

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 基盤研究(B)  
 研究期間： 2007 ～ 2009  
 課題番号： 19380011  
 研究課題名(和文) 土壌水分変動条件に対するイネの適応反応に関わる形質の同定  
 研究課題名(英文) Identification of traits responsible for plant adaptation to soil moisture fluctuation in rice

## 研究代表者

山内 章 (YAMAUCHI AKIRA)  
 名古屋大学・大学院生命農学研究科・教授  
 研究者番号：30230303

研究成果の概要(和文)：世界のイネ栽培において、生産性の向上にとって最も大きな制限要因になっているのが、水ストレスである。具体的には、陸稲栽培(畑)では乾燥ストレスが、雨水に依存した天水田や、節水栽培技術を導入した灌漑水田においては、土壌水分変動が生育を抑制するストレス要因として作用していることを見いだした。また、根系が発揮する発育的可塑性が、これらのストレス条件に対する適応にとって重要な役割を果たしていることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：For rice production in the world, the major constraint is water stress. Specifically, we found that drought in upland and the fluctuation between dry and wet in rainfed lowland and irrigated field with water saving technology like AWD, respectively, is the stress factor that limits the crop productivity. We further showed that the developmental plasticity exhibited by root system plays the key role in plant adaptation to such water stress conditions.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2008年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2009年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

## 研究分野：農学

科研費の分科・細目：農学・作物学・雑草学

キーワード：イネ、可塑性、乾燥ストレス、キャッサバ、コムギ、準同質遺伝子系統、染色体断片置換系統、根

## 1. 研究開始当初の背景

イネの成育や生産性を規定する最も基本的で重要な栽培生態的要因は、水環境である。水環境によってイネを分類すると、主要なも

のとしては、人為的に水環境が制御可能でイネの一生を通じて湛水条件下での栽培を基本とする灌漑イネ、灌漑設備がない水田で降雨に依存して栽培するため土壌水分が湛水

と乾燥の間を変動することが特徴の天水田イネ、降雨に依存した畑作で、イネの一生を通じて土壌が比較的酸化的状態にあるのが特徴である陸稲がある。

これらの中で、陸稲の一般的な栽培条件下では、いわゆる乾燥ストレスが主要な生産制限要因であり、その解析は比較的単純である。次に、天水田では、実は単純な乾燥ストレスではなく、土壌水分が空間的に不均一に分布する上に、時間的に変動することが栽培学的には重要な特徴であることを代表者らは明らかにしてきた。言うまでもなく、イネは基本的には湿性環境に適応しているが、一方ある程度の乾燥ストレスに対して耐性を示す系統も存在し、そのためのさまざまな機構を具備している。一方、嫌気と乾燥との間の変動条件は、単なる乾燥、あるいは嫌気ストレスとは比べものにならないほど、イネにとって厳しいストレス要因として働いていることも、代表者らの詳細な研究で明らかになりつつある。

さらに灌漑イネについては、世界的な水資源の不足に備え、節水栽培技術の確立が焦眉の課題になっている。これまでにいくつかの技術体系が提案されてきているが、基本的な共通するコンセプトとしては、湛水状態を生育期間中継続させるのではなく、程度や頻度は異なるものの作物体に水ストレスをかけないように水を落として、灌漑水量を減らすというものである。しかし、いずれも従来の湛水栽培に比べて、収量が漸減するという問題が克服されていない。

この原因については、とくに養分の溶脱や有機物の分解などの側面から調べられているが、その解明には至っていない。仮に土壌の理化学性が問題であるなら、対策は技術的には可能である。しかし、実際はもっと根本的なところで原因があるのではないかと代表者らは考えた。つまり、節水栽培条件下では、土壌水分は、乾燥と湿潤（様々な程度の嫌気）条件の間を変動することになり、天水田と類似のストレス要因が人工的に生成されているのではないかと考えた。

つまり、今後、栽培環境に応じてイネ生産を持続的に維持、発展させていくためには、このような水分変動も含めた、実際の栽培圃場で起こることが観察されている様々な土壌水分条件に対して、イネが適応するための形質の同定とそれを具備する品種の育成が鍵になると考えて、育種への具体的な発展方向も視野に入れた本研究を企図した。

