

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22405042

研究課題名(和文) 天水田イネ・陸稲における土壌ストレス要因と根系形質関連 QTL の相互作用評価

研究課題名(英文) Interaction of root-traits related QTL with soil stress factors in rainfed lowland and upland rice

研究代表者

山内 章 (Yamauchi, Akira)

名古屋大学・生命農学研究科・教授

研究者番号：30230303

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000 円、(間接経費) 4,050,000 円

研究成果の概要(和文)：フィリピン国内において未調査の、耐旱性に関わるイネ遺伝資源の広範な調査を行った。続いて、種々の水ストレス条件に対するイネの適応性において重要な役割を果たす根の形質として可塑性を同定し、その関連QTLを第6染色体上に同定した。さらに、各対象栽培地域における水ストレスの特徴を定点観測によって把握した上で、水ストレス条件の異なる地域での栽培試験を実施し、可塑性を有する品種/系統が、とくに土壌水分変動が特徴である、天水田で高い乾物生産を示すことを見出した。根の可塑性は土壌要因との間に強い相互作用を示し、また土壌硬度×土壌水分の相互作用が根系発達と吸水機能に強く影響を及ぼすことを定量的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Roots play important roles in crop adaptation to various abiotic stresses such as water stress, but traits responsible for such adaptations may differ with environments. This study aimed at identifying the root traits and their associated QTL, and evaluating their interactions with soil water stresses. We made an extensive survey on genetic resources in rice in the Philippines and evaluated their responses to water stress conditions. We then identified the root plasticity as one of the key traits for adaptation and a QTL that is related with branching on chr 6. Field experiments showed the genotype that showed greater dry matter production under rainfed lowland conditions may have exhibited the root plasticity at soil depths with more available soil moistures. In cases where root plasticity at deeper soil layers were observed, such root plastic development may have occurred in response to the reduction of soil hardness when the soil moisture was high during soil moisture fluctuations.

研究分野：農学A

科研費の分科・細目：環境農学

キーワード：土壌環境 根 QTL 相互作用 天水田

1. 研究開始当初の背景

国際イネ研究所は 90 年代に入って、イネを栽培地域の水環境によって分類し、陸稲、天水田イネ、灌漑イネ、洪水常襲地域のイネ、に分け、これらをまったく別の種類のイネと考えるように研究戦略を大きく転換させた。これは、一般的な水ストレスなどは実在せず、対象地域の環境を正確に把握しない限り、有効な品種育成や栽培技術の改善は不可能であると考えたからである。

本研究では、陸稲と天水田イネを対象とした。まず陸稲については、耐旱性が重要であると考えられている。耐旱性は、従来から、drought escape、drought avoidance、drought tolerance に分けて考えられてきていて、本研究では drought avoidance に密接に関わる、根の役割に注目した。

イネの drought avoidance における根の重要性は、多くの研究成果が蓄積されてきている。耐旱性関連で重要性が指摘されてきた主な形質は、deep root (深根性)、thick root (太い根)、strong penetration ability (硬い土壌の貫通能力) である。この成果を踏まえて、この約 10 年間に、これらの形質に関する遺伝子や QTL の同定 (Fukai and Kamoshita, 2005; Mannickavelu et al., 2006; Qu et al., 2008) がめざましく進んだ。しかし、その成果が有効に分子マーカー育種に活かせておらず、品種の育成に結びついていない (Serraj, 2007; Bernier, 2008; Price, 2009)。

栽培面積が陸稲に比べ圧倒的に大きい天水田 (約 4600 万 ha で世界の総イネ作面積の約 1/3 を占める (MacLean et al., 2002)) では、陸稲のような単純な乾燥ストレスが問題なのではなく、土壌水分の乾燥-湿潤間の「変動」が激しいことが水ストレスの本質であることが、次第に明らかになってきているにもかかわらず、厳密な検討を経ないまま単純な乾燥ストレスのみが想定され、研究の主流は相変わらず、先に挙げた 3 形質が中心である。これまでの限られた研究で、ほとんどの根系が陸稲、天水田イネのいずれにおいても土壌表層約 20cm に存在することを示している。そのような場合には、上記の表層「20cm」に存在する根が、乾燥する時には耐えあるいは軽度の乾燥には促進的に反応し、雨が降った時にはその水を有効に吸収する、「可塑性」こそが重要な形質であることを、本研究の代表者らは明らかにしつつある。一方で、深根性に関わる潜在的な遺伝変異は、実際の圃場ではほとんどの場合マスクされてしまって発揮されないのではないかと (Tsunematsu et al., 2007)、ということが強く疑われる。

