

機関番号：12601
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20780010
 研究課題名（和文）節水と多収を高度に両立させるイネ畑栽培技術の開発と根系の役割に関する研究
 研究課題名（英文）Development of water-saving aerobic rice culture: evaluation of the role of root growth
 研究代表者
 加藤 洋一郎 (KATO YOICHIRO)
 東京大学・大学院農学生命科学研究科・助教
 研究者番号：50463881

研究成果の概要（和文）：本研究では、水資源を大幅に節約する新技術“エアロビック・ライス法”と呼ばれるイネの節水栽培法において、収量の更なる向上を目指した。その結果、エアロビック・ライス法においても慣行の灌漑水田作と同水準の収穫量が可能で、多収性品種を用いれば10t/ha超の収量をあげることを確認した。しかしエアロビック・ライス法では根系発達が著しく抑制されるため、植物体が脱水症を示しやすい栽培法であることも明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to enhance grain yield under newly developed water-saving rice cultivation, namely ‘aerobic rice culture’. While reducing the water input to the paddy field by over 50%, attainable rice yield in aerobic culture was comparable to that in conventional flooded culture (> 10 t/ha). However, this water-saving cultivation was more likely to induce plant internal water deficit as it considerably restricted the root system development.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：作物栽培学

科研費の分科・細目：農学 ・ 作物学・雑草学

キーワード：イネ・節水栽培・多収性・根系

1. 研究開始当初の背景

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。そのひとつに、農業用水不足への対応が挙げられる。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、工業用水や生活用水として都市部における水資源の需要が増大していることから、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。さらに、地球温暖化の影響により世界各地で水不足がこれまで以上に深刻化する可能性があり、食糧安全保障と水資源保全の両立は今日の世界の農業生産における最重

要課題である。稲作は他の作物栽培に比べても非常に多くの農業用水を必要とするため、水資源環境の持続性に配慮した新しい稲作技術の確立が不可欠である。このような背景から、農業用水の節約に関する研究は世界中の農学者にとってホットトピックとなっている。

数多く提案されている節水灌漑技術の中で、現在最も注目されているのは、慣行の稲作からの応用が容易な“間断灌漑法（AWD法）”と、灌漑用水量の節減を最大限に追求した“エアロビック・ライス法”の2つである。前者は、田んぼに水を張りっぱなしにするのではなく、水が無くなって始めて再び水

を田んぼに張る、一度水を張ると水が無くなるまで水を注ぎ足さないという、極めて現実的な節水方法であるが、節減できる水使用量は10-20%にとどまってしまう。一方、後者は文字どおり、フィールドに水を張ることすらやめて、イネを有酸素状態で生育させる。一貫して畑状態の土壌でイネを栽培することで、これまでの灌漑稲作と比較して水資源の消費量を50-70%減らすことを狙ったものである。

しかし、一般には資源投入量と作物生産量にはトレードオフの関係が存在し、灌漑用水量を意識して灌漑を控えていくとイネの生長や収量が犠牲になりやすい。とりわけイネは他の主要作物に比較して土壌乾燥に弱いため、エアロビック・ライス法のようにフィールドに水を張らずに多収穫を実現することは決して容易ではない。そのため、1)水を張らないエアロビック・ライス法でも、これまでの灌漑稲作並みの高水準の生産量を達成することは可能かどうか、2)節水に伴う一時的な土壌乾燥に対して、生産量の安定性はどこまで維持できるか、の2点を明らかにする必要がある。また、エアロビック・ライス法で高い生産量を達成するために、また生産安定性を高めるために、イネをどのように改良すべきか、を明らかにすることは節水効率の向上における重要な課題となる。

2. 研究の目的

本研究では、1)エアロビック・ライス法におけるイネの潜在的な生産力、および2)エアロビック・ライス法におけるイネの生産安定性を評価することを目的とした。さらに生産安定性を詳細に解析するため、畑状態の土壌や土壌水分変動に対するイネの根系生長応答と植物体の水吸収の応答を精査することも合わせて本研究の目的とした。

3. 研究の方法

(1) エアロビック・ライス法におけるイネの潜在的な生産力の評価

東京大学大学院農学生命科学研究科附属生態調和農学機構（東京都西東京市）および京都大学大学院農学研究科附属農場（大阪府高槻市）においてイネの栽培試験を2カ年（2007年、2008年）実施した。慣行水田（常時湛水条件）とエアロビック・ライス法において、タカナリ（インド型多収性品種）・アキヒカリ（日本型多収性品種）・IRAT109（日本型陸稲品種、耐乾性強）・Lemont（日本型直播向け品種）を供試し、イネの収量、農業関連形質および乾物生長に関する解析を行った。エアロビック・ライス法ではイネを畑条件で栽培し、適宜灌漑を行うことで強い干ばつストレスがかからないように管理した。