## 2. 研究の目的

本研究では、乾燥ストレス、および乾燥-嫌気条件間を変動するストレス条件に対するイネの成育反応を調べることにより、それらへの適応のために、イネが具備すべき形質

を同定することを主要な目的とした。とくに、代表者の研究チームが注目してきた、根系の発育的可塑性に注目した。そのために、日本晴/カサラス染色体部分置換系統群や戻し交雑自殖系統群の評価・選抜を行う。品種間差異の解析ではなく、これらの材料を用いて解析することにより、他の染色体領域の影響を極力排除した状態での形質評価が可能となる。加えて、今後の耐性品種育成にとって重要となる、根系の可塑性を始めとする同定形質の生理的メカニズムを解明し、その形質を支配する遺伝子の座乗候補領域を限定することを旨とした。

## 3. 研究の方法

### (1) 土壌水分制御圃場における有望系統の選抜

土壌水分制御圃場において、いくつかの有望系統を用いて種々の乾燥ストレスや水分変動に対する反応性を解析することにより、日本晴と異なった成育を示す系統を選抜した。成育期間中に発育パラメータ（草丈、分けつ数、葉面積、葉数、乾物重）と葉身水ポテンシャル、気孔伝導度、光合成速度の測定により評価した。その結果、選抜された系統に関しては、根系の発育（節根、側根の長さや発生密度）を精査した。

### (2) 準同質遺伝子系統の作出

これまでに、有望系統に日本晴を戻し交雑し、F<sub>2</sub>種子を得、このF<sub>2</sub>世代の各個体について、水ストレスに対する反応性を評価するとともに、分子マーカーによる各個体の遺伝子型の決定を行った。このデータをもとに、準同質遺伝子系統化をさらに進めていく上で重要な個体を選抜した。

### (3) 他の遺伝資源を対象にした圃場試験による有望系統の選抜

国際イネ研究所等において所有している遺伝資源について、土壌水分ストレスに対する反応評価をした。

### (4) 他作物種の土壌水分ストレスに対する反応評価

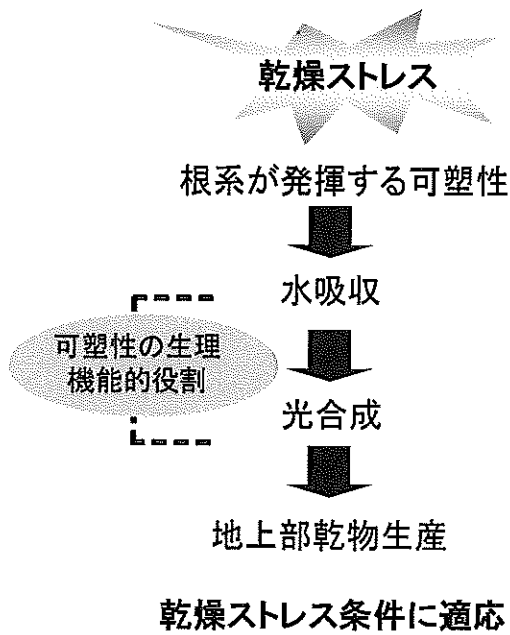
イモ類（キャッサバ）についての従来の研究成果についてまとめ、また、コムギについても同様な調査を進め、関連形質についてイネと比較することによって、その役割についてさらに深く検討した。

## 4. 研究成果

### (1) 根系可塑性の機能的役割の実証

日本晴/カサラス染色体断片置換系統群において、乾燥ストレス条件下で可塑性を発揮する系統として選抜した50番と、乾燥-嫌気条件間を変動するストレス条件下で可塑性を発揮する系統として選抜した47番は、根系の発育する可塑性によって養水分吸収、光合成、乾物生産が促進されることを定量的

に示した (第1図)。



第1図 根系の可塑性が乾燥ストレス条件に対する適応に果たす役割の概念図

また、土壤水分によって発揮されるこの可塑性は、土壤養分との間に相互作用を示し、養分ストレス条件下では、可塑性の能力は十分に発揮されないことが明らかとなった。

#### (2) 準同質遺伝子系統の作出

上記の有望系統47番ならびに50番に日本晴を戻し交雑し、そのF1種子を人工気象室にて育成したF2 (BC1F2) 世代の各個体について、水ストレスに対する反応性を評価するとともに、分子マーカーによる各個体の遺伝子型の決定を進め、このデータをもとに、系統47番と50番の準同質遺伝子系統化をさらに進めた。

#### (3) 他の遺伝資源を対象にした圃場試験による有望系統の選抜

国際イネ研究所において所有している遺伝資源 (IR64 とその準同質遺伝子系統群、Oryza SNP panel) について、土壤水ストレスに対する乾物生産を指標とした地上部成長ならびに根系発育反応を、円筒容器ならびに圃場において評価し、これらにおいても、根系の可塑性が地上部生育に貢献していることを見出した。