このように、根の形質の発現には遺伝的な制御だけではなく、遺伝子型 x 環境相互作用が決定的に大きい。この遺伝子型 x 環境相互作用については、つい最近までは統計学確率論に基づいて「推定」されていたのが、

現在では、遺伝子の実態として実証できるようになり、QTL x 環境 相互作用として捉えるようになったことによって (Price et al., 2002)、根の形質を実際に育種に取り入れることが画期的に現実性を帯びてきた。一方、今日に至るまで、実際の栽培圃場での、根系の発達や機能に影響を及ぼす土壌を含めた環境要因の観測データは極めて限られているし、それに対応させた根系発育の定量的解析データも限られている (例: Samson et al., 2002; Cairns et al., 2004)。また、とくにフィリピン国内の研究所や大学が有している遺伝資源について本研究のような視点からの形質評価はほとんど手つかずの状態になっている。

2. 研究の目的

これまでにフィリピン国内において未調査の、耐旱性に関わるイネ遺伝資源の広範な調査を行う。続いて、種々の水ストレス条件に対するイネの適応性において重要な役割を果たす根の形質を同定し、その関連 QTL を同定する。さらに、各対象栽培地域における水ストレスの特徴を定点観測によって把握した上で、水ストレス条件の異なる地域での栽培試験を実施し、先に同定した根の形質と環境要因との相互作用を評価する。

さらに、土壌硬度 x 土壌水分の相互作用が根系発達と吸水機能に及ぼす影響を定量的に評価するモデル実験によって、圃場試験の結果と比較する。

以上の結果を総合し、それぞれの栽培地域の条件下で最大生長・収量を保障する形質を有する理想型根系を提案し、関連 QTL と環境要因との相互作用を評価することによって、実用性を有した品種育成に向けた今後の研究方向を提示する。

3. 研究の方法

(1) 耐旱性に関わる遺伝資源の調査と重要形質の同定

フィリピンイネ研究所において、Line source sprinkler 装置を作成した。そこで、これまでに収集、保存してきた品種・系統について、発育諸パラメータ、葉身水ポテンシャル、気孔伝導度、光合成速度、乾物重、収量の測定により、成長反応と、根系発育を評価した。

(2) 水ストレス条件の異なる地域での栽培試験

上記のように、フィリピンイネ研究所において、これまでに収集、保存してきた品種・系統に加えて、国際イネ研究所との共同研究において評価してきた OryzaSNP パネルから選抜した数品種、名古屋大学ならびにフィリピンイネ研究所で遺伝解析用に育成してきた系統から選抜した数系統を、乾燥や降水のパターンが大きく異なるフィリピン国内の以下の地域で、調査、試験を継続して実施した。

パンガシナン州サンニコラス：天水田地帯。地形の起伏が大きい。乾季と雨季の降水量の差が明瞭（平均降水量 乾季 53.2 mm、雨季 2323.0 mm）。

イサベラ州サンマテオ：天水田地帯。地形の起伏が大きい。乾季と雨季があるが、サンニコラスほど降水量の差はない（平均降水量 乾季 644.3 mm、雨季 1103.7 mm）。

上記の圃場に加えて、ヌエバエシ八州のフィリピンイネ研究所内実験圃場において、それぞれが所有している品種・系統の耐旱性と根系の機能的役割を評価した。

(3) 根形質関連 QTL の同定

名古屋大学において、共通の材料を用いて、種々の異なる土壌水分条件に対する根系発育反応を評価し、日本晴/カサラス由来の染色体断片置換系統群から、土壌水分変動条件 (0 から -50 KPa の間) に対して日本晴と比べ明らかに適応性の高いものとして選抜した、系統 4 7 番に関して、根の可塑性などの諸形質に関わる QTL を解析した。