(2) エアロビック・ライス法の生産安定性におけるイネ根系生長の役割の評価

(1)の試験において、東京大学のフィールドでは、イネ栽培期間中に根系調査および気孔開度の調査を行った。

また、東京大学大学院農学生命科学研究科附属生態調和農学機構のフィールドに新たなエアロビック・ライス法の実験区を設け、生育期間中の根系生長、気孔伝導度および葉身水ポテンシャルを定期的に測定した（2008年、2009年）。これに合わせてポット試験を行った。オームの法則にならって、重量法による蒸散量計測から、湛水条件およびエアロビック（畑湿潤）条件下の植物体の水通導性を評価した（2010年）。

(3) エアロビック・ライス法に適したイネの遺伝的改良に関する予備評価

高度戻し交配によって育成されたIR64由来イネ染色体断片挿入系統群（IRRI-Japanプロジェクトによる育成系統で、グラフ遺伝子型が解析済み）全334系統のうち、予備試験によってエアロビック・ライス法への適性が高いと推察された系統（12系統）を供試材料に用いた。慣行水田とエアロビック・ライス法におけるイネ生産力および生産安定性の評価を国際稲研究所（フィリピン）、東京大学大学院農学生命科学研究科附属生態調和農学機構、京都大学大学院農学研究科附属農場の3地点で行った（2008-2010年）。

4. 研究成果

(1) エアロビック・ライス法におけるイネの潜在的な生産力

標準的な水稻品種でも、エアロビック・ライス法の収量は慣行の灌漑稲作と同等で、フィールドに投入された水資源投入量あたりの収穫量は慣行栽培に比べて最大で2倍以上となった。つまり、エアロビック・ライス法では収量を維持したまま、節水効率を大幅に改善できることがわかった。さらに、収量水準が非常に高い品種（タカナリ）を用いて栽培試験を行ったところ、今日の最高収量水準とされる、10 t/haを超える収量をエアロビック・ライス法で達成した（日本の平均籾収量 [約 6.6 t/ha トン] の1.5倍）。さらに、同様のフィールド試験を、土壌の母材や気象条件が異なる京都大学農学部附属農場において実施しても、やはり同じ試験結果が得られた（第1・2表）。そこでイネの生長諸過程を解析したところ、エアロビック・ライス法では、養分吸収量が高まることによって、バイオマス生産量も高くなり、その結果

第1表. エアロビク・ライス法および慣行水田におけるイネの収量(面積あたり収穫量; t ha⁻¹).

	東京大学		京都大学	
	2007年	2008年	2007年	2008年
エアロビク・ライス法				
タカナリ	6.6	10.6	11.4	11.3
アキヒカリ	7.4	8.7	6.6	7.3
IRAT109	7.9	9.0	7.2	9.4
Lemont	8.1	9.0	7.7	9.8
LSD (5%)	0.5	0.7	0.8	1.9
品種平均	7.5	9.3	8.2	9.4
慣行水田				
タカナリ	9.7	11.0	10.8	11.5
アキヒカリ	7.5	8.0	7.4	7.3
IRAT109	7.3	6.8	7.5	7.4
Lemont	7.0	6.8	6.4	7.0
LSD (5%)	0.6	0.7	0.7	0.6
品種平均	7.9	8.2	8.0	8.3

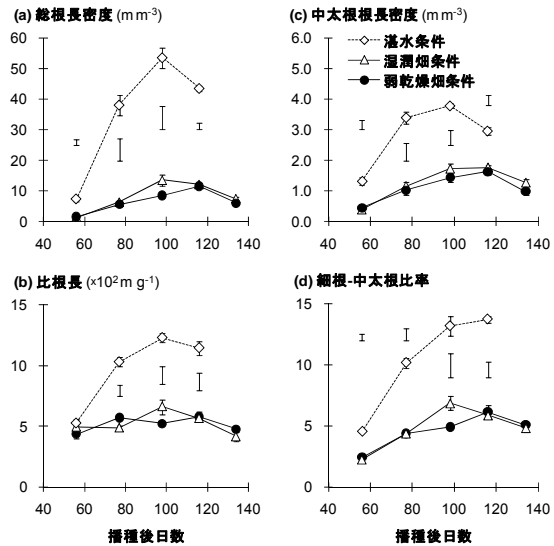
収量は、水分14%ベースの精籾収量を表記した。

第2表. エアロビク・ライス法および慣行水田におけるイネの水生産性(水資源投入量あたり収穫量; kg m⁻³).