さらに、イネコアコレクション (農業生物資源ジーンバンク - NIAS コアコレクション) についても評価し、やはり根系の可塑性が重要形質であることを明らかにした。

#### (4) 他作物種の土壤水分ストレスに対する反応評価

キャッサバの乾燥ストレス耐性にとって、不定期な降雨による土壤水分を効率的に利用するための根系構造、すなわち水平方向へ

の広がりを維持する不定根の伸長能力とそれらの分枝能力 (可塑性) が重要であることを見いだした。また、コムギについても過湿を含む土壤水分ストレス条件下での生産における根系の役割に関する調査を進め、とくに過湿条件下での節根発生能力ならびにそれらの通気組織形成量能力が耐湿性の鍵であることを明らかにした。

#### 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9件)

- ① Suralta, Roel Rodriguez, Inukai, Yoshiaki and Akira Yamauchi, Dry matter production in relation to root plastic development, oxygen transport and water uptake of rice under transient soil moisture stresses, *Plant and Soil*, DOI: 10.1007/s11104-009-0275-8, 2010、査読有
- ② Wang, H., Siopongco, J. D. L. C., Wade, L. J. and Yamauchi, A., Fractal Analysis on Root Systems of Rice Plants in Response to Drought Stress, *Environmental and Experimental Botany*, 65巻、338-344, 2009、査読有
- ③ Subere, J. O. Q., Bolatete, D, Bergantin, R., Pardales, A., Belmonte, J. J., Mariscal, A., Sebidos, R. and Yamauchi, A., Genotypic Variation in Responses of Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) to Drought and Rewatering: Root System Development, *Plant Production Science*, 12巻、462-474, 2009、査読有
- ④ Siopongco, J. D. L. C., J, Sekiya, K., Yamauchi, A., Egdane, J., Ismai, A. M. and Wade, L. J., Stomatal Responses in Rainfed Lowland Rice to Partial Soil Drying; Comparison of Two Lines., *Plant Production Science*, 12巻、17-28, 2009、査読有
- ⑤ Suralta, R. R., Inukai Y. and Yamauchi, A., Utilizing chromosome segment substitution lines (CSSLs) for evaluation of root responses under transient moisture stresses in rice., *Plant Production Science*, 11巻、457-465、2008、査読有
- ⑥ Suralta, R.R. and Yamauchi, A., Root growth, aerenchyma development, and oxygen transport in rice genotypes subjected to drought and waterlogging, *Environmental and Experimental Botany*, 64巻、75-82, 2008、査読有
- ⑦ Suralta, R. R., Inukai, Y. and Yamauchi,

A., Genotypic variations in responses of lateral root development to transient moisture stresses in rice cultivars, Plant Production Science, 11巻、324-335、2008、査読有

- ⑧ Siopongco, J. D. L. C., K. Sekiya, A. Yamauchi, J. Egdane, A. M. Ismail and L. J. Wade, Stomatal Responses in Rainfed Lowland Rice to Partial Soil Drying; Evidence for Root Signals, Plant Production Science, 11巻、28-41、2008、査読有
- ⑨ Kanou, M., Y. Inukai, H. Kitano and A. Yamauchi, Identification of key root traits for adaptation of rice genotypes to various intensities of water stress, Proceedings of The 2nd International Conference on Rice for the Future, 216-220、2007、査読無

[学会発表] (計 32 件)

- ① 武田 萌, 犬飼義明, 狩野麻奈, 山内章, イネ染色体断片置換系統群を用いた乾燥ストレスに対して発揮される根系発育の可塑性発現程度に窒素施肥量が及ぼす影響評価、日本作物学会第 229 回講演会、2010 年 3 月 30 日、宇都宮大学農学部
- ② Jonathan Manito Niones, Yoshiaki Inukai and Akira Yamauchi, Functional roles of root plasticity in yield and shoot dry matter production of rice under continuous cycle of transient soil moisture fluctuation stress in field, 日本作物学会第 229 回講演会、2010 年 3 月 30 日、宇都宮大学農学部
- ③ 狩野麻奈, 犬飼義明, 小林伸哉, Serraj Rachid, 山内章, R64 準同質遺伝子系統を用いた乾燥ストレス後の再灌水に対して発揮される根系の可塑的発育反応が水吸収ならびに地上部乾物生産に果たす役割評価、日本作物学会第 229 回講演会、2010 年 3 月 30 日、宇都宮大学農学部
- ④ 中村真也・出口 崇・木富悠花・山内章・犬飼義明、オーキシンによるイネ側根メリステムサイズの制御、第 31 回根研究集会、2009 年 11 月 21 日、秋田県立大学秋田キャンパス
- ⑤ 林 智仁・吉田朋史・藤井 潔・辻 孝子・山内 章、過湿ストレスに対する根の発育的可塑性がコムギ耐湿性に果たす役割、第 31 回根研究集会、2009 年 11 月 21 日、秋田県立大学秋田キャンパス
- ⑥ Akira Yamauchi, Responses in plastic root system development and dry matter production to different drought intensities for genotypes from OryzaSNP panel、第 3 回旱魃下の作物生産改良のた