現在育成中の、日本晴をバックグランドにし、根系の可塑性は非常に強いことがわかっている KDML105 の染色体断片を導入した系統群の形質評価を実施した。

4. 研究成果

(1) 遺伝資源評価

Line source sprinkler 装置を用いて、耐旱性の評価を行い、圃場試験用の有望系統（主として DRS 系統群）を選抜した。

さらに、天水田条件下の乾燥に対して、側根発育の促進によって根系表面積を増加させるにもかかわらず、地上部乾物重を著しく減少させる品種が存在することを見出した。

国際イネ研究所において、プレッシャーチャンパー法によって、水通導性を測定した。また同時に供試品種である Oryza SNP 品種群全 20 品種を用いた栽培試験を実施した。その結果、水通導性には統計的に有意な品種間差が存在し、さらに、マイルドな乾燥ストレス条件下で、根長、根系表面積を増加させたにもかかわらず、乾物生産が抑制された品種は、水通導性を低下させることを見出した。

(2) 農家圃場における栽培試験

平成 22 年度にフィールド実験で、PhilRice Central Experiment Station (CES) と PhilRice Cagayan Valley Experimental Station の 2 カ所の PhilRice 実験圃場と 3 カ所の天水田農家圃場（パンガシナン、ムニヨス、イラガン）について、土壌水分や土壌硬度の測定や生育調査を行った。それらの実験結果から、場所によって降水量や土壌の性質など土壌環境に大きな違いがみられ、それによって生育や収量が大きく異なるという、大変興味深い結果を得た。

複数年に渡る調査の結果、土壌貫入抵抗値は土壌水分と有意な相互作用を示し、後者が低くなるに連れて前者が高くなることがわかった。乾物生産、総根長とキャノピー温度

は、季節、場所ならびに品種・系統間との相互作用の影響を受けた。総根長は乾物生産と関係したが、その関係は、乾燥時の 10-20 cm または 20 - 30 cm の土層の含水率によってより強く規定された (Table 1)。キャノピー温度は、乾物生産と相関関係を示したが、その関係は乾季の方が雨季に比べて強くまた有意であった。

これらの結果は、土壌水分変動条件下で、より大きな乾物生産を示した品種/系統は、利用可能な土壌水分が存在する層で根の可塑性を発揮し、それによって根長増加が起きた可能性を示している。とくに、20 - 30 cm の土層で、含水率が高くなり貫入抵抗値が低下した時に、可塑性が発揮された可能性がある。

Table 1. Correlation coefficient (r) between total root length at different soil depths and total biomass in three different toposesequences in the rainfed lowland rice farmers' fields from 2011 wet and 2012 dry season cropping periods in Ilagan, Isabela.

	Upper Toposequence	Mid Toposequence	Lower Toposequence
2011 Wet Season			
TRL (0-10 cm) vs Total Biomass	-0.87	0.02	-0.03
TRL (10-20 cm) vs Total Biomass	0.19	0.32*	-0.29
TRL (20-30 cm) vs Total Biomass	0.55**	-0.40	0.83**
2012 Dry Season			
TRL (0-10 cm) vs Total Biomass	-0.43	-0.63	-0.29
TRL (10-20 cm) vs Total Biomass	0.17	0.06	0.55**
TRL (20-30 cm) vs Total Biomass	0.38*	0.38*	-0.32

TRL- total root length; TB-total biomass; ns-not significant; *,** - significant at 5% and 1% level, respectively

(3) 根形質関連 QTL

日本晴/カサラス 染色体断片置換系統群から選抜した系統 4 7 番に関して、根の可塑性などの諸形質に関わる QTL を解析し、第 6 染色体長腕側に根への乾物分配に関わる QTL、第 1 2 染色体短腕上に側根発育に関わる QTL を同定した。