	東京大学		京都大学	
	2007年	2008年	2007年	2008年
エアロビク・ライス法				
タカナリ	0.65	0.82	1.25	0.86
アキヒカリ	0.89	0.72	0.84	0.64
IRAT109	0.90	0.75	0.89	0.82
Lemont	0.91	0.71	0.85	0.81
LSD (5%)	0.05	0.06	0.09	NS
品種平均	0.84	0.75	0.96	0.78
慣行水田				
タカナリ	0.28	0.34	-	0.73
アキヒカリ	0.22	0.26	-	0.49
IRAT109	0.21	0.22	-	0.50
Lemont	0.20	0.21	-	0.45
LSD (5%)	0.02	0.02	-	0.04
品種平均	0.23	0.26	-	0.54

多くの籾数を確保することができ、高収量が達成されることが明らかとなった。以上のことから、先ほどの第1の論点は問題なくクリアされる、すなわち、水を張っていない畑状態の土壌でも、イネの潜在的な生産力自体は慣行の灌漑稲作(湛水)に劣るものではないと結論された。これまで世界各地でエアロビク・ライス法のイネの生産力に関する研究が行われてきたが、このような高い収量をあげた報告例は稀である。このことは、栽培管理を立地環境条件に合わせて工夫していくことで、エアロビク・ライス法によって節水を図りながら同時に生産力を高める余地が十分に存在することを意味する。

(2) エアロビク・ライス法の生産安定性

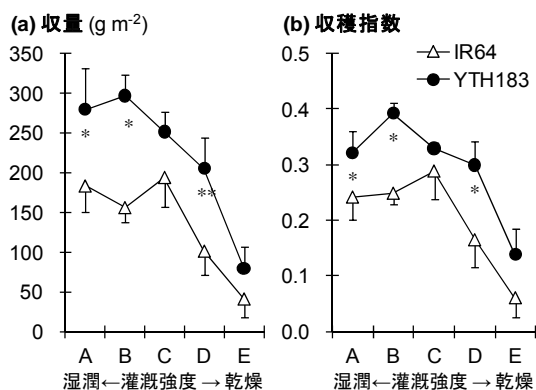


第1図. エアロビク・ライス法および慣行水田における総根長密度(a)、比根長(根長/根重)(b)、中太根(根径>0.2 mm)根長密度(c)および細根-中太根根長比率(d)の推移(平均値±標準誤差、2009年)。バーはLSDを表す(P=0.05)。

におけるイネ根系生長の役割の評価

エアロビク・ライス法では潜在的な生産力が十分に高いものの、生産安定性は慣行の灌漑稲作より低いことが明らかとなった。また、エアロビク・ライス法では収量が投入された水資源量の影響を強く受けていたため、生産性を損なわずに農業用水利用の節約を進めるには、品種改良によって土壌乾燥下の生産力を向上させることが必要と考えられた。この不安定な生産性は、節水管理によって生じる土壌水分の変動、あるいは水を張らないこと(=エアロビク状態)に対するイネの根系生長と水吸収の応答に起因すると推察された。

そこでイネの根系生長を精査したところ、エアロビク・ライス法ではイネの根の生長量、とくに養水分吸収の主な担い手とされる細根の生長量が著しく抑制されることが明らかとなった。節水レベルが高まるにつれ、土壌乾燥が強まってこの傾向が顕著になるが、ごく頻りに水を与えて土壌乾燥を防いだ処理区でも、水を張らない状態ではイネの根の生長量は低下することが明らかとなった(第1図)。そして、根生長量の低下はイネ植物体全体の水通導性の低下を招いており、その結果、晴天時の日中には植物体の葉身水ポテンシャルが有意に低下することが明らかとなった。さらに、根生長量が少ないだけでなく、根系分布もエアロビク・ライス法では重要であることが示唆された。すなわち、土壌深層の根生長量が少ない品種は、エアロビク・ライス法において降水や灌漑の直前に起こる一時的な土壌乾燥の影響を強く受



第2図. エアロビク・ライス法における異なる水準の灌漑がIR64およびイネ染色体断片挿入系統(YTH183)の収量(a)および収穫指数(b)に及ぼす影響。バーは標準誤差を表す(n=4)。

けていることが示唆された。これらの結果から、エアロビク・ライス法に適した系統育成に関して、エアロビク状態でも冠根発育や側根発生の旺盛な系統、また深根生長量が多い系統の有利性が推察された。

