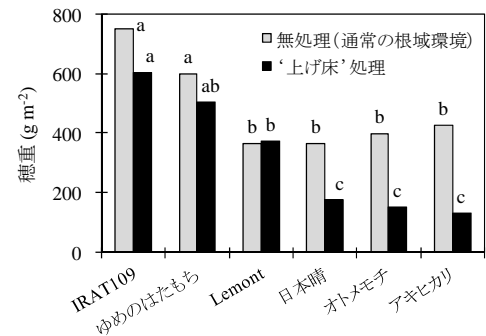
これらを踏まえ、深根形成を改良する耕種技術について検討し、深耕施肥法はイネの深根発達を促進し、高生産性陸稲栽培システムの生産安定性を高めることを示した（9）。



第1図. 根域制限処理(a; 雨よけハウス内)および“上げ床”処理(b; 天水圃場)の模式図. 根域制限処理では根系は深さ25cmに制限される.“上げ床”処理では砂利層によって下層からの水分供給が制限され土層が乾きやすくなる。



第2図. 生殖生長初期の土壤乾燥条件における、表層(0-20cm)の土壤含水率とイネ品種の夜明け前葉身水ポテンシャルの関係。(a)は無処理、(b)は根域制限処理。



第3図. 天水畑条件における成熟期穂重. 図中のアルファベットは同一処理区における多重比較(LSD法)の結果を表し、同じアルファベットでは有意差が認められないことを示す。

### 高生産性陸稲栽培システムにおいて多収性と耐乾性の両立は可能か？

高生産性陸稲栽培用の品種改良においては多収性と耐乾性のいずれも重要になるため、これらの両立が必須であると考えられた。しかしながら、両者ともに量的形質であり、多くの遺伝的要因に支配されていることが予想された。そこで、アキヒカリ×IRAT109 戻し交雑由来組換え近交系 106 系統（東京大学・根本圭介教授育成）を2段階の灌漑条件（常時灌漑および生殖生長初期灌漑制限）の畑で栽培し、量的形質遺伝子座（QTL）解析により、関与する遺伝子座の検出を試みた（10）。その結果、穂形質に関する QTL は6つのクラスター領域として検出され、それらは常時灌漑処理（5 領域）あるいは灌漑制限処理（1 領域）に特異的であった。灌漑制限処理に特異的なクラスター領域（RM7383-RM243）には、同一の近交系統で冠根長の QTL が検出されており、畑条件下の耐乾性に対する深根の関与が QTL レベルでも確認された。一方、常時灌漑処理に特異的なクラスター領域の1つ（RM3421-RM213）では1穂穎花数および収量の QTL が同時に検出され、この QTL は1穂穎花数の増加を介して多収性に関与することが示された。興味深いことにこの QTL は灌漑制限下で収量抑制には作用していなかった。これらの解析によって、多収性と耐乾性の各々の性質に関与する QTL を同一のゲノムに集積することで、耐乾性と多収性を具備する高生産性陸稲栽培用の新系統育成が可能であることが示唆された。

## さいごに

稲作技術の発展の過程で、我々は、灌漑水稻栽培システムという生産安定性に優れた耕地生態系を築き上げてきた。しかし今世紀にはいり、世界各地の稲作地帯で水資源環境が急激に変化しており、稲作技術も新たな適応が求められている。連作障害を回避する作付体系の解明などいくつかの課題が依然残されているが、本研究によって、水資源環境の持続性と人類の食糧生産活動の高度な調和を実現する新たな栽培システムとして高生産性陸稲栽培が有望であることが示されたと考えている。今後、中国や東南・南アジアなど、農業に利用可能な水資源の不足から水資源を効率的に活用する稲作技術の開発が緊急に求められる地域の研究者らと連携し、農学分野での国際研究協力を積極的に進めていきたい。

## 謝 辞

一連の研究は東京大学大学院農学生命科学研究科附属農場において行われたものであり、試験の実施にあたり、同農場技術職員の市川健一郎氏・曾我竜一氏・矢津田啓介氏をはじめ多くのスタッフに御協力を戴きました。データ収集・解析と取りまとめに際して、東京大学の山岸順子准教授、鴨下颯彦准教授、根本圭介教授ならびに阿部淳博士に御指導・御協力を戴きました。また、大阪府立大学の原田二郎名誉教授、クイーンズランド大学（オーストラリア）の深井周教授、茨城県農業総合研究センターの平山正賢氏ならびに眞部徹氏より懇切なる御助言を戴きました。最後に、本研究に御理解を戴き、農学進歩賞に御推薦いただいた日本作物学会および東京大学大学院農学生命科学研究科と、関係する諸先生方に心より感謝申し上げます。

## 引用文献

1. **Kato Y, Kamoshita A, Yamagishi J, Abe J.** 2006. Growth of three rice (*Oryza sativa* L.) cultivars under upland conditions with different levels of water supply. 1. nitrogen content and dry matter production. *Plant Production Science* **9**, 422-434.
2. **Kato Y, Kamoshita A, Yamagishi J.** 2006. Growth of three rice (*Oryza sativa* L.) cultivars under upland conditions with different levels of water supply. 2. grain yield. *Plant Production Science* **9**, 435-445.
3. **Kato Y, Okami M, Katsura K.** 2009. Yield potential and water use efficiency of aerobic rice (*Oryza sativa* L.) in Japan. *Field Crops Research* **113**, 328-334.
4. **Kato Y, Kamoshita A, Yamagishi J.** 2008. Preflowering spikelet abortion reduces spikelet number in rice (*Oryza sativa* L.) under water stress. *Crop Science* **48**, 2389-2395.
5. **Kato Y, Abe J, Kamoshita A, Yamagishi J.** 2006. Genotypic variation in root growth angle in rice (*Oryza sativa* L.) and its association with deep root development in upland fields with different water regimes. *Plant and Soil* **287**, 117-129.
6. **Kato Y, Abe J, Kamoshita A, Yamagishi J.** 2007. Varietal differences in stem diameter and rooting number of phytomers in conjunction with root system development of field-grown rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Production Science* **10**, 357-360.
7. **Kato Y, Kamoshita A, Yamagishi J, Imoto H, Abe J.** 2007. Growth of three rice (*Oryza sativa* L.) cultivars under upland conditions with different levels of water supply. 3. root system development, soil moisture change and plant water status. *Plant Production Science* **10**, 3-13.
8. **Kato Y, Kamoshita A, Yamagishi J.** 2007. Evaluating the resistance of six rice cultivars to drought: restriction of deep rooting and the use of raised beds. *Plant and Soil* **300**, 149-161.
9. **Kato Y, Kamoshita A, Abe J, Yamagishi J.** 2007. Improvement of rice (*Oryza sativa* L.) growth in upland conditions with deep tillage and mulch. *Soil & Tillage Research* **92**, 30-44.
10. **Kato Y, Nemoto K, Yamagishi J.** 2009. QTL analysis of panicle morphology response to irrigation regime in aerobic rice culture. *Field Crops Research* **114**, 295-303.