日本晴をバックグランドにし KDML105 の染色体断片を導入した系統群の中には、乾燥あるいは、土壌水分変動条件下で日本晴より高い

乾物生産を示し、かつ大きな根の可塑性を示す系統を見出した。

(4) ワークショップ

PhilRice Central Experiment Station (CES) にて、2011年9月20日に、ワークショップ「Functional Roles of Roots in the Adaptation and Yield Improvement of Rice under Drought-Prone Ecosystem」を開催した。主催した、Philrice や名古屋大学を始め、東京大学、国際イネ研究所、国際農林水産業研究センター、中部ルソン州立大学などから、延べ7約70名が参加した。そこで、研究代表者の山内は、Background and philosophy of the Nagoya University-PhilRice collaborative project on rainfed lowland rice research というタイトルで、本補助金による共同研究プロジェクトの全体像を参加者に説明した。乾燥ストレスが問題になる地域での、育種や栽培気実に関わる研究方向について活発な議論を展開した。

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 3件)

Kano-Nakata, M., Gowda, V. R. P., Henry, A., Serraj, R., Inukai, Y., Fujita, D., Kobayashi, N., Suralta, R. R. and Yamauchi, A., Functional roles of the plasticity of root system development in biomass production and water uptake under rainfed lowland conditions, *Field Crops Research*, 査読あり、144 巻、2013、288-296
DOI: 10.1016/j.fcr.2013.01.024

Niones, J. M., Suralta, R. R., Inukai, Y. and Yamauchi, A., Roles of root aerenchyma development and its associated QTL in dry matter production under transient moisture stress in rice, *Plant Production Science*, 査読あり、16 巻 3号、2013、205-216
DOI: 10.1626/ppls.16.205

Jonathan M. Niones, Roel R. Suralta, Yoshiaki Inukai and Akira Yamauchi, Field evaluation on functional roles of root plastic responses on dry matter production and grain yield of rice under cycles of transient soil moisture stresses using chromosome segment substitution lines, *Plant and Soil*, 査読あり、359 巻、2012、107-120
DOI: 10.1007/s11104-012-1178-7

[学会発表](計 24件)

Roel Rodriguez Suralta, Mana Kano-Nakata, Thiem Thi Tran, Jonathan Manito Niones, Akira Yamauchi, Timing of root penetration in the hardpan during soil moisture fluctuations and its

contribution to the water use during drought stress and dry matter production in rice、日本作物学会第 237 回講演会、2014 年 3 月 29 日、千葉大学

Thiem Thi Tran, Daniel Menge, Mana Kano-Nakata, Roel Rodriguez Suralta, Shiro Mitsuya, Yoshiaki Inukai, Akira Yamauchi, Effects of soil compaction on the expression of plasticity in root system development triggered by water deficit conditions and nitrogen application and its contribution to dry matter production in rice、日本作物学会第 237 回講演会、2014 年 3 月 29 日、千葉大学

Stella Owusu Nketia, Yoshiaki Inukai, Shiro Mitsuya, Roel Rodriguez Suralta, Jonathan M. Niones, Akira Yamauchi, Functional roles of root developmental plasticity and its contribution to dry matter production under soil moisture fluctuation in rice introgression lines、日本作物学会第 237 回講演会、2014 年 3 月 29 日、千葉大学

株木拓也、山内 章、イネ種子根軸上における異形側根の発生部位と導管成熟部位との関係、日本作物学会第 237 回講演会、2014 年 3 月 29 日、千葉大学

Thiem Thi Tran, Mana Kano-Nakata, Daniel Menge, Roel R. Suralta, Shiro Mitsuya, Akira Yamauchi, Soil compaction effects on the expression of development plasticity of root system triggered by mild drought stress x nitrogen application in rice、第 39 回根研究集会、2013 年 11 月 9 日、畜産草地研究所那須研究拠点

株木拓也・三屋史朗・山内 章、イネ種子根系における異形側根間での発育部位と導管成熟部位との関係における差異、第 39 回根研究集会、2013 年 11 月 9 日、畜産草地研究所那須研究拠点