(3) エアロビク・ライス法に適したイネの遺伝的改良に関する予備評価

天水栽培条件とは異なり、エアロビク・ライス法に適したイネの遺伝的改良では、生産安定性だけでなく、高い収量性が重要な性質となる。IR64由来イネ染色体断片挿入系統を評価した結果、戻し交雑親のIR64よりも、慣行水田での収量が平均で26%高く、かつエアロビク・ライス法における節水処理区において収量が92-102%高い系統(YTH183)を同定した(第2図)。この系統は、千粒重が高いことによって収量キャパシティを増大させていた。このため、乾物重はIR64と同等であったが収穫指数が高まることによって収量性の向上が達成された。また、この系統は畑条件下、さらには土壌乾燥下の深根生長量がIR64よりも顕著に多く、このことによってエアロビク・ライス法における一時的な乾燥下でも葉身水ポテンシャルや気孔コンダクタンスを高く維持していることが明らかとなった(データ省略)。供試系統のグラフ遺伝子型を比較した結果、収量キャパシティ増大に関する染色体領域と深根生長量に関する染色体領域は異なっており、YTH183では戻し交雑の過程で双方に関する遺伝子領域が偶然同一のゲノムに集積・保存されていたことが推察された。今後、DNAマーカー情報を利用して収量性と生産安定性に関する遺伝子を計画的に集積するゲノムデザイン育種によって、エアロビク・ライス法に適した系統の育成が効率よく迅速に進められることが期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

1. Kato Y, Okami M. 2011. Root morphology, hydraulic conductivity and plant water relations of high-yielding rice grown under aerobic conditions. *Annals of Botany* (印刷中)
2. Kato Y, Henry A, Fujita D, Kobayashi N, Serraj R. 2011. Physiological characterization of introgression lines derived from an indica rice cultivar, IR64, adapted to drought and water-saving irrigation. *Field Crops Research* (印刷中)
3. Kato Y, Okami M, Tajima, R, Fujita, D, Kobayashi, N. 2010. Root response to aerobic conditions in rice, estimated by Comair root length scanner and scanner-based image analysis. *Field Crops Research* **118**, 194-198.
4. Kato Y, Katsura K. 2010. Panicle architecture and grain number in irrigated rice grown under different water management regimes. *Field Crops Research* **117**, 237-244.
5. Katsura K, Okami M, Mizunuma H, Kato Y. 2010. Radiation-use efficiency, N accumulation and biomass production of high-yielding rice in aerobic culture. *Field Crops Research* **117**, 81-89.
6. Kato Y, Okami M. 2010. Root growth dynamics and stomatal behaviour of rice (*Oryza sativa* L.) grown under aerobic and flooded conditions. *Field Crops Research* **117**, 9-17.
7. 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.

[学会発表] (計7件)

1. 加藤洋一郎 2011. 畑条件における多収性イネの根系発達および水吸収能力. 日本作物学会紀事 80(別1):30-31.
2. Kato, Y. and K. Katsura 2010. Ecophysiological determinants of grain number in rice grown under water-saving management. In: Proceedings of the 11th ESA Congress "AGRO2100", 29 August - 3 September 2010, Montpellier, France, pp 679-680.
3. Kato, Y., Katsura, K., Fujita, D., Henry, A., Kobayashi, N. and R. Serraj 2010. Aerobic rice culture for adaptation to water scarcity

- in irrigated rice production. In: Proceedings of The 3rd International Rice Congress, 8-12 November 2010, Hanoi, Vietnam, pp 111.
4. 加藤洋一郎・桂圭佑 2010. 畑栽培におけるイネ (*Oryza sativa* L.) の多収性に関する研究 3. 地下部の生長動態の解析. 日本作物学会紀事 79(別 1):224-225.
 5. Kato, Y., Okami, M., Yamagishi, J., Abe, J., Nemoto, K., Kamoshita, A., Katsura, K., Hirayama, M. and T. Manabe 2009. Adaptation of rice to uplands in the temperate monsoon region in Japan. In: Proceedings of The 3rd International Conference on Integrated Approaches to Improve Plant Production under Drought-Prone Environments "InterDrought-III", 11-16 October 2009, Shanghai, China, pp 15.
 6. 加藤洋一郎・桂圭佑 2009. ストレス環境における作物の安定多収栽培技術 — イネの畑栽培研究から見えること —. (日本育種学会・日本作物学会 合同講演会シンポジウム講演) 育種学研究 11(別 1):24-25.
 7. Kato, Y. and K. Katsura 2008. Comparison of vegetative growths between aerobic and lowland rice systems in the temperate regions. In: Proceedings of the 5th International Crop Science Congress, 13-18 April 2008, Jeju, Korea, pp 171.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

第 8 回 (2009 年) 日本農学進歩賞 受賞

「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」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 洋一郎 (KATO YOICHIRO)

東京大学・大学院農学生命科学研究科・助教

研究者番号 : 5 0 4 6 3 8 8 1

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者