めの統合的アプローチ国際会議サテライトワークショップ、2009 年 10 月 17 日、ViVASHa Resort Hotel (中国・上海)

- ⑦ Akira Yamauchi, Plastic root system development and its contribution to plant growth under drought stress in chromosome segment substitution lines in rice、第 3 回旱魃下の作物生産改良のための統合的アプローチ国際会議、2009 年 10 月 13 日、ViVASHa Resort Hotel (中国・上海)
- ⑧ 林智仁・吉田朋史・藤井潔・辻孝子・山内章、過湿条件下におけるコムギの根通気組織形成が根系機能の維持ならびに収量形成に果たす役割、日本作物学会第 228 回講演会、2009 年 9 月 30 日、静岡県コンベンションアーツセンター
- ⑨ 犬飼義明・出口 崇・戸松宏明・狩野麻奈・Roel R. Suralta・Jonathan M. Niones・武田 萌・木富悠花・北野英己・山内 章、天水田での収量安定性を目指した根系形態改良の試み、第 30 回根研究集会、2009 年 5 月 9 日、ネイバル足寄 (北海道)
- ⑩ 林智仁・吉田朋史・藤井潔・辻孝子・山内章、耐湿性の異なるコムギ品種間の嫌気条件下における通気組織形成とその酸素輸送能力の比較、日本作物学会第 227 回講演会、2009 年 03 月 28 日、つくば国際会議場エポカルつくば
- ⑪ 狩野麻奈・犬飼義明・山内章、イネ染色体部分置換系統群を用いた乾燥ストレス下の地上部乾物生産における根系の発育的可塑性の機能的役割に関する評価、日本作物学会第 227 回講演会、2009 年 03 月 28 日、つくば国際会議場エポカルつくば
- ⑫ Jonathan M. Niones・Roel R. Suralta・犬飼義明・山内章、イネ染色体部分置換系統群を用いた土壌水分変動条件下での乾物生産ならびに収量における根系の可塑的発育の機能的役割に関する圃場における評価、日本作物学会第 227 回講演会、2009 年 03 月 28 日、つくば国際会議場エポカルつくば
- ⑬ 杉浦和彦・林元樹・野々山利博・久野智香子・山内章、高温登熟条件下におけるコシヒカリの外観品質と玄米タンパク質含量との関係、日本作物学会第 227 回講演会、2009 年 03 月 28 日、つくば国際会議場エポカルつくば
- ⑭ 林元樹・谷俊男・遠藤征馬・杉浦和彦・久野智香子・田中雄一・山内章、深水無落水栽培が水稻品種「コシヒカリ」の生育と玄米外観品質に与える影響、日本作物学会第 227 回講演会、2009 年 03 月 28 日、つくば国際会議場エポカルつくば
- ⑮ 戸松宏明、狩野麻奈、北野英己、山内章、犬飼義明、イネインド型品種 KDML105 にお