仲田(狩野)麻奈・Henry Amelia・小林信哉・Rachid Serraj・福田善通・山内 章、土壌水分変動条件に適応したイネ系統における乾燥ストレス後の再灌水に対する根系発育反応、第 39 回根研究集会、2013 年 11 月 9 日、畜産草地研究所那須研究拠点

亀岡 笑・Amelia Henry・三屋史朗・山内 章、土壌乾燥条件下でのイネ乾物生産における根系発達と根水通導性の貢献度に関する定量的評価、日本作物学会東海支部第 144 回講演会、2013 年 9 月 27 日、岐阜大学

Thiem Thi Tran, Mana Kano-Nakata, Shiro Mitsuya and Akira Yamauchi, Expression of developmental plasticity of root system as affected by water deficit conditions and nitrogen forms interaction in rice、日本作物学会第 236 回講演会、2013 年 9 月 10 日、鹿児島大学

亀岡 笑・三屋 史朗・山内 章、イネ根系

の発育的可塑性が果たす耐旱性への貢献度における品種間差異、日本作物学会第236回講演会、2013年9月10日、鹿児島大学

Emi Kameoka, Amelia Henry, Shiro Mitsuya and Akira Yamauchi, Root hydraulic conductance measurement with root pressure chamber method at different growth stages in rice、第38回根研究集会、2013年5月17日、ホテルニュー種子島

Emi Kameoka, Amelia Henry, Roel R. Suralta, Shiro Mitsuya and Akira Yamauchi, Genotypic variation in root hydraulic conductivity of rice in response to mild drought stress、日本作物学会第235回講演会、2013年3月28日、明治大学

Daniel M. Menge, Daigo Makihara, Mana Kano-Nakata, Hidetoshi Asai, Shuichi Asanuma and Akira Yamauchi, Undestructive quantification of root system development in ERICA varieties under different intensities of water deficit by using minirhizotron root scanner、第234回日本作物学会講演会、2012年9月10日、東北大学

Mana Kano-Nakata, Roel R. Suralta, Filomena S. Grospe, Maria Corazon N. Julaton, Anna Theresa Isabel O. Rebong, Andrea M. Flores, Yoshiaki Inukai, Jonathan M. Niones, Emi Kameoka, Shigenori Morita, Jun Abe, Yoichiro Kato, Yoshimichi Fukuta, Nobuya Kobayashi and Akira Yamauchi, Soil moisture and soil strength interaction impacts on root distribution and dry matter production in rainfed lowland rice fields in the Philippines、第234回日本作物学会講演会、2012年9月10日、東北大学

亀岡 笑・山内 章、乾燥ストレス条件下のイネ乾物生産における根系の可塑的発育の役割、第234回日本作物学会講演会、2012年9月10日、東北大学

Jonathan M. Niones and Akira Yamauchi, QTL for the plasticity in root system development triggered by soil moisture fluctuation stress in rice, The JSRR's 20th Anniversary Symposium, "The Latest Frontiers of Root Research in Asia" and 35th JSRR Biannual Meeting, 2011年11月6日、東京大学

Jonathan M. Niones, Yoshiaki Inukai and Akira Yamauchi, QTLs on Chromosome 12 Responsible for Expressing Root Plasticity under Transient Soil Moisture Fluctuation Stress in Rice, The 7th Asian Crop Science Association Conference, 2011年9月29日、IPB International Convention Center Bogor

Jonathan M. Niones, Yoshiaki Inukai and Akira Yamauchi, Root aerenchyma formation in relation to dry matter production under

continuous cycle of transient soil moisture fluctuation stress in field in the chromosome segment substitution lines of rice、第34回根研究集会、2011年5月14日、佐賀大学

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：
取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

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

森田 茂紀 (MORITA, Shigenori)
東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授
研究者番号：00143404

犬飼 義明 (INUKAI, Yoshiaki)
名古屋大学・農学国際教育協力研究センター・准教授
研究者番号：20377790

阿部 淳 (ABE, Jun)
東京大学・大学院農学生命科学研究科・助教
研究者番号：60221727

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

(3) 連携研究者

()
研究者番号：