- ける乾燥ストレス下での旺盛な冠根形成に関する QTL 解析、日本育種学会第 115 回講演会、2009 年 03 月 28 日、つくば国際会議場エポカルつくば
- ⑬ 出口崇、中村真也、山内章、犬飼義明、QTL 解析を通じたイネ根系形態改良の試み、日本育種学会第 115 回講演会、2009 年 03 月 28 日、つくば国際会議場エポカルつくば
- ⑭ 井上聖史・犬飼義明・山内章、イネ・コアコレクションを用いた土壌乾燥ストレスに対して根系が発揮する可塑性の地上部乾物生産における役割評価、第 29 回根研究集会、2008 年 11 月 7 日、千葉科学大学
- ⑮ 今泉俊輔・犬飼義明・荒木英樹・山内章、イネ根系の加齢に伴う、水通導性、気孔伝導度の変化ならびにそれらの種子登熟に果たす役割、第 29 回根研究集会、2008 年 11 月 7 日、千葉科学大学
- ⑯ 林 智仁・吉田 朋史・藤井 潔・辻 孝子・山内 章、過湿条件下におけるコムギの根系機能と光合成速度ならびに収量との関係、日本作物学会第 226 回講演会、2008 年 9 月 25 日、神戸大学農学部
- ⑰ 狩野 麻奈・Veeresh R. P. Gowda・小林 伸哉・Rachid Serraj・山内 章、IR64 準同質遺伝子系統を用いた根系の可塑的発育反応が土壌水分変動ストレス下におけるイネの地上部乾物生産に果たす役割の評価、日本作物学会第 226 回講演会、2008 年 9 月 25 日、神戸大学農学部
- ⑱ 出口 崇・Roel R. Suralta・中村真也・狩野麻奈・北野英己・山内 章・犬飼義明、土壌水分に根系形態が反応する上でどのような遺伝子が機能しているのか、第 28 回根研究集会、2008 年 5 月 10 日、秋吉台家族旅行村
- ⑲ Akira Yamauchi, Yoshiaki Inukai, Mana Kano, Roel Suralta, Atsushi Ogawa, Nobuya Kobayashi and Rachid Serraj, Role of roots for stabilizing rice production under water stress conditions, 第 5 回世界作物会議、2008 年 4 月 17 日、International Convention Center Jeju, Korea
- ⑳ Suralta, R. R., Inukai, Y. and Yamauchi, A., Contribution of developmental responses of root system of a rice chromosome segment substitution line to water uptake and shoot dry matter production under transient waterlogged to progressive drying soil conditions, 日本作物学会第 225 回講演会、2008 年 3 月 28 日、農林水産省農林水産技術会議事務局筑波事務所(つくば市)
- ㉑ 岡田友梨絵・吉田朋史・林 恵理子・藤井 潔・辻 孝子・山内 章、耐湿性の異なるコムギ品種間の過湿土壌条件下での根系発育と収量の比較、第 27 回根研究集会、2007 年 11 月 24 日、福島テルサ(福島市)
- ㉒ 今泉俊輔・犬飼義明・山内 章、イネにおける気孔伝導度の推移と根系発育との関係、第 27 回根研究集会、2007 年 11 月 24 日、福島テルサ(福島市)
- ㉓ 狩野麻奈・犬飼義明・巽 二郎・北野英己・山内 章、水ストレスがイネ器官間における 13C 自然存在比の分布に及ぼす影響、第 27 回根研究集会、2007 年 11 月 24 日、福島テルサ(福島市)
- ㉔ 山内 章、作物の根系構造と環境反応の機能的意義に関する研究、第 27 回根研究集会、2007 年 11 月 24 日、福島テルサ(福島市)
- ㉕ Roel Rodriguez Suralta, Yoshiaki Inukai and Akira Yamauchi, Evaluation of root traits for crop adaptation to fluctuating soil moistures by utilizing chromosome segment substitution lines (CSSL) in rice, 9th Conference of the International Society for Plant Anaerobiosis, 2007 年 11 月 20 日、ホテル大観荘(宮城郡松島町)
- ㉖ 狩野 麻奈, 犬飼 義明, 北野 英己, 山内 章、イネ染色体部分置換系統群を用いた、根系発育における可塑性に関わる遺伝子座の乾燥ストレス強度への依存性解析、日本作物学会第 224 回講演会、2007 年 9 月 27 日、金沢大学角間キャンパス総合教育棟(金沢市)
- ㉗ Roel Rodriguez Suralta, Yoshiaki Inukai, Hidemi Kitano and Akira Yamauchi, Responses in dry matter production, yield and their related developmental and physiological traits of rice genotypes to the cycle of waterlogging and drought under field conditions, 日本作物学会第 224 回講演会、2007 年 9 月 27 日、金沢大学角間キャンパス総合教育棟(金沢市)
- ㉘ Akira Yamauchi, Roles of roots in relation to crop adaptation to water stress, International Symposium on Root biology and MAS strategies for drought resistance improvement in rice, 2007 年 9 月 27 日、Doddys Resort (インド)
- ㉙ 出口 崇・狩野麻奈・Roel R. Suralta・北野英己・山内 章・犬飼義明、イネの側根形成に関わる QTL の同定と単離、第 26 回根研究集会、2007 年 5 月 12 日、九州沖縄農業研究センター久留米研究拠点(久留米市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山内 章 (YAMAUCHI AKIRA)

名古屋大学・大学院生命農学研究科・教授  
研究者番号：30230303

(2) 研究分担者

犬飼 義明 (INUKAI YOSHIAKI)

名古屋大学・大学院生命農学研究科・助教  
研究者番号：20377790

小川 敦史 (OGAWA ATSUSHI)

秋田県立大学・生物資源科学部・助教  
研究者番号：30315600